

ANDRÉ LUIZ SILVA MONTEIRO

**MONITORAMENTO DE INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL
NA AMAZÔNIA LEGAL UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Christel Lingnau
Co-orientador: M.Sc. Carlos Souza Jr.

CURITIBA
2005

Ao meu inesquecível irmão Adriano (*in memorium*)
Dedico

AGRADECIMENTOS

Aos financiadores deste estudo: Agência Americana para o Desenvolvimento (USAID) e Experimento de Larga Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia (LBA) pela aquisição das imagens LANDSAT TM/ETM⁺, ASTER e IKONOS; Fundação Gordon e Betty Moore pelo apoio ao trabalho de campo; Fundação FORD e a CAPES pelo apoio ao programa de mestrado.

As empresas Cikel Brasil Verde S.A, Maracaí Florestal e Coimal - Comércio e Indústria de madeira por disponibilizarem áreas para este estudo.

A professora e orientadora Dra. Christel Lingnau, pelo acompanhamento e revisão do estudo, e ao co-orientador M Sc. Carlos Souza Jr, pelas críticas que propiciaram um maior aprofundamento na pesquisa deste estudo.

A todos os amigos e amigas do curso de pós-graduação pela amizade e companheirismo.

A todos os colegas de Imazon que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste estudo.

Aos meus queridos pais (Luiz e Rosinete) pela compreensão e incentivo para realização deste sonho. As minhas queridas irmãs Andréia e Adriléa e meus amados sobrinhos Andreza e Vinícius por suas existências.

A minha querida esposa Elisângela pelo incentivo e por estar sempre ao meu lado durante a realização deste sonho.

E a Deus pela benção e saúde para concluir este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	xi
LISTA DE ANEXOS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1 EXPLORAÇÃO DE MADEIRA E MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA.....	17
3.2 AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL.....	19
3.2.1 Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.....	20
3.2.1 Certificadoras.....	21
3.3 MONITORAMENTO POR SATÉLITE DA ATIVIDADE MADEIREIRA.....	24
3.3.1 Aplicação de Sensoriamento Remoto.....	24
3.3.2 Aplicação de Geoprocessamento.....	27
3.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO EM OPERAÇÃO NA AMAZÔNIA.....	29
3.4.1 Desflorestamento.....	29
3.4.2 Queimada.....	31
3.4.3 Exploração Madeireira.....	32
3.4.4 Sistema de Vigilância da Amazônia.....	33
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	34
4.1.1 Paragominas - PA.....	36
4.1.2 Sinop - MT.....	35
4.2 BASE DE DADOS.....	36
4.2.1 Imagens de Satélite.....	36
4.2.2 Inventários Florestais.....	37
4.2.3 Mapas Temáticos.....	37
4.2.4 Modelo Digital de Elevação.....	38
4.3 METODOLOGIA.....	38
4.3.1 Processamento das Imagens de Satélite.....	40
4.3.1.1 Pré-Processamento.....	40
4.3.1.2 Modelo Linear de Mistura Espectral.....	42
4.3.1.3 Segmentação e Classificação Orientada a Objeto.....	45
4.3.2 Avaliação dos Indicadores em SIG.....	48
4.4.3 Trabalhos de Campo.....	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.1 Verificação dos Indicadores de Manejo Florestal no Campo.....	53
5.1.1 Planejamento e Construção de Estradas e Pátios de Estocagem.....	53

5.1.2 Impacto da Exploração no Dossel.....	57
5.1.3 Exploração Florestal na Unidade de Produção Anual (UPA).....	58
5.1.4 Respeito às Áreas de Preservação Permanente (APPs)	59
5.1.5 Proteção Florestal Contra Incêndios Florestais.....	59
5.2 Modelo Linear de Mistura Espectral.....	60
5.3 Segmentação e Classificação Orientada a Objeto.....	60
5.4 Avaliação dos Indicadores de Manejo Florestal	66
5.4.1 Paragominas.....	66
5.4.2 Sinop	74
5.5 Fiscalização e Monitoramento de Planos de Manejo Florestal.....	83
5.6 Avaliação do Custo e Benefício para o Monitoramento Remoto dos Indicadores de Manejo Florestal	85
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	88
6.1 CONCLUSÕES	88
6.2 RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	35
FIGURA 2- FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	39
FIGURA 3- COMPARAÇÃO DA DIMENSÃO DO PÁTIO DE ESTOCAGEM VISTO DO CAMPO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (500 m ²) E EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (3.700 m ²) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	55
FIGURA 4- COMPARAÇÃO DA LARGURA DE ESTRADAS SECUNDÁRIAS VISTA DO CAMPO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA E EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	57
FIGURA 5- EXEMPLOS DE ABERTURAS NO DOSSEL EM CLAREIRAS, TOMADAS COM CÂMERA DIGITAL ACOPLADA A LENTE “OLHO DE PEIXE”, PARA FLORESTA INTACTA (A), EXPLORAÇÃO MANEJADA (B) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC), NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	58
FIGURA 6- EXEMPLOS DE ABERTURAS NO DOSSEL EM CLAREIRAS, TOMADAS COM CÂMERA DIGITAL ACOPLADA A LENTE “OLHO DE PEIXE”, PARA FLORESTA INTACTA (A), EXPLORAÇÃO MANEJADA (B) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC), NA REGIÃO DE SINOP – MT...58	58
FIGURA 7- VIOLAÇÃO DE APPS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL, ATRAVÉS DA ABERTURA DE ESTRADA, OBSTRUINDO O LEITO DO RIO, E PROVOCANDO A MORTE DE ÁRVORES (A) E EROSÃO DO TIPO “VOÇOROCA” (B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	59
FIGURA 8- IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO (A), SOLO (B) E NPV (C) OBTIDAS A PARTIR DE IMAGEM LANDSAT POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL PARA EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	60
FIGURA 9- SEGMENTAÇÃO FINA (A) E GROSSEIRA (B) DA IMAGEM IKONOS MS (4 METROS) PARA EXTRAÇÃO DE FLORESTA, ESTRADAS E PÁTIOS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	61

FIGURA 10- CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA IMAGEM LANDSAT (A) E ASTER (B) PARA EXTRAÇÃO DAS CLASSES FLORESTA, ESTRADAS E PÁTIOS EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	63
FIGURA 11- CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA IMAGEM LANDSAT (A), ASTER (B), IKONOS MS - 4m (C) E IKONOS PSM - 1m (D) PARA EXTRAÇÃO DAS CLASSES FLORESTA, PÁTIOS E ESTRADAS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	64
FIGURA 12- DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT - PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT E ASTER - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	67
FIGURA 13- DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT – PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT E ASTER - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA DAS ESTRADAS SECUNDÁRIAS EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	68
FIGURA 14- HISTOGRAMAS DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA PARA FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	69
FIGURA 15- ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E	

EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	70
FIGURA 16- COMPARAÇÃO DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (A) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	71
FIGURA 17- AVALIAÇÃO NA IMAGEM LANDSAT ETM+ RGB (5,4,3) DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA UNIDADE DE PRODUÇÃO ANUAL (UPA) EM EXPLORAÇÃO MANEJADA NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	72
FIGURA 18- AVALIAÇÃO NA IMAGEM DE ABUNDÂNCIA DE SOLOS (LANDSAT ETM+) DO RESPEITO AS APPS EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (SEM VIOLAÇÃO; A) E EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (COM VIOLAÇÃO; B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	73
FIGURA 19- DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA DIMENSÃO MÉDIA DOS PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	75
FIGURA 20- DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT – PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) – PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	76
FIGURA 21- DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT – PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM	

	(1m) - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE ESTRADAS SECUNDÁRIAS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	77
FIGURA 22-	DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA LARGURA MÉDIA DA ESTRADA PRINCIPAL EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	78
FIGURA 23-	DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA LARGURA MÉDIA DAS ESTRADAS SECUNDÁRIAS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	79
FIGURA 24-	HISTOGRAMAS DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA PARA FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	80
FIGURA 25-	ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	81
FIGURA 26-	COMPARAÇÃO DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (A) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (B) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	82
FIGURA 27-	AVALIAÇÃO NA IMAGEM LANDSAT ETM+ RGB (5,4,3) DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA UNIDADE DE PRODUÇÃO ANUAL (UPA) EM EXPLORAÇÃO MANEJADA NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	83

FIGURA 28- COMPARAÇÃO DO CUSTO E BENEFÍCIO PARA O MONITORAMENTO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL POR IMAGENS DE SATÉLITE E POR CAMPO.....86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	34
TABELA 2- BASE DE DADOS DAS IMAGENS DE SATÉLITE.....	36
TABELA 3- EQUAÇÕES DE INTERCALIBRAÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT.....	42
TABELA 4- BANDAS ESPECTRAIS USADAS NA SEGMENTAÇÃO MULTI-RESOLUÇÃO.....	45
TABELA 5- PARÂMETROS DE SEGMENTAÇÃO USADOS PARA AS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS E IKONOS PSM.....	46
TABELA 6- DESCRITORES UTILIZADOS NA CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DAS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS E IKONOS PSM.....	48
TABELA 7- VERIFICAÇÃO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL NO CAMPO.....	51
TABELA 8- QUANTIFICAÇÃO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL FEITOS NO CAMPO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NAS REGIÕES DE PARAGOMINAS E SINOP.....	54
TABELA 9- DESCRITORES UTILIZADOS PARA DEFINIR AS CLASSES FLORESTA, NÃO FLORESTA, PÁTIO, ESTRADA E NUVEM.....	62
TABELA 10- DIFERENÇA ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS PARA OS INDICADORES DE MANEJO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	66
TABELA 11- ANÁLISE DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA ENTRE FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E	

	EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	68
TABELA 12-	ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS – PA.....	70
TABELA 13-	DIFERENÇA ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NAS IMAGENS E NO CAMPO PARA OS INDICADORES DE MANEJO EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	74
TABELA 14-	ANÁLISE DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA ENTRE FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	80
TABELA 15-	ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	81
TABELA 16-	AVALIAÇÃO GERAL DO POTENCIAL DAS IMAGENS LANDSAT, ASTER E IKONOS PARA MONITORAR OS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL EM ÁREAS DE EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) E EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM).....	84
TABELA 17-	CUSTOS PARA O MONITORAMENTO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL.....	87

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1-	COMPARAÇÃO DA IMAGEM (IKONOS PSM) COM A CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DE FLORESTA, PÁTIO E ESTRADA, E SUAS RESPECTIVAS REPRESENTAÇÕES NO CAMPO EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE SINOP – MT.....	65
-----------	---	----

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS SENSORES.....	103
ANEXO 2- FICHA PARA VERIFICAÇÃO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL NO CAMPO.....	104
ANEXO 3- SÍNTEXE DAS REGRAS FUZZY.....	105

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS (MS e PSM) para monitorar indicadores de manejo florestal relacionados: i) ao planejamento e construção de estradas e pátios de estocagem; ii) ao impacto da exploração no dossel; iii) a exploração florestal na Unidade de Produção Anual (UPA); iv) ao respeito às Áreas de Preservação Permanente (APPs); e v) a proteção florestal contra incêndios. O estudo foi conduzido em áreas de exploração convencional (EC) e exploração manejada (EM) nas regiões de Paragominas - PA e de Sinop - MT. A técnica de segmentação e classificação orientada a objeto foi testada nas imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS para extrair informações como pátios e estradas. Além disso, foi aplicada a técnica de modelo linear de mistura espectral na imagem LANDSAT para extrair informações de pátios e estradas, e para avaliar o impacto da exploração no dossel, o respeito às APPs e a proteção florestal contra incêndios. Trabalhos de campo foram conduzidos nas áreas de estudo para verificar os indicadores de manejo e servir de referência para a avaliação da acurácia das informações obtidas nas imagens. Os resultados mostraram que o monitoramento do indicador: i) dimensão dos pátios de estocagem, pode ser feito em imagem IKONOS PSM; ii) largura da estrada principal em IKONOS MS e PSM; iii) largura da estrada secundária em IKONOS PSM; iv) distância entre pátios e entre estradas secundárias em LANDSAT (processadas por segmentação e classificação orientada a objeto e por modelo linear de mistura espectral), ASTER e IKONOS MS e PSM; e v) impacto da exploração no dossel, exploração florestal na UPA, respeito as APPs e proteção florestal contra incêndios em imagem LANDSAT. O método deste estudo mostrou-se eficiente para distinguir EC de EM através da avaliação remota dos indicadores de manejo florestal. Este método contribui para otimizar os programas de fiscalização e monitoramento do manejo florestal na Amazônia pelas agências ambientais e certificadoras, tornando o processo mais eficiente e confiável. Além disso, o mesmo baixa os custos de fiscalização e auditorias realizadas em campo pelas certificadoras.

Palavras-chave: exploração seletiva de madeira, indicadores de manejo florestal, modelo de mistura espectral, classificação orientada a objeto, Amazônia.

ABSTRACT

The objective of this study was evaluate the use of LANDSAT, ASTER and IKONOS (multi-spectral and pan-sharpening) images to monitor indicators of forest management related to: i) planning and construction of logging roads and log landing; ii) canopy disturbance due selective logging; iii) selective logging in the Annual Production Unit (UPA); iv) respect to Areas of Permanent Preservation (APPs); and v) forest protection against fires. The study was carried out in areas of conventional logging (CL) and managed logging (ML) in the regions of Paragominas, NE Para and Sinop, N Mato Grosso, Brazil. We tested in these images the segmentation and object based classification technique to extract logging roads and log landing. Also, we applied the linear spectral mixture models to extract logging road and log landing beyond to evaluate the canopy disturbance due logging, the respect to APPs and forest protection against fires. Field work was carried out in the study areas to verify the indicators and serve as reference to validate the information obtained from the images. The results showed that: i) the log landing dimensions can be monitored by IKONOS pan-sharpening image; ii) the width of primary roads by IKONOS multi-spectral and pan-sharpening images; iii) the width of secondary roads by IKONOS pan-sharpening image; iv) the distance between logs landing and between secondary roads by LANDSAT image (processed by segmentation and object based classification and spectral mixture models), ASTER and IKONOS multi-spectral and pan-sharpening images; and v) the canopy disturbance due logging, logging in the UPA, respect to APPs and forest protection against fires by LANDSAT image. The method of this study is efficient to distinguish CL from ML through the remote evaluate of the indicators of forest management. Finally, this methodology can be used as environmental agencies in charge of monitoring selective logging in the Amazon and by institutes that provide forest certification become the process more efficient and reliable. Beyond that, it can turn the cost low of enforcement and field audits by the certifiers.

Keywords: selective logging, indicators of forest management, linear spectral mixture model, object based classification, Amazonia.

1 INTRODUÇÃO

Com a exaustão dos recursos madeireiros nas regiões Sul e Sudeste do País, a abertura de estradas e o baixo preço da terra na região amazônica na década de 60, o recurso madeireiro tornou-se um atrativo para os madeireiros de outras regiões. Em Paragominas, no Estado do Pará, considerado o maior pólo produtor de madeira no passado, o número de serrarias passou de uma no início da década de 70 para trezentas no final da década de 80 (Uhl & Vieira, 1989). Atualmente a atividade madeireira possui 2.570 empresas distribuídas em 82 pólos madeireiros (centros de processamento de madeira) na Amazônia Legal, produzindo 24,5 milhões de metros cúbicos de madeira em tora/ano e gerando em torno de U\$\$ 2,5 bilhões de renda bruta, colocando o setor como uma das principais atividades econômicas na região (Lentini et al, 2005).

Entretanto, a exploração de madeira praticada na região vem sendo feita de forma insustentável devido a não adoção das práticas de manejo florestal. Estima-se que 47% da exploração de madeira praticada na Amazônia é predatória (Lentini et al, 2003). A exploração predatória causa diversos impactos na floresta, como: maior número de árvores danificadas; e abertura excessiva de estradas, ramais de arraste, pátios de estocagem e clareiras (Johns et al, 1996). Além disso, a madeira proveniente de planos de manejo é mínima. De acordo com dados do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), a madeira explorada através de plano de manejo foi de apenas um terço do total extraído em 2001; o restante foi proveniente de fontes insustentáveis como desflorestamento e exploração ilegal (Barreto, 2002).

O IBAMA, realiza vistorias técnicas anuais no campo para avaliar se os Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) em operação na Amazônia estão sendo conduzidos de acordo com as normas prescritas do manejo florestal. Esta atividade baseia-se na avaliação

de indicadores de manejo florestal, como: planejamento de aberturas de estradas, pátios de estocagem, queda direcional de árvores, corte de cipós entre outros. A fiscalização e o monitoramento de planos de manejo, conduzido pelo IBAMA, é um dos grandes desafios para o futuro da exploração de madeira sustentável na Amazônia. Isto porque a fiscalização e o monitoramento são feitos através de vistorias amostrais de campo o que requer tempo e não abrangem todos os planos de manejo florestal em funcionamento. Imagens de satélite têm sido uma ferramenta promissora para mapear a infra-estrutura criada pela exploração madeireira e níveis de degradação causados pela mesma (Souza Jr. & Barreto, 2000; Souza Jr. et al, 2003a) e podem ser úteis para monitorar certos indicadores de manejo, otimizando assim a sua fiscalização.

2 OBJETIVOS

Objetivo geral

- Avaliar o potencial das imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS para detectar e monitorar indicadores de manejo florestal.

Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da resolução espacial das imagens sobre a extração de informações dos indicadores de manejo florestal.
- Avaliar nas imagens os indicadores de manejo florestal em diferentes tipos de floresta e formas de exploração madeireira.
- Identificar a (s) imagem (s) de melhor relação custo e benefício para o monitoramento dos indicadores de manejo florestal.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 EXPLORAÇÃO DE MADEIRA E MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA

A Amazônia Legal com uma área de 5 milhões de quilômetros quadrados (60% do território nacional) e uma população de 21 milhões de habitantes é formada pelos Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão (44^o de longitude oeste), Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins. A exploração de madeira é uma das principais atividades econômicas da região. Esta contribui com cerca de 15% do Produto Interno Bruto (PIB) dos Estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia, com rendimento bruto em torno de US\$ 2,5 bilhões por ano e geração de 344 mil empregos diretos e indiretos (Lentini et al, 2005).

A exploração de madeira praticada na região pode ser caracterizada de duas formas: I) Exploração Manejada (EM) ou Exploração de Impacto Reduzido, caracterizada pelo planejamento da construção de estradas, pátios de estocagem e ramais de arraste, do corte de cipós antes da exploração e da derrubada direcional das árvores; e II) Exploração Convencional (EC) ou Exploração Predatória, caracterizada pela exploração sem planejamento onde estradas e pátios de estocagem seguem uma rota tortuosa e mais longa, os cipós não são cortados antes da exploração e as árvores são derrubadas sem técnicas de corte (Johns et al, 1996; Vidal et al, 1997; Holmes et al, 2002), causando maior impacto na floresta.

A exploração predatória, onde se começa extraindo somente espécies de alto valor econômico, representa 47% da madeira extraída na região (Lentini et al, 2003). Geralmente, neste tipo de exploração, os madeireiros retornam à mesma área em intervalos curtos de tempo para extrair espécies de menor valor econômico ou de diâmetros menores, deixando severos impactos na floresta, como: aumento da susceptibilidade ao fogo (Holdsworth &

Uhl, 1997), redução da biomassa viva (Gerwing, 2002), aumento do risco de extinção de espécies locais (Martini et al, 1994), aumento de cipós e espécies pioneiras (Holdsworth & Uhl, 1997; Cochrane & Schulze, 1999; Gerwing, 2002; Monteiro et al, 2004), catalisação do desmatamento (Veríssimo et al, 1995) e emissão de carbono (Houghton, 1995). Estudos de campo têm mostrado que a exploração predatória de madeira mecanizada extrai de 30 a 50 m³ de madeira em tora por hectare e reduz a cobertura total do dossel original de 80% para 45% em floresta ombrófila densa (Uhl & Vieira, 1989). A redução pode chegar a 39% quando a floresta é submetida à exploração de madeira seguida de intensa queimada (Gerwing, 2002). Esta exploração caracteriza um modelo econômico denominado por Schneider et al (2000) de *Boom-Colapso*, onde nos primeiros anos ocorre um rápido crescimento (*boom*) da economia local, seguido de um severo declínio em renda e emprego (colapso). O modelo econômico com o manejo florestal pode reverter este ciclo predatório.

Outra questão relevante diz respeito à origem da madeira explorada na Amazônia. De acordo com dados oficiais do IBAMA, dos 28,3 milhões de metros cúbicos de toras exploradas em 2001, apenas 33% foram explorados através de planos de manejo; o restante foi proveniente de fontes insustentáveis como desflorestamento e extração predatória (Barreto, 2002). Macqueen et al (2004) estimaram que 80% da produção de madeira foi explorada legalmente na região. Enquanto que os 20% restantes seriam provenientes de origem ilegal como: desflorestamento ilegal, reservas indígenas e terras públicas. Do total explorado legalmente, 75% foram provenientes de licenças de desmatamento.

Atualmente a única garantia da origem legal de madeira da Amazônia é o selo verde do FSC (Conselho de Manejo Florestal). A madeira proveniente de área certificada representa apenas 3% do manejo na região; no entanto empresas florestais certificadas têm aumentado suas áreas devido ao crescimento da demanda por madeira certificada no mercado mundial.

As áreas certificadas na Amazônia passaram de 400 mil hectares em 2003 para aproximadamente 1,3 milhão de hectares em 2004 (FSC, 2004). Entretanto, a certificação da floresta não significa a solução do problema da exploração ilegal na região (Fern, 2004). Segundo um relatório do Banco Mundial¹, a certificação é uma garantia de qualidade e demanda confiança e benevolência. Entretanto, visitas de avaliação e vistorias preliminares são limitadas em tempo, frequência e área.

Quanto aos planos de manejo florestal em andamento na Amazônia, o IBAMA desde 1996 vem realizando inspeções rigorosas através de revisões e checagens em campo destes planos. Estudos realizados a partir de dados do IBAMA, mostraram que os planos de manejo considerados aptos (sem problemas) passou de 31% em 1998 para 47% em 2000 (Barreto & Souza Jr, 2001). O que demonstra haver uma tendência de aumento do número de planos de manejo considerados aptos (Barreto & Souza Jr, 2001; IBAMA, 2001). Segundo Macqueen et al (2004) após as rigorosas vistorias realizadas pelo IBAMA, o volume anual de madeira autorizada correspondeu a 10% do total produzido na região e que a metade (5%) tenha sido objeto de fraude.

3.2 AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL

De acordo com o ITTO (International Tropical Timber Organization, 1998), critérios e indicadores são ferramentas para acessar tendência na condição e manejo da floresta, além de prover uma base comum para descrever, monitorar e avaliar o progresso para o manejo florestal sustentável. O critério é um aspecto importante através do qual pode-se conseguir o manejo sustentável da floresta, sendo este acompanhado por um conjunto de indicadores relacionados. O indicador é um atributo descritivo, quantitativo e qualitativo que quando medido ou monitorado periodicamente, indica o nível do manejo da floresta. A medição do

¹ SGS GLOBAL TRADE SOLUTIONS (2003) p.9. Ibid

indicador para avaliar a sustentabilidade da floresta pode ser feita em diferentes escalas geográficas e níveis administrativos ou gerenciais, tais como: global, regional ou unidade específica do manejo da floresta (Mendoza & Prabhu, 2003). Os critérios e indicadores podem servir não somente como uma ferramenta de promoção do manejo sustentável da floresta, mas como uma base para o monitoramento da condição e o desenvolvimento desta floresta para a sustentabilidade (Mendoza & Prabhu, 2003).

O conceito e as regras de critérios e indicadores de manejo florestal foram introduzidos pelo ITTO em 1992, e desde então outros critérios e indicadores foram desenvolvidos. Estes padrões podem ser usados tanto para a certificação (ISO, 1995; ITTO, 1992), como para a avaliação da condição da floresta (FSC, 1994). Os critérios e indicadores para avaliar o manejo sustentável de floresta tropical natural podem ser encontrados em um guia que propõe um conjunto de princípios como referência padrão para um estabelecimento mais específico da aplicação de critérios e indicadores. Nos últimos anos os critérios e indicadores desenvolvidos pelo ITTO vêm sendo melhorados e adaptados de acordo com as necessidades de aplicação.

3.2.1 Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA

O IBAMA vem utilizando um conjunto de verificadores e indicadores para avaliar anualmente a aplicação do manejo florestal nos PMFS (Planos de Manejo Florestal Sustentável). Estes indicadores avaliam questões relacionadas aos aspectos gerais (segurança no trabalho, infra-estrutura do acampamento e monitoramento das atividades), a fase pré-exploratória (delimitação das Áreas de Manejo Florestal e das Unidades de Produção Anual, inventário florestal a 100%, microzoneamento, corte de cipós e infra-estrutura), a fase exploratória (corte e abate de árvores, arraste e operações de pátios), a fase

pós-exploratória (tratos silviculturais, proteção florestal, manutenção da infra-estrutura e monitoramento do desenvolvimento da floresta). A cada verificador é atribuído um peso, que varia de 0 a 5, de acordo com a qualidade da aplicação de cada verificador. Após a avaliação destes indicadores os PMFS são classificados como: aptos (em condição de continuar operando), suspenso (apresenta falha no planejamento ou execução) e em recomposição (área totalmente explorada com vegetação remanescente sob avaliação).

Estas avaliações começaram no segundo semestre de 1996 e desde lá vêm sofrendo alterações e incorporações de acordo com as mudanças na legislação, experiência acumulada de anos anteriores e uso de programas e manual de procedimentos de campo. As vistorias são amostrais e consideram os aspectos: objeto (madeira, palmito e outros), ambiente (terra-firme e várzea), aspecto social (comunitário e individual), escala (industrial e simplificada) e regime de controle da exploração (convencional – por área, e especial – por volume). A avaliação dos indicadores em 2001 mostrou baixo desempenho dos planos de manejo - objeto madeira. A pontuação mínima foi de 1,76 para o aspecto de segurança no trabalho e máxima de 2,63 para delimitação das áreas sob manejo. No final a avaliação de 2001, realizada em 1.080 PMFS, considerou 51,8% aptos, 43,3% cancelados e 4,8% em recomposição (IBAMA, 2001).

3.2.2 Certificadoras

As certificadoras são instituições privadas ou órgãos governamentais que realizam avaliações independentes para garantir e atestar se determinada empresa/comunidade obtém seus produtos florestais manejando sua área florestal de acordo com os Princípios e Critérios² do FSC. O FSC é uma organização internacional independente, sem fins lucrativos e não governamental, fundado em 1993 por representantes de entidades

ambientalistas, pesquisadores, engenheiros florestais, empresários da indústria e comércio de produtos de origem florestal, comunidades indígenas, populações tradicionais e instituições certificadoras. A missão do FSC é credenciar as certificadoras em todo o mundo para autorizar a emissão do certificado com o aval e marca do FSC. O certificado ou selo verde é o documento que garante se um determinado produto consumido provém de área manejada ambientalmente adequada, socialmente justa e economicamente viável. O FSC é composto por 3 câmaras representativas: social, ambiental e econômica; sendo que as três câmaras possuem representantes de países desenvolvidos e em via de desenvolvimento com igual poder de voto.

As certificadoras desenvolvem e adaptam padrões e guias de campo, segundo a realidade e sistema local de produção, respeitando os Princípios e Critérios do FSC. Estes Princípios e Critérios foram desenvolvidos no início da década de 90 para promover o manejo de florestas naturais. Este processo durou dezoito meses e envolveu estudos de viabilidade detalhada em dez países, além de um estudo especial para populações indígenas. Com a fundação do FSC em 1993, os Princípios e Critérios foram aprovados e publicados (GEF, 2002). Os padrões do FSC internacional avaliam questões relacionadas a: (P#1) Obediência às leis e aos princípios do FSC, (P#2) Direitos e responsabilidade de posse e uso, (P#3) Direitos dos povos indígenas, (P#4) Relações comunitárias e direitos dos trabalhadores, (P#5) Benefícios da floresta, (P#6) Impacto ambiental; (P#7) Plano de manejo, (P#8) Monitoramento e avaliação, (P#9) Manutenção de florestas de alto valor de conservação e (P#10) Plantações de árvores. Com o objetivo de firmar padrões locais específicos para florestas plantadas e florestas naturais de terra firme na Amazônia, foi criado, em 1996, o grupo de trabalho – FSC Brasil.

² Normas para o Manejo Florestal FSC

Para que ocorra o íntegro cumprimento dos padrões acima, o processo de certificação florestal foi dividido em várias etapas tornando o processo lícito e idôneo. Na *Auditoria de Campo*, uma das etapas mais importantes, são solicitadas informações e documentos relacionados a operação florestal, com o objetivo de conhecer a operação e identificar os principais pontos a serem avaliados em campo. Na avaliação de campo, propriamente dita, são realizadas visitas às áreas florestais e aos escritórios da empresa/comunidade, com o objetivo de conferir a performance da operação florestal. Previamente a checagem das operações, é realizada uma amostragem das áreas a serem avaliadas, considerando os diferentes tipos florestais, sistemas e complexidade do manejo. Outra etapa importante do processo, é a assinatura do *Contrato de Certificação*. Nesta fase, a empresa/comunidade certificada, assina um contrato de 5 anos de validade da certificação, se comprometendo a zelar pelo íntegro desempenho das operações de manejo florestal, respeitando os Princípios e Critérios do FSC. Além disso, a empresa/comunidade autoriza as auditorias anuais de monitoramento e a liberdade de acesso, quando julgar necessário, do certificador à área, para verificação da manutenção da certificação.

Durante o processo de monitoramento anual podem ser detectados falhas no sistema de manejo. Neste caso é emitida uma ação corretiva (*Corrected Action Requested – CAR*), devendo ser cumprida dentro de um prazo estabelecido. Se no monitoramento do ano seguinte a empresa/comunidade não cumprir as requisições da ação corretiva, a mesma pode ter o selo cancelado.

3.3 MONITORAMENTO POR SATÉLITE DA ATIVIDADE MADEIREIRA

3.3.1 Aplicação de Sensoriamento Remoto

Nos últimos anos vários estudos foram conduzidos para detectar a exploração madeireira utilizando imagens de satélite. As técnicas aplicadas vão desde do uso de métodos manuais até métodos automáticos avançados. O método manual empregado, foi a interpretação visual de pátios de estocagem e estradas através de imagens LANDSAT TM (bandas 4 e 5) na região de Paragominas - PA (Watrín & Rocha, 1992). Krug (2000) e Matricardi et al (2001) também utilizaram a interpretação visual das imagens LANDSAT, composição colorida (R=5, G=4, B=3) para detectar a exploração madeireira em toda a Amazônia. Entretanto, este método apresenta algumas desvantagens como: o processo é lento para extrair informações de áreas extensas, limitação pela capacidade visual humana para discernir feições sutis da exploração e viés do analista na interpretação das imagens (Souza Jr et al, 2003b).

Dentre os métodos automáticos, Stone & Lefebvre (1998) testaram o uso de classificadores estatísticos e de mínima distância. A desvantagem deste método é a baixa acurácia dos resultados devido a ambigüidade espectral entre floresta explorada e não explorada. Janeczek (1999) testou o método automático de análise de textura para banda 5 do LANDSAT TM para detectar pátios e estradas, além de aplicar o raio de entorno de 180 metros proposto por Souza Jr. & Barreto (2000) para estimar a área afetada. Entretanto, este raio foi aplicado para toda a bacia amazônica, não considerando as características específicas dos pólos madeireiros, como: tipo de floresta e intensidade de exploração.

Modelo de mistura espectral tem sido um método automático promissor para detectar feições e impactos da exploração madeireira nas florestas da Amazônia. Esta técnica permite

realçar nas imagens de satélite, pátios e estradas (Souza Jr. & Barreto, 2000; Santos et al, 2002; Monteiro et al, 2003), além de estimar a área afetada e níveis de degradação florestal pela exploração (Qi et al, 2002; Souza Jr. et al, 2003a; Asner et al, 2003). Imagens de abundância, geradas por modelo de mistura espectral, têm sido usadas como dados de entrada na aplicação de outros métodos automáticos para estimar a área afetada pela exploração madeireira (Silva et al, 2003; Graça et al, 2005).

A identificação e medição de feições da exploração madeireira são extremamente importantes para se quantificar e qualificar os indicadores de manejo florestal. Brandão Jr. & Souza Jr. (2005) utilizaram imagens LANDSAT ETM+ para identificar e extrair estradas madeireiras em exploração manejada e convencional na região de Paragominas - PA. Rowe et al (1999) utilizou fotografias aéreas em pequeno formato para medir o comprimento de estradas madeireiras de maneira a quantificar áreas de solos expostas potenciais a erosão.

Sensores orbitais com diferentes resoluções espaciais possuem potencial para extrair feições da exploração madeireira com diferentes níveis de detalhe. A medida que a resolução espacial torna-se mais fina, tem-se ganho de informação nas imagens de satélite. Imagens como SPOT e LANDSAT, com resoluções espaciais de 20 e 30 metros respectivamente, são adequadas para detectar feições da exploração como: estradas maiores (principais e secundárias) e pátios de estocagem (Souza Jr. & Barreto, 2000; Monteiro et al, 2003; Souza Jr et al, 2003a). Enquanto que imagem IKONOS, com resolução espacial de 1 a 4 metros, possuem o potencial para detectar além de estradas maiores e pátios, feições mais finas da exploração como: estradas menores (ramais de arraste), clareiras simples e múltiplas (Souza Jr & Roberts, 2005; Read et al, 2003). A detecção e o monitoramento da exploração madeireira com imagens de satélite não depende apenas da obtenção de imagens

livres de nuvens, mas também das resoluções espectral e espacial, da geometria de observação e da sazonalidade da vegetação (de Wasseige & Defourny, 2004).

Outro método com potencial para o monitoramento é a segmentação multi-resolução e classificação orientada a objeto. Esta técnica foi desenvolvida para suprir as limitações das técnicas tradicionais de classificação de imagens, baseadas em métodos de classificação por pixel. A classificação orientada a objeto não considera apenas a informação espectral, mas também informação espacial e contextual dos objetos, determinados através de padrões locais na imagem por um grupo de pixels vizinhos. O método utilizado é a segmentação por crescimento de região e baseada em conhecimento espectral e espacial dos objetos. O algoritmo é baseado na idéia conceitual que a importante informação semântica requerida para interpretar uma imagem não é representada por simples pixels, mas em significantes imagens objeto e suas relações mútuas. A técnica por crescimento de regiões inicia com um pixel objeto e a partir deste, outros pixels são agrupados em objetos maiores. O crescimento é baseado nos critérios de homogeneidade descrito pela similaridade das imagens objeto em termos de tamanho, distância, textura, similaridade espectral e/ou forma (Van der Sande et al, 2002).

Os objetos ou regiões criados na segmentação possuem relações hierárquicas entre si, onde os mesmos podem ser definidos não somente pelas características espectral, de forma ou textura, mas também pelas relações de vizinhança com sub e super objetos (Benz et al, 2004). Esta dependência mútua entre objetos ou classes é definida como uma rede semântica espacial. A classificação orientada a objeto baseia-se em classificadores *fuzzy*, os quais incorporam medições imprecisas do sensor, descrições indefinidas da classe e modelagem imprecisa de uma análise (Benz et al, 2004).

A classificação orientada a objeto vem sendo utilizada com sucesso na detecção de estradas urbanas (Hofmann, 2001) e na geração de mapas para auxiliar no monitoramento dos recursos naturais, como: mapeamento de cobertura da terra para ajudar na avaliação de risco e danos da inundação (Van der Sande et al, 2002), identificação de ambiente ciliar para gerar mapas de vegetação capazes de direcionar estratégias de manejo para preservação das florestas ao longo dos rios (Antunes, 2003) e no mapeamento da bacia hidrográfica para auxiliar no monitoramento ambiental (Rolim, 2003). A técnica de segmentação e classificação orientada a objeto pode ajudar na identificação automática de feições da exploração em imagens de média resolução (LANDSAT e ASTER) e de alta resolução (IKONOS), possibilitando quantificar os impactos causados pela atividade madeireira.

3.3.2 Aplicação de Geoprocessamento

O IBAMA desenvolveu o Sistema Integrado de Licenciamento e Controle dos Recursos e Produtos Florestais (SISPROF), também conhecido como Programa de Monitoramento e Controle de Produtos Florestais, com o objetivo de controlar a origem, o uso, o fluxo, a qualidade e a quantidade dos recursos florestais, situando as pessoas e entidades com eles envolvidos. Este sistema está dividido em três partes: o Geoprocessamento, o Banco de Dados e a Validação dos Dados (IBAMA, 2001).

O Geoprocessamento pode ser usado para criar um banco de dados geográficos dos planos de manejo e das propriedades onde estes estão localizados. Esta técnica possibilita realizar o cruzamento de dados dos documentos de cartórios, das declarações dos interessados, das imagens de satélite e das vistorias técnicas de campo. Em suma, o geoprocessamento utiliza dados obtidos do satélite e do campo, permitindo inferir a localização, o dimensionamento e a cobertura das áreas sob manejo.

O banco de dados pode reunir, processar, controlar e disponibilizar as informações físicas, biológicas e sociais (qualitativas e quantitativas) relacionadas às atividades que exploram e utilizam os recursos florestais. O Banco de Dados possui controle e monitoramento absoluto, permitindo a obtenção de informação em tempo real do que está sendo autorizado ou inserido no sistema, além de identificar quem operou, qual máquina e quando o sistema foi acessado.

A Validação dos Dados refere-se à difusão das regras ou legislação pertinente, os cursos de atualização dos profissionais envolvidos, a preparação dos novos profissionais (vínculos com as Universidades e a criação de residência florestal), a aproximação com os órgãos estaduais de meio ambiente, o desenvolvimento da metodologia das vistorias, a definição e a aplicação de verificadores e indicadores de qualidade, o desenvolvimento de estratégias de atuação para otimizar recursos humanos e materiais das vistorias, entre outros.

A utilização de banco de dados em Geoprocessamento também pode ser feita para monitorar e licenciar áreas de exploração madeireira (Souza Jr & Barreto, 2001). Este banco de dados pode informar a localização e o plano de uso da área a ser explorada. O sistema consiste na utilização integrada de imagens de satélite, Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Sistema de Posicionamento Global (GPS), capaz de informar se uma determinada área explorada estava licenciada ou não.

Outra aplicação potencial do Geoprocessamento é no monitoramento de Áreas de Preservação Permanente (APPs). Firestone & Souza Jr. (2002), aplicaram esta técnica para gerar mapas de violação de APPs na região de Paragominas - PA. Os mapas de violação podem ser gerados com acurácia de 88,6%, mostrando a eficiência deste método para o monitoramento de APPs.

3.4 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA AMAZÔNIA EM OPERAÇÃO

O uso de imagens de satélite tornou-se um dos dados mais eficientes e promissores no monitoramento do meio ambiente devido a vantagem de reunir informações sobre extensas áreas com alta resolução espacial, espectral e temporal (Verstraete et al., 1996). Atualmente, há vários programas de monitoramento na Amazônia que utilizam imagens de satélite, os quais são descritos abaixo:

3.4.1 Desflorestamento

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através do Prodes (Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia) vem realizando o monitoramento do desflorestamento desde 1974, utilizando técnicas de interpretação visual de imagens de satélite LANDSAT TM/ETM⁺. O método permite identificar alterações na cobertura florestal a partir de 6,25 hectares, utilizando imagens na escala 1:250.000, além de fornecer estimativas da extensão e taxa média do desflorestamento bruto. Desde 2003, o Inpe vem aplicando um método automático (PRODES DIGITAL), que substituiu o método manual, na identificação e estimativa de áreas desflorestadas na Amazônia. Esta técnica prevê o uso de modelo linear de mistura espectral, de segmentação de imagens por crescimento de regiões e de classificação não supervisionada por regiões (INPE, 2004a).

Recentemente entraram em operação dois sistemas de monitoramento em tempo real do desflorestamento da Amazônia. O primeiro coordenado pelo INPE, é denominado de DETER (Sistema de Detecção de Desflorestamento). O segundo coordenado pelo SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) - braço civil do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia) em parceria com a UFG (Universidade Federal de Goiás) é denominado de SIAD (Sistema Integrado de Alerta de Desflorestamento). Este último além de detectar o

desflorestamento, gera um atlas com as causas socioeconômicas do mesmo. Ambos sistemas utilizam imagens do sensor MODIS instalados nos satélites AQUA e TERRA. O DETER conta ainda com imagens do CBERS (Satélite Sino-Brasileiro). O DETER e o SIAD pretendem disponibilizar os dados para consulta pública via internet.

A MSU (*Michigan State University*) através da BRSI (*Basic Science and Remote Sensing Initiative*) vem utilizando imagens do satélite LANDSAT MSS e TM desde 1970 para monitorar mudanças na cobertura e no uso da terra nos trópicos úmidos. O método consiste em observações diretas da mudança na paisagem usando imagens de satélite na escala global e regional. A análise consiste em um método híbrido baseado no processamento digital das imagens e interpretação visual de imagens analógicas coloridas. A imagem georeferenciada e classificada é convertida do formato matricial (*raster*) para vetor e interpretada visualmente, usando SIG. Os resultados são registrados para um sistema de quadrícula, facilitando a manipulação e análise dos dados. Os mapas de mudanças na cobertura e no uso da terra são obtidos sobrepondo os resultados da interpretação de cada época em uma base, quadrícula por quadrícula (BRSI, 2004).

Desde 1999, um método semi-automático vem sendo usado para monitorar o desflorestamento anual no Estado do Acre. O método consiste na aplicação do classificador automático ISODATA e posterior interpretação visual para refinar os resultados da classificação (Imazon, 2001).

A Fundação Estadual do Meio Ambiente do Mato Grosso (FEMA – MT) vem realizando desde 1999 um sistema para licenciar e monitorar o desflorestamento no estado do Mato Grosso através de imagens de satélite, GPS e SIG. Este sistema permite sobrepor as linhas de propriedades nas imagens de satélite, permitindo identificar se a propriedade licenciada está de acordo com as normas ambientais quanto ao respeito às Áreas de

Preservação Permanente (APPs) e à Reserva Legal. Além disso, mapas de desflorestamento, no formato digital, são obtidos anualmente e usados no monitoramento das mudanças na cobertura vegetal (Barreto & Souza Jr, 2001).

O método de licenciamento do desflorestamento utilizado pela FEMA possui grande potencial de adaptação para o licenciamento dos planos de manejo florestal aprovados pelo IBAMA. Desta forma, seria possível saber se uma área autorizada para a exploração de madeira em um determinado ano, encontra-se explorada seletivamente ou até mesmo desflorestada. Além de possibilitar a avaliação do respeito as APPs e a Unidade de Produção Anual (UPA).

3.4.2 Queimada

O INPE em parceria com o IBAMA/Proarco desde 1998 vem monitorando as queimadas na Amazônia. O método consiste na detecção de focos de calor através de imagens do satélite NOAA (quatro vezes ao dia). Desde setembro de 2002 as queimadas passaram a ser detectadas também pelos satélites GOES-8 (oito vezes ao dia) e AQUA/TERRA (quatro vezes ao dia com imagens MODIS), totalizando 16 detecções por dia.

A metodologia permite integrar informações obtidas de imagens de satélite com SIG, tornando as ações de prevenção e combate a queimadas mais eficientes através da geração de: mapas de risco de incêndios (construídos a partir de um modelo que sobrepõe dados sobre usos agrícolas do solo, anomalia de chuva, temperatura e umidade do ar e tipo de vegetação); mapas de previsão de incêndio e sistema de alerta; e mapas diários de focos de calor (sobreposição de base cartográfica a mapas de vegetação e imagens LANDSAT TM/ETM+). As informações dos focos de calor detectados pelos satélites em toda a região

amazônica são disponibilizadas para consulta pública via internet. O combate às queimadas através do monitoramento em tempo real por satélite tem mostrado resultados positivos. O número de focos de calor detectados no mês de agosto de 2004 foi 8% e 38% a menos para o mesmo período em 2001 e 2002 respectivamente (INPE, 2004b).

O sistema de detecção de queimadas tem grande potencial de uso no monitoramento dos planos de manejo florestal. Através deste método seria possível identificar áreas de riscos de incêndios florestais como áreas de pastagem, constantemente submetidas ao fogo, adjacentes a áreas sob exploração de madeira. Com isso, seria possível alertar os proprietários destas áreas para a construção de barreiras contra o fogo, como a construção de aceiros (caminho ou picadão aberto na floresta para evitar a propagação do fogo).

3.4.3 Exploração Madeireira

O monitoramento da atividade madeireira é feito pelo IBAMA através de vistorias anuais em campo dos PMFS. Não existe ainda um programa em operação para monitorar a exploração madeireira utilizando imagens de satélite. Entretanto vários estudos foram feitos para estimar a área anual afetada pela exploração madeireira na Amazônia.

Nepstad et al. (1999) estimou, através de entrevistas de campo, uma área afetada pela exploração madeireira variando entre 10.000 – 15.000 quilômetros quadrados por ano. Outro estudo, através de interpretação visual de 229 imagens LANDSAT TM na escala 1:250.000 para um período de 11 anos, estimou a área afetada em 1.561 quilômetros quadrados por ano (Krug, 2000). Matricardi et al. (2001) utilizou um método semi-automático: análise automática + interpretação visual para mapear e quantificar a área afetada pela exploração madeireira nos anos 1992, 1996 e 1999. A área afetada em 1992 foi de 5.627 quilômetros

quadrados. Entre 1992 e 1996 aumentou para 9.449 quilômetros quadrados e entre 1996-1999 para 23.379 quilômetros quadrados.

3.4.4 Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM)

Com o objetivo de implementar uma infra-estrutura de levantamento e análise de dados que gere informações capazes de auxiliar na proteção e desenvolvimento sustentável da região amazônica, o Governo Brasileiro criou o Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM). O sistema possui uma infra-estrutura comum e integrada de meios técnicos para adquirir e tratar os dados, visualizar e difundir imagens, mapas e previsões.

O SIVAM foi estabelecido na Amazônia em três Centros Regionais de Vigilância (CRV), interligados funcionalmente e operacionalmente entre si, localizados em Belém, Manaus e Porto Velho; e vários Órgãos Remotos responsáveis pela coleta e envio de informações ao CRV. Os CRVs são coordenados pelo Centro de Coordenação Geral (CCG), localizado em Brasília, que agrupa e processa os dados enviados dos centros regionais. Os participantes do projeto são todos os Ministérios (incluindo os seus representantes locais) e os estados e municípios amazônicos. O SIVAM está integrado ao SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia), que é o braço civil do SIVAM.

O SIPAM utiliza sensores e estações receptoras para satélites meteorológicos e formadores de imagens, radares de controle do tráfego aéreo principal e secundário, radares meteorológicos, estações meteorológicas terrestres e espaciais (balões), plataformas para coleta dos dados ambientais, auxílios à navegação aérea, equipamentos para interceptar e localizar sinais eletromagnéticos; comunicações telefônicas e via rádio, fax, modem; aeronaves com radares de vigilância e de abertura sintética, e capacidade para captação de imagens espectrais e infravermelhas.

O SIVAM permite identificar o desflorestamento, atividades ilegais (mineração do ouro, exploração madeireira predatória, incêndios florestais e contrabando de drogas), conflitos de terra entre índios e colonos; monitorar a navegação fluvial; vigiar e controlar as fronteiras, o tráfego aéreo, o uso e ocupação de terras; contribuir para o zoneamento ecológico e econômico, a proteção ambiental, proteção das populações indígenas, atualização de mapas e prevenção de epidemias (SIVAM, 2004).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREAS DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida em áreas de exploração convencional (EC) e exploração manejada (EM), localizadas na região de Paragominas - PA e de Sinop - MT (Figura 1). A escolha das áreas foi baseada nos diferentes tipos de floresta e intensidade de exploração (Tabela 1).

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS DE ESTUDO

ÁREAS DE ESTUDO	UF	TIPO DE FLORESTA	INTENSIDADE DE EXPLORAÇÃO (m ³ /ha)	TOPOGRAFIA	TIPO DE EXPLORAÇÃO	ÁREA (ha)
Paragominas	PA	Ombrófila densa – terra firme	32	Plana a levemente ondulada	Manejada	238
			33		Convencional	1.749
Sinop	MT	Transição – terra firme	35	Plana a levemente ondulada	Manejada	426
			34		Convencional	2.000

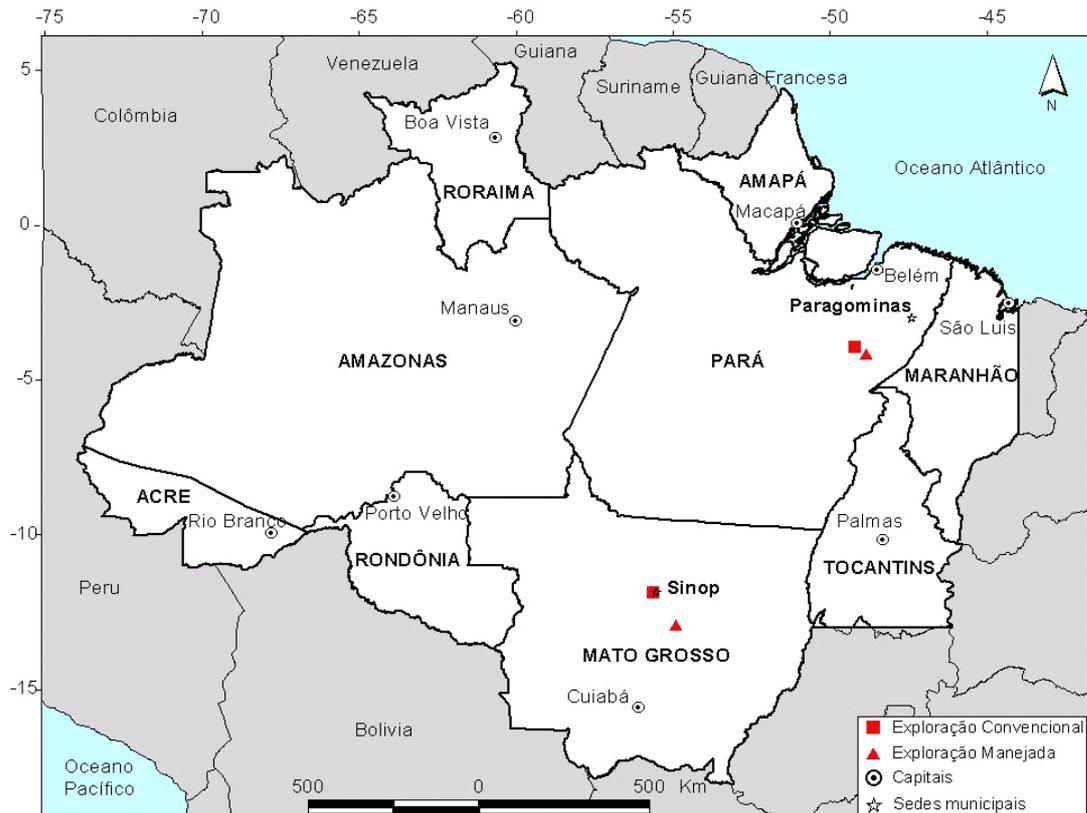


FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

4.1.1 Paragominas

Este sítio é coberto por floresta tropical densa de terra firme, em terreno plano a suavemente ondulado, com altitude média de 200 metros em relação ao nível do mar. Encontra-se no Domínio Morfoestrutural de um Planalto Residual Terciário. Os solos são do tipo Latossolo Amarelo e Argiloso, também encontrados Plintossolos, Gleissolos e Neossolos. O clima caracteriza-se por uma estação seca no período de maio a outubro e chuvosa de novembro a abril, com média anual pluviométrica variando entre 1800 a 2000 mm. O clima é do tipo AM de acordo com a classificação Köppen, com temperatura anual variando entre 24° a 26° C (Cikel, 2001). A área de estudo da exploração manejada cobriu uma área de 238 ha e da exploração convencional uma área de 1.749 ha.

4.1.2 Sinop

Este sítio é coberto por floresta tropical de transição (entre cerrado e floresta ombrófila aberta), também conhecida como Área de Tensão Ecológica, com predominância de Floresta Estacional Semidecidual, sobre relevo plano a suavemente ondulado. Predominam os solos do tipo Vermelho-Amarelo, bem drenados. O clima é tropical quente úmido, com quatro meses de estação seca (maio a agosto) e a pluviosidade média anual fica em torno de 2000 mm. A temperatura anual varia de 15° a 35° C (RadamBrasil, 1981). A área de estudo da exploração manejada cobriu uma área de 426 ha e da exploração convencional uma área de 2.000 ha.

4.2 BASE DE DADOS

4.2.1 Imagens de Satélite

Foram utilizadas imagens de sensores orbitais com diferentes resoluções espaciais. Os dados orbitais consistem de imagens dos sensores LANDSAT TM/ETM⁺ (30 metros) adquiridas através do TRFIC (*Tropical Forest Information Center*) e do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), ASTER (15 metros) e IKONOS II MS (4 metros) e PSM (1 metro) através da base de dados do LBA (Experimento de Larga Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia; Tabela 2). As especificações técnicas das imagens encontram-se no Anexo 1.

TABELA 2 - BASE DE DADOS DAS IMAGENS DE SATÉLITE

ÁREA DE ESTUDO	DATA DE AQUISIÇÃO (DIA/MÊS/ANO)		
	LANDSAT	ASTER	IKONOS
Paragominas - PA	223/62	04/09/2001	07/09/2002**
			16/07/2003*
			15/05/2004*
Sinop - MT	226/68	23/05/2002	10/07/2002**
			06/08/2003*
			05/06/2004*

*TM (*Thematic Mapper*)

**ETM⁺ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*)

As imagens LANDSAT foram usadas na identificação e quantificação de feições (pátios de estocagem e estradas) da exploração madeireira e nas análises do impacto pela exploração no dossel, do respeito às Áreas de Preservação Permanente (APPs) e exploração na Unidade de Produção Anual (UPA), e da proteção florestal contra incêndios. As imagens ASTER e IKONOS possibilitaram identificar e quantificar mais detalhes de pátios e estradas da exploração madeireira.

As condições de precipitação nas áreas estudadas não afetaram as análises multi-sensores e multitemporal das imagens LANDSAT pelo fato das imagens terem sido adquiridas na estação seca das regiões de Paragominas (maio a outubro) e Sinop (maio a agosto).

4.2.2 Inventários Florestais

Dados de inventários florestais, fornecidos pelas empresas madeireiras, foram utilizados para relacionar com os resultados obtidos no campo e nas imagens. Foram usadas informações da densidade de árvores exploradas, do volume total explorado e da densidade de pátios de estocagem e estradas de cada Unidade de Trabalho (UT).

4.2.3 Mapas Temáticos

Através das bases cartográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), mapas digitais de vegetação na escala 1:250.000, foram usados para auxiliar na caracterização da cobertura vegetal e mapas de rede de drenagem, na escala 1:250.000, para determinar as Áreas de Preservação Permanente (APPs) utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG) (IBGE, 2003).

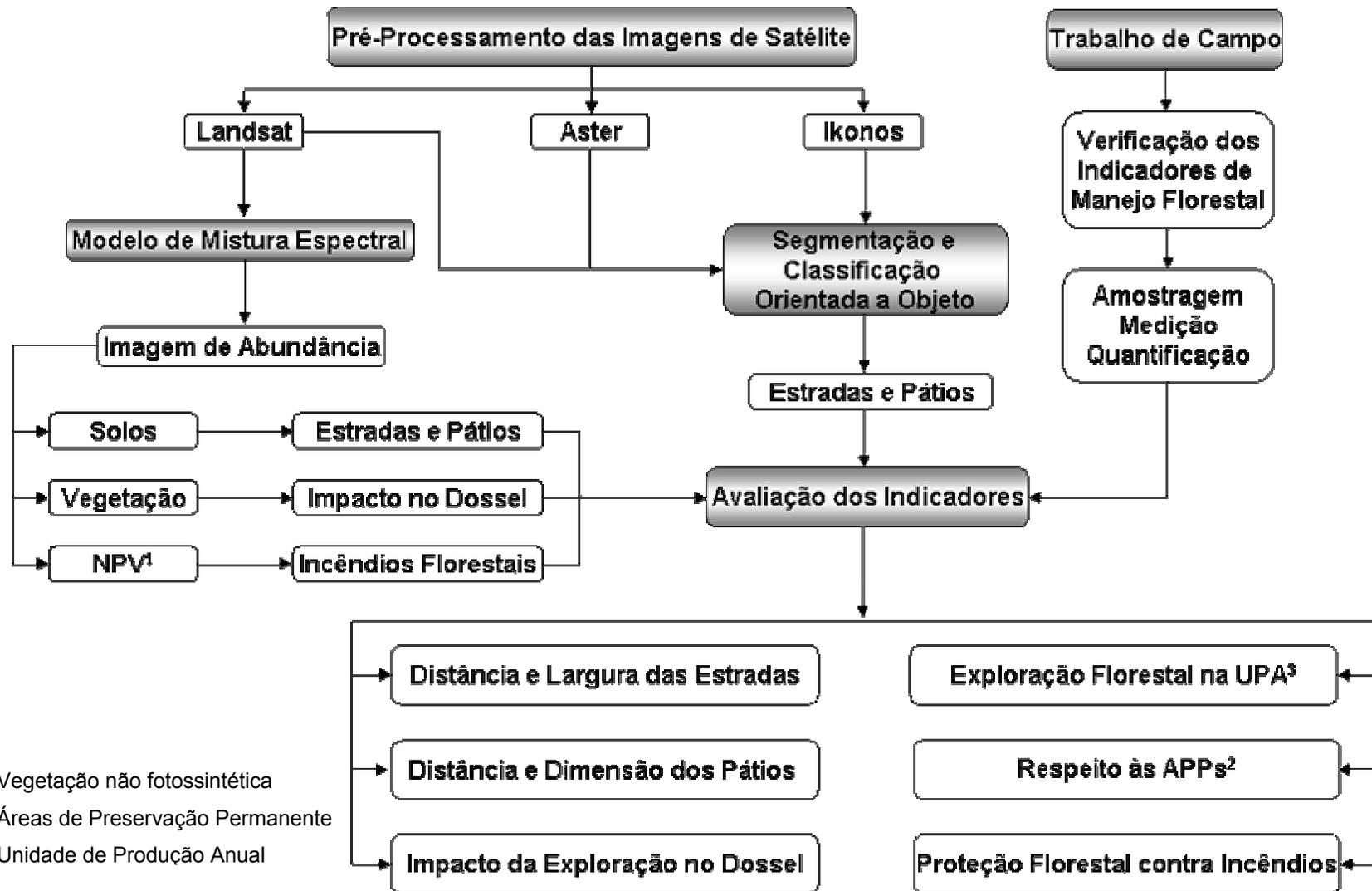
4.2.4 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Foram utilizados modelos digitais de elevação obtidos por imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizadas gratuitamente com resolução horizontal de 90 metros e vertical de 6 metros (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/southAmerica/>) para extrair informações sobre a rede de drenagem, quando não se dispôs desta informação digital. A rede de drenagem foi digitalizada diretamente nas imagens através do monitor do computador.

4.3 METODOLOGIA

A metodologia do estudo foi dividida em etapas e encontra-se resumida em um fluxograma (Figura 2). Na primeira etapa foi aplicado o pré-processamento das imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS. Em seguida, foi aplicado o processamento de modelo de mistura espectral na imagem LANDSAT para obtenção das imagens de abundância de solos, vegetação e NPV (vegetação não fotossintética) e posterior extração de informações destas imagens. Na terceira etapa, foram aplicadas a segmentação e classificação orientada a objeto nas imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS para obtenção de estradas e pátios de estocagem. Na etapa seguinte foram utilizadas informações da verificação dos indicadores de manejo florestal obtidos em trabalhos de campo. Finalizando, foi feita a avaliação dos indicadores relacionando as informações obtidas nas imagens com as obtidas no campo.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA



4.3.1 Processamento das Imagens de Satélite

4.3.1.1 Pré-Processamento

A imagem LANDSAT de 2002 foi georeferenciada, pelo método de reamostragem do vizinho mais próximo, com pontos de controle disponíveis em mapa e com pontos adquiridos por GPS no campo, utilizando o programa ENVI[®] (*Environment for Visualizing Images*) 4.0. A licença deste programa pertence ao laboratório de geoprocessamento do Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON). A correção geométrica das demais imagens LANDSAT foi feita com base na imagem referência (LANDSAT de 2002).

As imagens ASTER e IKONOS foram adquiridas, através do USGS (Serviço de Levantamento Geológico Americano) e da *Space Imaging*^{TM/SM} respectivamente, ortoretificadas pelo método do interpolador bicúbico e com calibração radiométrica. Os *subsets* das imagens ASTER e IKONOS, cobrindo as áreas de estudo, foram retificados com pontos derivados da imagem LANDSAT através do método de reamostragem do vizinho mais próximo. Um erro RMS (*Root Mean Square*) menor que um pixel foi assumido no registro das imagens para ser considerado aceitável (Richards, 1993).

Quando necessário foi aplicado o algoritmo de correção de neblina e fumaça (*haze correction*), nas imagens LANDSAT, desenvolvido em IDL[®] (*Interactive Data Language*) para minimizar os efeitos ocasionados por neblina e fumaça (Carlotto, 1999). Foi aplicada a fusão da imagem IKONOS das bandas multi-espectrais (vermelho, verde e infra-vermelho próximo), de 4 metros de resolução espacial, com a banda pancromática, de 1 metro de resolução espacial, gerando uma imagem multi-espectral com 1 metro de resolução espacial. O processo de fusão foi feito utilizando a técnica de transformação de cores %RGB (*red*,

green, blue) e de reamostragem do vizinho mais próximo, através do algoritmo *EnviMerge* v. 2.04 disponibilizado gratuitamente pela SulSoft (<http://www.sulsoft.com.br>).

As imagens LANDSAT (cena completa) foram submetidas à correção atmosférica e convertidas para reflectância utilizando o programa ACORN[©] (*Analytical Imaging & Geophysics, Boulder, CO*) 4.1, cuja licença pertence ao laboratório de geoprocessamento do IMAZON. Os parâmetros de calibração radiométrica e da geometria de aquisição das imagens foram extraídos dos respectivos meta-arquivos das mesmas. A visibilidade e vapor d'água do modelo de correção atmosférica foram determinados através da análise de sensibilidade de tentativa e erro da reflectância de um objeto escuro (e.g. um rio). Os parâmetros encontrados de visibilidade foram de 40 milímetros e a visibilidade atmosférica da imagem de 25 quilômetros.

Para aplicação da análise temporal, as imagens LANDSAT foram intercalibradas a uma imagem referência através do método de calibração radiométrica relativa (Roberts et al., 1998). O método de calibração radiométrica consiste em determinar alvos terrestres invariantes ao longo do tempo nas imagens (imagem referência e imagem não calibrada) para padronizar radiométricamente as mesmas. Foram utilizadas na análise temporal as imagens referentes aos anos de 2002, 2003 e 2004 para as áreas de Paragominas e Sinop. Foi utilizada uma outra imagem (ano de 2000) como referência por ser a melhor imagem, livre de nuvem e fumaça, de uma série temporal. Nas imagens utilizadas, obtidas entre maio a setembro para Paragominas e entre junho a agosto para Sinop, não foram observadas diferenças de estacionalidade nestas regiões (Tabela 2). Foram selecionados em cada par de imagens (imagem referência e imagem não calibrada), em área de 3 x 3 pixels, alvos invariantes representativos de floresta, vegetação secundária, pasto verde, solo exposto e água, com a mesma localização nos diferentes anos. Em seguida, foi extraído o valor médio

do pixel, dos alvos invariantes, para cada banda para determinar uma regressão linear. Através da regressão linear foram obtidos os coeficientes de inclinação, *intercept* e correlação, os quais foram utilizados para normalizar a imagem não calibrada, convertendo os níveis de cinza (DN) desta imagem para reflectância (Tabela 3). A conversão de níveis de cinza para reflectância foi feita para se estabelecer uma relação direta entre os dados do satélite e o fenômeno biofísico e para remover erros de aquisição dos dados e de ruído da imagem (Coppin & Bauer, 1995).

TABELA 3 - EQUAÇÕES DE INTERCALIBRAÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT

BANDA	2002 para 2000			2003 para 2000			2004 para 2000		
	Inclinação	Intercept	R ²	Inclinação	Intercept	R ²	Inclinação	Intercept	R ²
1	0,08	63,33	0,98	0,05	46,82	0,99	0,06	51,73	0,98
2	0,07	31,75	0,98	0,02	13,92	0,98	0,03	14,10	0,99
3	0,09	26,54	0,99	0,03	11,66	0,99	0,03	12,94	0,99
4	0,02	20,47	0,99	0,02	6,73	0,98	0,02	3,43	0,98
5	0,05	5,17	0,98	0,03	8,98	0,99	0,03	5,58	0,99
7	0,05	6,16	0,99	0,02	1,95	0,99	0,02	3,02	0,99

4.3.1.2 Modelo Linear de Mistura Espectral

Foi aplicado o modelo linear de mistura espectral, utilizando o programa ENVI[®] 4.0, nas imagens LANDSAT de 2002, 2003 e 2004 para extração de pátios de estocagem e estradas e para avaliação do impacto da exploração madeireira no dossel nas áreas de Paragominas e Sinop. Inicialmente, os pixels puros (*endmembers*) foram identificados nestas imagens através do algoritmo de PPI (*Pixel Purity Index*) (Boardman et al, 1995). O resultado deste processamento foi analisado através da seleção dos *endmembers* que melhor representaram os elementos: sombra, solo, vegetação e NPV. Na análise de mistura espectral foram usados os *endmembers* para estimar as abundâncias de sombra, solo, vegetação, NPV e erro RMS. A análise de mistura espectral assume que a superfície da imagem é formada por um pequeno número de materiais distintos que têm propriedades espectrais relativamente constantes (Keshava e Mustard, 2002), tal que:

$$DN_b = \sum F_i DN_{i,b} + \varepsilon_b \quad (\text{Eq. 1})$$

para:

$$\sum F_i = 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

DN_b é o número digital da banda b;

F_i a fração do “endmember” i;

$DN_{i,b}$ o número digital relativo do “endmember” i, na banda b; e

ε_b é o erro na banda b

Extração de Estradas e Pátios de Estocagem

A imagem de abundância de solos, obtidas das imagens LANDSAT de 2002 para Paragominas e Sinop, foi utilizada para detectar pátios de estocagem e estradas. Primeiramente foi criado *subsets* representativo das áreas de estudo. Em seguida, foi gerada uma imagem binária (0 e 1), através da seleção de pixels com abundância de solos maior que 20%, onde pátios e estradas receberam valor igual 1. Para separar os pátios das estradas, foram selecionadas na imagem binária, áreas de 1 a 4 pixels contíguos, os quais foram definidos com pátios (Monteiro et al, 2003). Em seguida, a imagem com os pátios e as estradas foi exportada do formato *raster* para vetorial para posterior análise em SIG dos indicadores relacionados a estas infra-estruturas.

Avaliação do Impacto no Dossel

A imagem de abundância de vegetação, obtidas das imagens LANDSAT de 2002, 2003 e 2004 para Paragominas e Sinop, foi utilizada para determinar o grau do impacto no

dossel pela exploração madeireira. Foram selecionados aleatoriamente três polígonos de 36 ha (400 pixels) nas imagens de abundância de vegetação para as áreas de exploração convencional e manejada. Em seguida, foram extraídos os valores dos pixels de cada um dos polígonos (n = 1200 pixels para cada tipo de exploração) das imagens de abundância de vegetação adquiridas no ano da exploração, um ano antes da exploração (representando a condição de floresta intacta ou primária), e um ano depois da exploração (representando a regeneração). Cada polígono é composto por um mosaico de ambientes (floresta, estradas, ramais de arraste, pátios e clareiras de derrubada de árvores). Para eliminar o efeito de sombra, devido às diferenças de condição de iluminação no momento da aquisição das imagens, a imagem de abundância de vegetação foi normalizada, através da equação abaixo:

$$VEG_{NORMALIZADO} = VEG / (100 - SOMBRA) * 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

VEG é a imagem de abundância de vegetação

SOMBRA é a imagem de abundância de sombra

Finalizando, foram computadas as estatísticas destas informações como média e desvio padrão e aplicado o teste de comparação múltipla de Duncan com taxa de erro de 0,05% para testar diferenças entre os tipos de exploração e diferenças temporais de cada tipo de exploração.

Avaliação da Proteção Florestal contra Incêndios

A identificação de áreas de proteção florestal contra incêndios foi feita através da inspeção direta na imagem de abundância de NPV, identificando áreas de floresta intacta ou de aceiros em torno da floresta explorada. A imagem de abundância de NPV foi utilizada,

para determinação deste indicador, por apresentar alta diferenciação espectral entre floresta intacta, floresta explorada e floresta queimada (Cochrane & Souza Jr., 1998; Souza Jr. et al, 2003a). A identificação de áreas de floresta intacta circundando áreas de floresta explorada caracteriza a presença de proteção florestal contra incêndios do tipo barreira natural. Enquanto que a identificação de áreas de floresta explorada não queimada, adjacente às áreas de pastagem, caracteriza a presença de proteção florestal do tipo aceiro. Finalizando, a identificação de áreas de floresta queimada sucedendo uma floresta explorada, caracteriza ausência de proteção florestal contra incêndios.

4.3.1.3 Segmentação e Classificação Orientada a Objeto

Segmentação Multi-resolução

Foram aplicados a segmentação multi-resolução e a classificação orientada a objeto, disponíveis no programa eCognition[®] 2.1, cuja licença pertence ao laboratório de geoprocessamento do Centro de Ciências Florestais e da Madeira (CIFLOMA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), nas imagens LANDSAT de 2002 e ASTER de 2001 para área de exploração manejada de Paragominas e nas imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS MS (4 m) e IKONOS PSM (1 m) de 2002 para área de exploração convencional de Sinop.

TABELA 4 - BANDAS ESPECTRAIS USADAS NA SEGMENTAÇÃO MULTI-RESOLUÇÃO

IMAGEM	BANDAS ESPECTRAIS (comprimento de onda)
LANDSAT	Verde (0,52-0,60 μ m)
	Vermelho (0,63-0,69 μ m)
	Infra-vermelho próximo (0,76-0,90 μ m)
ASTER	Verde (0,52-0,60 μ m)
	Vermelho (0,63-0,69 μ m)
	Infra-vermelho próximo (0,76-0,90 μ m)
IKONOS	Verde (0,52-0,60 μ m)
	Vermelho (0,63-0,69 μ m)
	Infra-vermelho próximo (0,76-0,90 μ m)
	Pancromática (0,45-0,90 μ m)

Na Tabela 4 são apresentadas as bandas espectrais utilizadas na segmentação multi-resolução das imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS. Na segmentação foram testados vários parâmetros de escala e critérios de homogeneidade, composto pela combinação da cor (valores espectrais) e propriedades de forma (suavização e compactação). Após testar diferentes parâmetros de segmentação, foram aplicados nas imagens os parâmetros que melhor separam os alvos de interesse (pátios e estradas). Os critérios de homogeneidade (cor e forma) foram os mesmos para todas as imagens. Enquanto que o parâmetro de escala variou de acordo com a resolução espacial das imagens, onde imagem de maior resolução espacial foi segmentada com maior parâmetro de escala (Tabela 5).

TABELA 5 - PARÂMETROS DE SEGMENTAÇÃO USADOS PARA AS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS E IKONOS PSM

IMAGEM	ESCALA	COR	FORMA	SUAVIZAÇÃO	COMPACTAÇÃO
LANDSAT	1	0,8	0,2	0,9	0,1
ASTER	2				
IKONOS MS	6				
IKONOS PSM	20				

O parâmetro de escala é o fator mais importante por controlar o tamanho dos objetos. Os critérios de homogeneidade definem a uniformidade dos segmentos (Equação 4). No critério da cor, pode-se definir que porcentagem dos valores espectrais da imagem contribui para o critério de homogeneidade total, permitindo criar objetos significantes (Equação 5). Enquanto que o critério da forma (Equação 6) aumenta a qualidade da extração através da uniformidade dos objetos, utilizando parâmetros de suavização (Equação 7) para otimizar as bordas dos objetos e de compactação para otimizar a compactação dos objetos (Equação 8) (Baatz & Schäpe, 2000).

O critério de homogeneidade, também conhecido como critério de fusão, é descrito em função da característica espectral (cor) e da espacial (forma):

$$f = w.h_{COR} + (1 - w).h_{forma} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

f é o critério de fusão;
 w é o peso dado a variável;
 h_{COR} é a heterogeneidade espectral;
 h_{forma} é a heterogeneidade espacial.

$$h_{COR} = \sum_c w_c \cdot (n_a \cdot \sigma_c - (n_1 \cdot \sigma_1 - n_2 \cdot \sigma_2)) \quad (\text{Eq. 5})$$

onde:

c refere-se às bandas espectrais;
 n é o tamanho do objeto agrupado;
 n_1 e n_2 referem-se aos tamanhos dos objetos;
 σ_1 e σ_2 referem-se aos desvios padrões dos objetos.

$$h_{forma} = w_{CP} \cdot h_{CP} + (1 - w_{CP}) \cdot h_{SV} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde:

w_{CP} é o peso;
 h_{CP} representa a compacidade;
 h_{SV} representa a suavidade.

A compacidade e suavidade são descritas pelas equações 7 e 8:

$$h_{SV} = n_a \cdot (l_a / b_a) - (n_1 \cdot (l_1 / b_2) + n_2 \cdot (l_2 / b_2)) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$h_{CP} = n_a \cdot (l_a / \sqrt{n_a}) - (n_1 \cdot (l_1 / \sqrt{n_1}) + n_2 \cdot (l_2 / \sqrt{n_2})) \quad (\text{Eq. 8})$$

onde:

l_1 e l_2 são os perímetros dos objetos;
 b_1 e b_2 são os perímetros dos quadrados envolventes;
 b_a e l_a referem-se ao objeto fundido.

Classificação

Previamente à aplicação da classificação orientada a objeto foram testados vários descritores do objeto, usando o “visualizador de descritores” (*Feature View*), para encontrar o descritor que melhor separasse os pátios e as estradas. Em seguida foi aplicada a classificação orientada a objeto, usando as funções de pertinência *fuzzy* (*Membership function*) nas imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS. As funções de pertinência usadas foram baseadas no descritor espectral *diferença do valor médio da banda para a cena* e nos descritores espaciais *área* e *assimetria* (Tabela 6).

TABELA 6 - DESCRITORES UTILIZADOS NA CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DAS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS E IKONOS PSM

	DESCRITOR	EXPRESSÃO MATEMÁTICA	DEFINIÇÃO
<i>Spectral</i>	Diferença do valor médio da banda para a cena	$\Delta_{CC} = C_{C, Objeto} - C_{C, Cena}$ onde: $C_{C, Objeto}$ = valor médio do objeto na banda C; $C_{C, Cena}$ = valor médio da banda C de toda a cena.	É a diferença entre o valor médio de uma imagem objeto na banda C e valor médio da banda C de toda a cena.
	Área		A área do objeto corresponde ao número de pixels que o compõe multiplicado pelo tamanho do pixel da imagem.
<i>Forma</i>	Assimetria	$K = 1 - n/m$ onde: n = menor eixo da elipse; m = maior eixo da elipse.	A assimetria é determinada pela razão do menor eixo pelo maior eixo da elipse. Varia de 0 a 1.

4.3.2 Avaliação dos Indicadores em SIG

Foi utilizado SIG, através do software ArcGIS™ 8.2, cuja licença pertence ao laboratório de geoprocessamento do IMAZON, para medir os indicadores de manejo florestal relacionados à distância entre pátios, distância entre estradas, exploração florestal na UPA, respeito às APPs e proteção florestal contra incêndios. Foram utilizados pontos coletados com GPS, no campo, da localização geográfica dos pátios e das estradas. Em SIG, os pátios e as estradas foram plotados e gerados os centróides destes vetores para a

determinação das distâncias entre pátios e entre estradas no campo. Para determinar estas distâncias nas imagens, foram gerados os centróides dos pátios e estradas, obtidas do processamento digital das imagens. Em seguida extraímos as coordenadas de cada centróide e determinamos as distâncias entre pátios e entre estradas através da Distância Euclidiana, dada por:

$$d(1,2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (\text{Eq. 9})$$

onde:

x_1 e x_2 refere-se a localização x_1 e x_2 ;

y_1 e y_2 refere-se a localização y_1 e y_2 ;

A avaliação da exploração na Unidade de Produção Anual (UPA) foi feita sobrepondo o vetor referente à mesma na imagem LANDSAT em composição colorida (R=5; G=4; B=3) e através de interpretação visual no monitor do computador foi possível avaliar se a exploração de madeira ocorreu dentro dos limites da UPA. As Áreas de Preservação Permanentes (APPs) foram definidas com a criação, em SIG, de uma região de entorno “*buffer*” de 30 metros a partir dos rios e avaliadas sobrepondo os vetores referentes as APPs na imagem de abundância de solos, obtidas do modelo de mistura espectral, e posterior interpretação visual, no monitor do computador, do respeito as APPs. A imagem de abundância de solos foi utilizada para avaliar este indicador por realçar solos expostos, o que indica sinais de exploração de madeira, permitindo verificar prováveis violações destas áreas.

4.3.3 Trabalhos de Campo

Trabalhos de campo foram conduzidos de junho a agosto de 2004 para avaliar os indicadores de manejo através de imagens de satélite, bem como conseguir uma estimativa independente de medição destes indicadores. Foram quantificados em campo os indicadores de manejo florestal com potencial para serem avaliados nas imagens para exploração manejada (EM) e exploração convencional (EC) nas regiões de Paragominas - PA e Sinop - MT (Tabela 7; Anexo 2). O sistema de amostragem utilizado foi o da Amostragem Aleatória Simples (AAS), onde cada unidade elementar é sorteada com igual probabilidade, individualmente, sem estratificação, e um único estágio e seleção aleatória (Bolfarine & Bussad, 2000). A seguir será mostrado a descrição dos procedimentos utilizados na verificação dos indicadores de manejo florestal no campo.

- Planejamento e Construção de Estradas e Pátios de Estocagem

Foram selecionadas aleatoriamente 2/3 das estradas da UPA (Paragominas – convencional (4) e manejada (6); Sinop – convencional (6) e manejada (4)) e medida a largura destas estradas em pontos aleatórios com uma trena de 100 metros. A cada ponto medido, foi coletada a coordenada cartográfica com GPS (Garmin[®] 2 Plus) para posterior determinação em SIG da distância entre as estradas. A distância entre estradas e a largura das estradas deveriam obedecer as especificações exigidas pelo critério do indicador.

De forma semelhante, foi medida a dimensão (largura e comprimento) de 2/3 dos pátios de estocagem da UPA (Paragominas – convencional (15) e manejada (34); Sinop – convencional (6) e manejada (28)) e coletada a coordenada cartográfica de cada pátio para determinação em SIG da distância entre os mesmos. A dimensão dos pátios de estocagem deveria respeitar as especificações exigidas pelo critério do indicador.

TABELA 7 - VERIFICAÇÃO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL NO CAMPO

PLANEJAMENTO E CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS E PÁTIOS DE ESTOCAGEM	
INDICADOR CHAVE	CRITÉRIO
1. Distância entre estradas (metro)	1.1. As estradas devem ser planejadas de acordo com a distância ótima (DOE) (Amaral et al, 1998).
2. Largura das estradas (metro)	2.1. As estradas principais devem ter largura do leito carroçável entre 5 e 6 metros.
	2.2. As estradas secundárias devem ter largura do leito carroçável entre 3 a 4 metros.
3. Dimensão do pátio de estocagem (metro) e distância entre pátios (metro)	3.1. As dimensões dos pátios não podem exceder 25 x 20 metros em áreas exploradas de 20 a 30 m ³ /ha (0,75% da área da Unidade de Trabalho).
IMPACTO DA EXPLORAÇÃO NO DOSSEL	
INDICADOR CHAVE	CRITÉRIO
1. Abertura no dossel	1.1. A dimensão da clareira deve ser proporcional a quantidade de árvores extraídas.
EXPLORAÇÃO NA UNIDADE DE PRODUÇÃO ANUAL (UPA)	
INDICADOR CHAVE	CRITÉRIO
1. Delimitação da UPA	1.1. A área explorada deve respeitar os limites da UPA.
2. A exploração deve estar dentro dos limites UPA	
RESPEITO ÀS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APPS)	
INDICADOR CHAVE	CRITÉRIO
1. Localização das APPs	1.1. As APPs devem estar demarcadas.
	1.2. As APPs não podem ser exploradas.
PROTEÇÃO FLORESTAL CONTRA INCÊNDIOS FLORESTAIS	
INDICADOR CHAVE	CRITÉRIO
1. Proteção contra fogo	1.1. Sistemas quebra-fogo (natural ou aceiro) devem ser implementados.
	1.2. Não pode haver ocorrência de fogo na área explorada.

- Impacto da Exploração no Dossel

Para avaliar os impactos no dossel, no campo, foi utilizada uma câmera digital (Nikon Coolpix, 5.4 Mega pixel de resolução), acoplada a uma lente “olho de peixe”. A abertura no dossel foi determinada utilizando o programa Gap Light Analyzer[®] 2.0, cuja licença

pertence ao laboratório de geoprocessamento do IMAZON. Foram coletadas fotos, aproximadamente a 1,5 metros do solo no centro das clareiras abertas na floresta em decorrência da derrubada de árvores e da abertura de estradas, ramais de arraste e pátios de estocagem, para áreas de exploração manejada (Paragominas (34) e Sinop (30)), exploração convencional (Paragominas (30) e Sinop (25)) e de florestas intactas (Paragominas (28) e Sinop (20)) para comparação com as áreas exploradas. Além disso, foram coletadas as coordenadas cartográficas, com GPS, das áreas onde foram feitas as medições.

- Exploração na Unidade de Produção Anual (UPA)

Foram coletadas as coordenadas cartográficas, com GPS, em pontos aleatórios nos limites da UPA e observados se a exploração madeireira ocorreu dentro dos limites da mesma. A determinação dos limites da UPA na exploração manejada pode ser facilmente identificada pela presença de placas de sinalização. Entretanto, esta avaliação não foi possível na exploração convencional devido à falta de sinalização dos limites da UPA.

- Respeito às Áreas de Preservação Permanente (APPs)

Foi observada, em pontos aleatórios das APPs, a ocorrência de irregularidades destas áreas. Quando encontrada, foram coletadas as coordenadas cartográficas da localização desta com GPS, para posterior identificação na imagem, e registrada a irregularidade com fotos. Foi considerada violação da APP, a construção de estradas sem “bueiro” obstruindo o curso natural do rio ou a exploração de madeira dentro dos limites das mesmas.

- Proteção Florestal contra incêndios florestais

Foi observada a implantação de sistema quebra-fogo do tipo: natural (áreas de floresta intacta) ou aceiros (áreas abertas na margem de pastos) em torno da área explorada, para evitar a ocorrência de incêndios florestais. Além disso, foi observada a ocorrência de passagem de fogo na área explorada. Foram coletadas, com GPS, as coordenadas cartográficas da localização do sistema quebra-fogo implementado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Verificação dos Indicadores de Manejo Florestal no Campo

5.1.1 Planejamento e Construção de Estradas e Pátios de Estocagem

O indicador “dimensão dos pátios de estocagem” foi distinto entre as regiões e entre as formas de exploração. Em Paragominas, a dimensão média do pátio na EC foi praticamente o dobro da dimensão na EM. Enquanto que em Sinop esta dimensão foi seis vezes maior na EC em comparação a EM (Tabela 8 e Figura 3). Johns et al (1996) comparando os danos entre EM e EC em Paragominas, encontraram resultados semelhantes a este estudo para área de floresta transformada em pátio (23 m²/árvore extraída na EC e 15 m²/árvore extraída na EM). Comparando este indicador entre regiões, observamos que a dimensão do pátio na EM foi 13% maior em Paragominas em relação a Sinop. Entretanto, ocorreu uma inversão na EC, sendo três vezes maior em Sinop comparado a Paragominas.

A dimensão média do pátio de estocagem na EC, foi 2 e 7 vezes maior em Paragominas e Sinop respectivamente que o padrão⁵ (500 m²) utilizado pelo Instituto Floresta Tropical - IFT (instituição que promove o manejo florestal na Amazônia através de treinamento em manejo de baixo impacto). As discrepantes dimensões dos pátios na EC

ocorrem devido a falta de planejamento, onde o próprio operador do trator determina a área a ser convertida em pátio, não considerando o volume e a quantidade de toras que abastecerá o mesmo (Johns et al, 1996). A dimensão média dos pátios na EM, foi 8% e 25% maior que o padrão em Sinop e Paragominas respectivamente. De acordo com observações feitas no campo, o aumento na dimensão dos pátios na EM foi ocasionado pelo trator carregadeira durante a atividade de empilhamento das toras; uma vez que estes pátios, na EM, são dimensionados previamente de acordo com a quantidade de árvores que os abastecerão.

TABELA 8 - QUANTIFICAÇÃO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL FEITOS NO CAMPO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NAS REGIÕES DE PARAGOMINAS E SINOP

INDICADOR CHAVE	Paragominas		Sinop	
	EM	EC	EM	EC
Dimensão dos pátios de estocagem (m ²)	625 (112)	1.241 (501)	542 (105)	3.381 (629)
Distância entre os pátios de estocagem (m)	260 (74)	301 (263)	373 (83)	512 (45)
Distância entre as estradas secundárias (m)	469 (30)	513 (38)	455 (24)	508 (43)
Largura das estradas principais (m)	4,6 (0,5)	5,0 (0)	3,6 (0,2)	5,3 (0,5)
Largura das estradas secundárias (m)	4,1 (0,4)	4,6 (0,2)	3,5 (0,2)	4,3 (0,7)
Abertura no dossel (%)	17 (5)	30 (7)	24 (4)	28 (5)

Médias apresentadas com desvio padrão (DP) entre parênteses

Outro indicador medido em campo, a distância média entre pátios de estocagem também foi distinta entre as formas de exploração e entre as regiões (Tabela 8). A distância média entre pátios foi 16% maior na EC que na EM em Paragominas. Por outro lado, foi 37% maior na EC que na EM em Sinop. Quando comparamos entre regiões, observamos diferenças maiores. A distância entre os pátios foi 70% maior na EC e 33% maior na EM em Sinop comparado a Paragominas.

A diferença da distância entre pátios tanto na EM como na EC entre as regiões estudadas pode ser explicado pela diferença de densidade média de espécies exploradas em Paragominas (38 m³/ha) e em Sinop (20 m³/ha) (Monteiro et al, 2003). Os resultados

⁵ Padrão baseada nas Diretrizes de Exploração Manejada do Instituto Floresta Tropical (IFT)

mostram que quanto maior a densidade de espécies exploradas, menor é a distância entre os pátios desta região. Estudos de detecção da exploração madeireira utilizando imagens LANDSAT mostraram que o raio médio de alcance da exploração a partir dos pátios foi de 180 metros para Paragominas (Souza Jr. & Barreto, 2000) contra 350 metros para Sinop (Monteiro et al, 2003). Segundo Johns et al (1996), as maiores distâncias entre pátios e estradas são compensadas pela maior área de ramais de arraste, buscando otimizar os custos de arraste e de construção de estradas.



FIGURA 3 - COMPARAÇÃO DA DIMENSÃO DO PÁTIO DE ESTOCAGEM VISTO DO CAMPO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (A; 500 m²) E EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (B; 3.700 m²) NA REGIÃO DE SINOP - MT

O indicador “distância entre estradas secundárias” mostrou baixa variação entre as regiões e entre as formas de exploração (Tabela 8). A distância média entre as estradas secundárias foi 9% e 11% maior na EC que na EM em Paragominas e em Sinop respectivamente. Comparando a distância das estradas secundárias entre regiões, observamos baixas diferenças entre as ECs (1%) e entre EMs (3%). A distância entre estradas secundárias comparada ao padrão utilizado pelo IFT (500 metros) foi menor 6% em Paragominas e 9% em Sinop para EM e 2% a 3% maior em Sinop e Paragominas respectivamente para EC.

No indicador “largura das estradas”, observamos variações de baixa a média nas estradas principais e secundárias entre as formas de exploração e entre as regiões (Tabela 8). A diferença da largura média das estradas principais entre EM e EC foi de 8% em Paragominas e de 32% em Sinop. Por outro lado, a largura média das estradas secundárias entre as EM e EC apresentou diferença de 11% em Paragominas contra 19% em Sinop. Johns et al (1996), encontrou baixa diferença (3%) na largura das estradas secundárias entre EM e EC em Paragominas. Comparando a largura média das estradas principais entre regiões notamos uma diferença de 28% entre EM e de 6% entre EC. Enquanto que a diferença entre regiões para largura média das estradas secundárias foi de 17% entre EMs e 7% entre ECs.

As larguras das estradas principais encontradas para EM foram 23% e 17% menores em Paragominas e Sinop respectivamente, que as utilizadas pela IFT (5-6 metros). Enquanto que as larguras das estradas secundárias neste estudo para EC foram 15% e 7,5% maiores em Paragominas e Sinop respectivamente, que as utilizadas pela IFT (3-4 metros). A principal diferença da largura das estradas entre as formas de exploração, observada no campo, foi a maior entrada de luz nas estradas secundárias da EC devido à derrubada excessiva de árvores nas laterais das estradas (Figura 4). Johns et al (1996), também observaram aberturas mais largas das estradas na EC em Paragominas.



FIGURA 4 - COMPARAÇÃO DA LARGURA DE ESTRADAS SECUNDÁRIAS VISTA DO CAMPO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (A) E EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

5.1.2 Impacto da Exploração no Dossel

O indicador “impacto da exploração no dossel” avaliado pela abertura no mesmo, medido em campo, apresentou diferenças significativas entre as formas de exploração (Teste de Duncan, $p < 0,05$; Tabela 8 e Figuras 5 e 6). A abertura média no dossel, em Paragominas, foi significativamente maior na EM (19%) e na EC (26%) em relação a abertura da floresta intacta. Enquanto que em Sinop, a abertura no dossel foi significativamente maior na EM (22%) e na EC (26%) comparado a abertura da floresta intacta.

A abertura no dossel entre as formas de exploração, foi 13% e 4% significativamente maior na EC em relação a EM em Paragominas e Sinop respectivamente. Johns et al (1996), encontrou dimensões de clareiras duas vezes maior na EC em relação a EM. Van Der Hout (2000), encontrou área de clareira individual 48% maior na EC que na EM com uma intensidade de exploração de 8 árvores/ha em floresta tropical da Guiana. A maior abertura no dossel na EC ocorre devido o trator derrubar muitas árvores durante a manobra para laçar a tora com o estropo (Johns et al, 1996).

Comparando a abertura no dossel entre as regiões, notamos baixas diferenças entre EMs (7%) e entre ECs (2%). A maior abertura no dossel na EC de Paragominas (30%), onde

foram extraídos 33 m³/ha, em relação Sinop (28%), com 34 m³/ha extraídos, pode ser explicada pelo fato dos motosserristas da empresa em Sinop já haverem recebido treinamento em técnicas de corte (comunicação pessoal - gerente florestal da empresa); o que pode ter contribuído para a menor abertura no dossel neste sítio.



FIGURA 5 - EXEMPLOS DE ABERTURAS NO DOSSEL EM CLAREIRAS, TOMADAS COM CÂMERA DIGITAL ACOPLADA A LENTE “OLHO DE PEIXE”, PARA FLORESTA INTACTA (A), EXPLORAÇÃO MANEJADA (B) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (C), NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

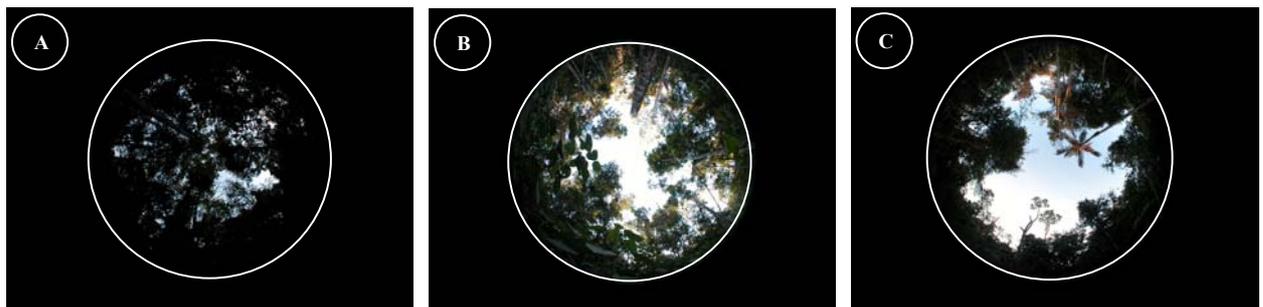


FIGURA 6 - EXEMPLOS DE ABERTURAS NO DOSSEL EM CLAREIRAS, TOMADAS COM CÂMERA DIGITAL ACOPLADA A LENTE “OLHO DE PEIXE”, PARA FLORESTA INTACTA (A), EXPLORAÇÃO MANEJADA (B) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (C), NA REGIÃO DE SINOP - MT

5.1.3 Exploração Florestal na Unidade de Produção Anual (UPA)

A avaliação do indicador “exploração florestal na unidade de produção anual” na fase de campo só pôde ser feita em áreas de exploração manejada, pois nestas áreas existem placas sinalizando os limites da UPA. Entretanto, não foi verificada nenhuma irregularidade nas EMs referente a este indicador. A falta de sinalização da UPA nas ECs dificultou identificar os limites da mesma, não sendo possível avaliar este indicador em áreas de EC.

5.1.4 Respeito às Áreas de Preservação Permanentes (APPs)

O indicador “respeito às áreas de preservação permanente” foi verificado no campo em pontos específicos, tais como: cruzamentos de estradas com cursos d’água nas EM e EC de ambos sítios (Paragominas e Sinop). As áreas de EM não apresentaram nenhuma violação das APPs. Entretanto, a área de EC de Paragominas apresentou violações em decorrência da exploração de madeira dentro das APPs e da abertura de estradas obstruindo o leito do rio. As violações das APPs provocaram a morte das árvores existentes nestas áreas e erosão do tipo “Voçoroca” na estrada (Figura 7).



FIGURA 7- VIOLAÇÃO DE APPS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL, ATRAVÉS DA ABERTURA DE ESTRADA, OBSTRUINDO O LEITO DO RIO, E PROVOCANDO A MORTE DE ÁRVORES (A) E EROSÃO DO TIPO “VOÇOROCA” (B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

5.1.5 Proteção Florestal contra Incêndios Florestais

Na verificação do indicador “proteção florestal contra incêndios florestais”, na fase de campo, áreas de floresta intacta foram identificadas circundando áreas de floresta explorada, funcionando como sistema quebra-fogo natural nas EC e EM de ambas regiões. Entretanto, não foram encontradas áreas de pasto adjacentes às áreas exploradas, o que exigiria a construção de aceiros. Assim sendo, não foi identificada, para o período investigado, nenhuma ocorrência de fogo nas áreas estudadas.

5.2 Modelo Linear de Mistura Espectral

A aplicação do modelo linear de mistura espectral possibilitou a geração de imagens de abundância de vegetação, solo e NPV, as quais permitiram quantificar a porcentagem de cada um destes componentes presentes no pixel da imagem LANDSAT (Figura 8).

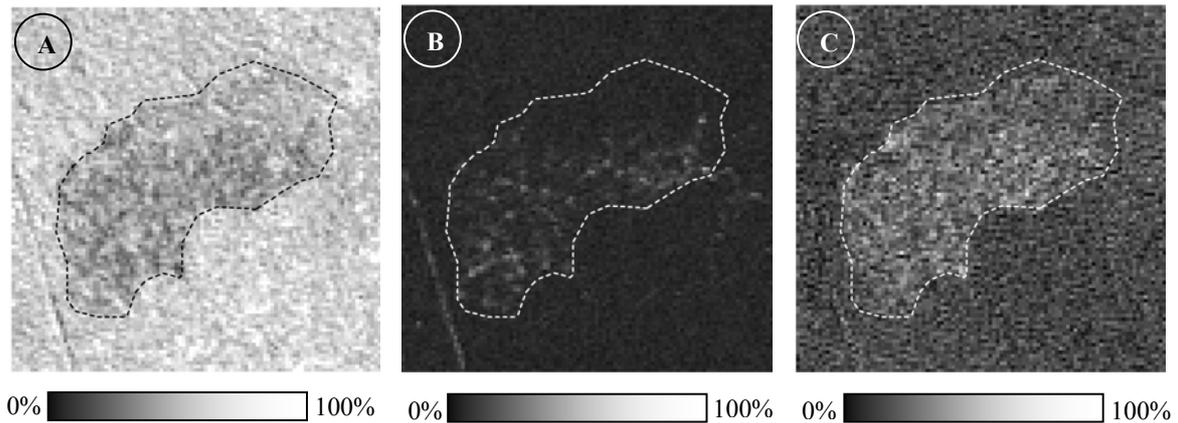


FIGURA 8 - IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO (A), SOLO (B) E NPV (C) OBTIDAS A PARTIR DE IMAGEM LANDSAT POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL PARA EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A imagem de abundância de vegetação permitiu avaliar e comparar temporalmente os impactos da exploração de madeira no dossel em áreas de EC e EM (Figura 8A). Por sua vez, a imagem de abundância de solo permitiu extrair estradas e pátios de estocagem para avaliar os indicadores relacionados a estas infra-estruturas (Figura 8B). Por último, a imagem de abundância de NPV possibilitou verificar a ocorrência de fogo nas áreas exploradas (Figura 8C). Os resultados da avaliação dos indicadores de manejo florestal utilizando as imagens de abundância são descritos adiante.

5.3 Segmentação e Classificação Orientada a Objeto

As imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS foram segmentadas em dois níveis. O primeiro nível consistiu de uma segmentação fina com aplicação de parâmetro de escala

para extração de objetos menores (Tabela 5; Figura 9A). O segundo nível consistiu de uma segmentação grosseira obtida através da “segmentação baseada na classificação” para refinar a forma dos objetos da segmentação fina (Figura 9B). A “segmentação baseada na classificação” é um processo de refinamento ou fusão que consiste em agrupar diferentes níveis de segmentação em um único nível de maneira a corrigir a forma dos objetos.

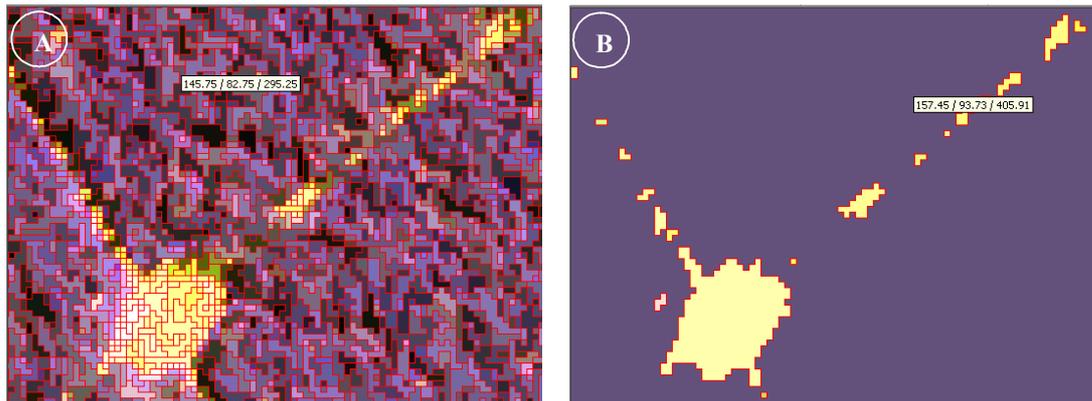


FIGURA 9 - SEGMENTAÇÃO FINA (A) E GROSSEIRA (B) DA IMAGEM IKONOS MS (4 METROS) PARA EXTRAÇÃO DE FLORESTA, ESTRADAS E PÁTIOS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE SINOP - MT

Em seguida, os segmentos foram classificados utilizando funções de pertinência *fuzzy* associados a descritores, onde foram atribuídos limiares baseados em parâmetros específicos (Tabela 9 e Anexo 3). Para definir a classe “floresta” foi utilizado o descritor *diferença do valor médio da banda para a cena*. Neste caso, foi utilizada a banda 3 (0,63-0,69 μ m) da imagem LANDSAT, a banda 2 (0,66-0,7 μ m) da ASTER e a banda 3 (0,63-0,69 μ m) da IKONOS. As bandas da região do vermelho foram utilizadas pela sensibilidade desta em distinguir a classe floresta de não floresta. A classe “não floresta” foi definida utilizando a função inversa da classe floresta: *não floresta*.

Os descritores de forma (*área e assimetria*) foram usados para definir a classe “pátio”, a qual herdou característica da classe “não floresta”. Os valores dos descritores *área* e *assimetria*, usados para definir as classes “pátio”, variaram de acordo com a resolução

espacial da imagem utilizada (Tabela 9). Com conhecimento *a priori* da dimensão média dos pátios foi possível estabelecer a área do objeto pátio. A classe “estrada” foi definida com a função inversa da classe “pátio”: *não pátio*. Quando necessário foi utilizado o descritor *assimetria* para separar a classe estrada de pátio, pois comparada a estrada, o pátio apresentou menor assimetria. (Tabela 9 e Anexo 3).

A classe “nuvem” presente na imagem ASTER foi definida com a função inversa: *não pátio e não estrada*. Os pátios e as estradas obtidos através da segmentação e classificação orientada a objeto foram exportados na forma de vetores para a análise em SIG.

TABELA 9 - DESCRITORES UTILIZADOS PARA DEFINIR AS CLASSES FLORESTA, NÃO FLORESTA, PÁTIO, ESTRADA E NUVEM

CLASSES	DESCRITOR	LANDSAT (30 m)	ASTER (15 m)	IKONOS MS (4 m)	IKONOS PSM (1 m)
Floresta	<i>Espectral</i>	Diferença do valor médio da B3 (0,63-0,69 μ m) para cena	Diferença do valor médio da B2 (0,66-0,7 μ m) para cena	Diferença do valor médio da B3 (0,63-0,69 μ m) para cena	Diferença do valor médio da B3 (0,63-0,69 μ m) para cena
Não Floresta	<i>Função inversa</i>	Não floresta	Não floresta	Não floresta	Não floresta
Pátio	<i>Forma</i> <i>Área</i>	900-7.200 m ²	220-8.775 m ²	2.304-4.496 m ²	1.697-4.300 m ²
	<i>Assimetria</i>	< 0,61	< 0,67	< 0,86	
Estrada	<i>Função inversa</i>	Não pátio	Não pátio	Não pátio	Não pátio
Nuvem			Não pátio e não estrada		

Os resultados da classificação orientada a objeto mostraram que todos os pátios detectados pela imagem ASTER, para a área de EM de Paragominas, também foram detectados pela imagem LANDSAT. O maior número de pátios detectados pela imagem LANDSAT foi devido esta ter sido adquirida aproximadamente um ano após a imagem

ASTER, o que possibilitou registrar mais pátios da exploração ocorrida no ano de 2001. Foi observado que apenas a estrada principal foi detectada nesta área de estudo, não sendo possível a detecção da estrada secundária, indicando que a exploração ocorreu de forma manejada (Figura 10).

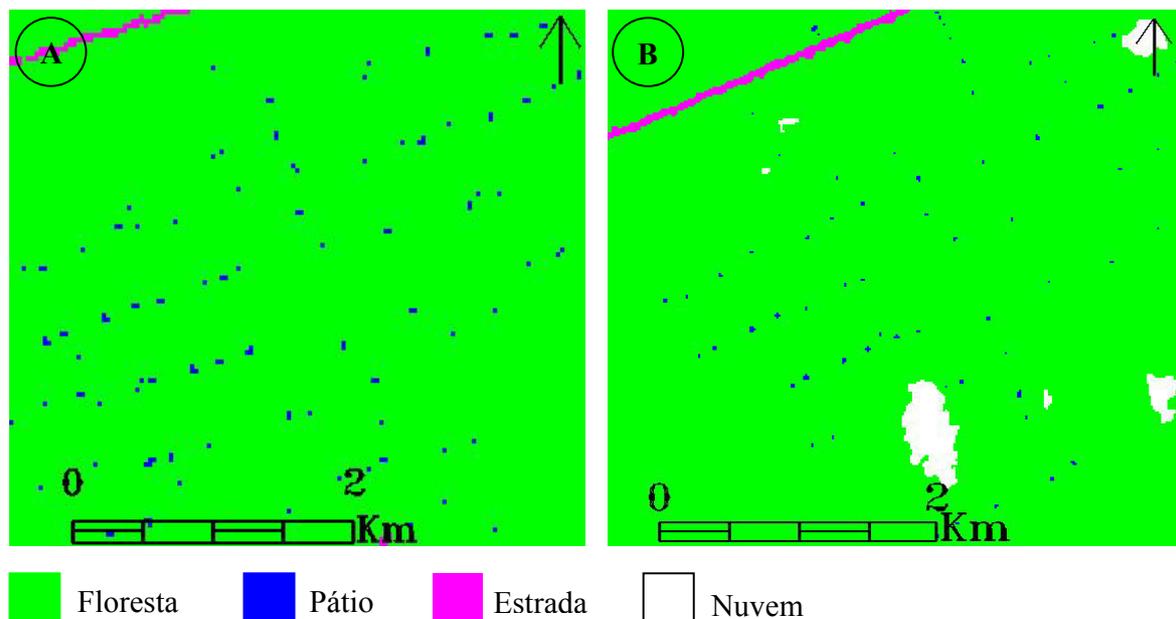


FIGURA 10 - CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA IMAGEM LANDSAT (A) E ASTER (B) PARA EXTRAÇÃO DAS CLASSES FLORESTA, ESTRADAS E PÁTIOS EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A Figura 11 mostra os resultados da classificação orientada a objeto nas imagens LANDSAT, ASTER, IKONOS MS e IKONOS PSM, para a área de EC de Sinop. Foi observado um ganho de informação sobre os pátios e as estradas à medida que a resolução espacial das imagens tornou-se maior. Na imagem LANDSAT foram detectados os pátios e as estradas (em trechos mais largos). Na imagem ASTER foram detectados, com mais detalhes, os mesmos pátios e as mesmas estradas observadas na imagem da figura 11A. Nas imagens IKONOS MS e IKONOS PSM foi possível detectar, com mais detalhes, os pátios e as estradas, possibilitando quantificar a dimensão e a largura destas infra-estruturas

respectivamente. Nesta área de estudo, foi possível detectar tanto a estrada principal como as estradas secundárias, comprovando a falta de planejamento da construção das mesmas.

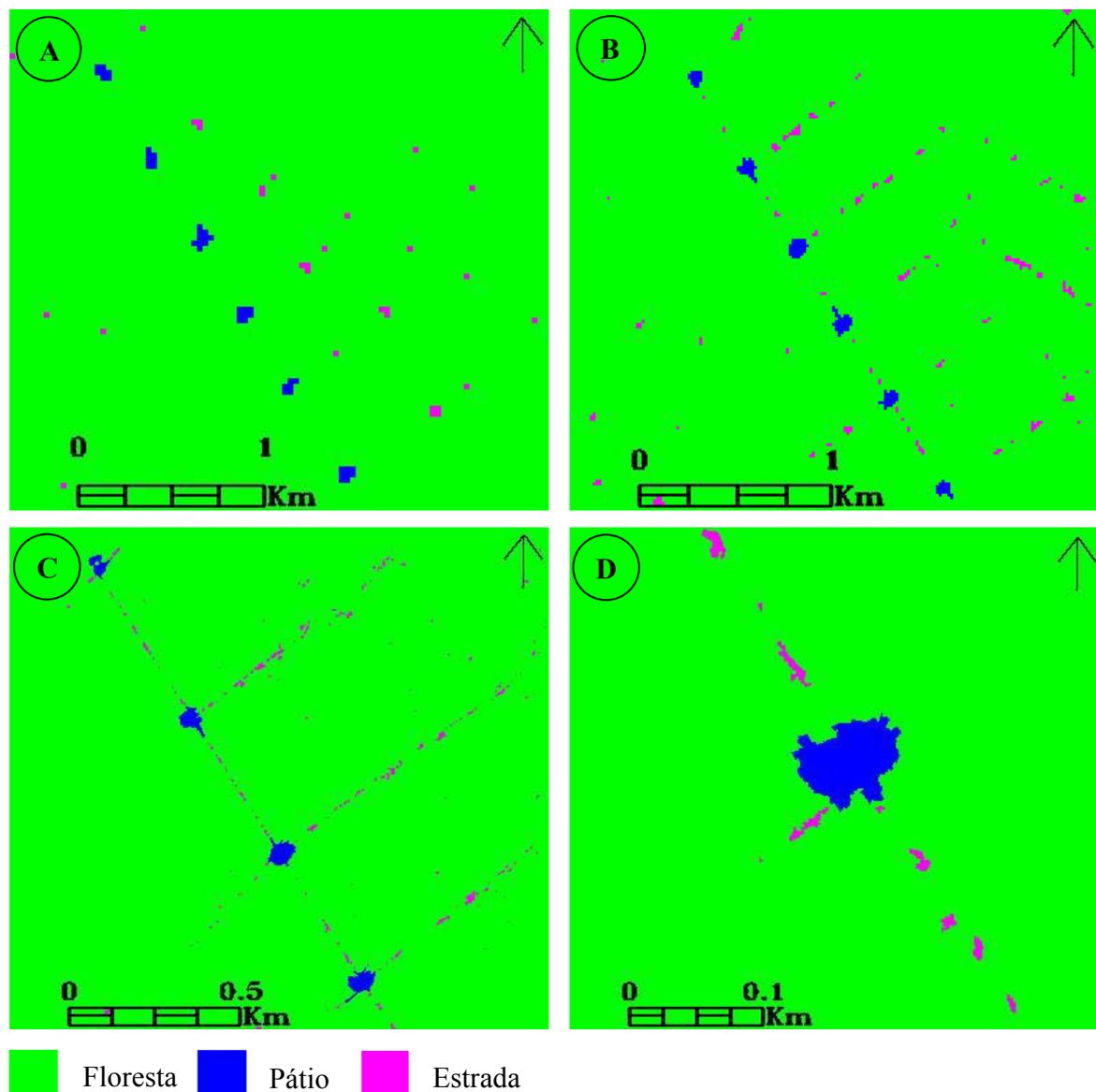
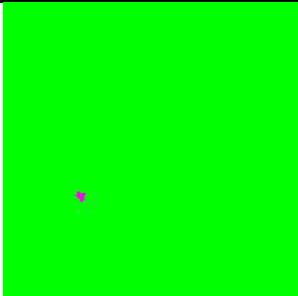
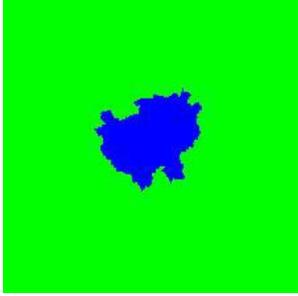
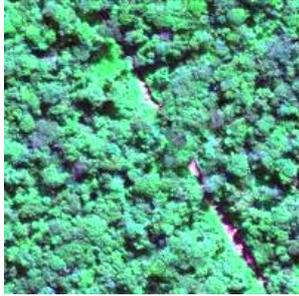
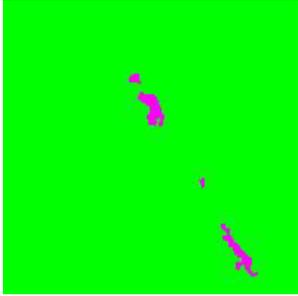


FIGURA 11 - CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA IMAGEM LANDSAT (A), ASTER (B), IKONOS MS – 4m (C) E IKONOS PSM – 1m (D) PARA EXTRAÇÃO DAS CLASSES FLORESTA, PÁTIOS E ESTRADAS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE SINOP - MT

No Quadro 1 é apresentada uma comparação da imagem IKONOS PSM (composição falsa cor, R=2; G=3; B=1) com o resultado da classificação orientada a objeto para floresta,

pátio e estrada com suas respectivas representações no campo. Observa-se a dificuldade do classificador em estimar a dimensão dos pátios e a largura das estradas em decorrência do fechamento do dossel da floresta e o sombreamento ocasionado pelo mesmo nas infra-estruturas.

QUADRO 1 - COMPARAÇÃO DA IMAGEM (IKONOS PSM) COM A CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DE FLORESTA, PÁTIO E ESTRADA, E SUAS RESPECTIVAS REPRESENTAÇÕES NO CAMPO EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL NA REGIÃO DE SINOP - MT

CLASSE	IMAGEM COMPOSIÇÃO RGB (2,3,1)	CLASSIFICAÇÃO	CAMPO
Floresta			
Pátio			
Estrada			

5.4 Avaliação dos Indicadores de Manejo Florestal

Por questões de indisponibilidade de imagens ASTER e IKONOS para todas as áreas deste estudo, as análises dos indicadores relacionados ao planejamento e construção de estradas e pátios de estocagem foram feitas somente para áreas de EM em Paragominas - PA e de EC em Sinop - MT. A análise estatística foi feita com base na diferença entre as informações obtidas nas imagens e as obtidas no campo. Foi aplicada a análise de variância (ANOVA) e avaliado o p valor para testar diferenças entre imagem e campo. Em seguida foi aplicado o teste de comparação múltipla de Duncan com uma taxa de erro de 0,05% para testar diferenças dos resultados entre imagens. A diferença entre as informações obtidas nas imagens e as obtidas no campo foi assumida como sendo erro associado aos resultados da imagem.

5.4.1 Paragominas

Os resultados das análises comparativas entre as imagens LANDSAT processada por modelo de mistura espectral, LANDSAT e ASTER processadas por segmentação e classificação orientada a objeto para determinar as distâncias entre pátios e entre estradas em EM, na região de Paragominas - PA, são apresentadas na Tabela 10. Os resultados apresentados referem-se às diferenças médias entre as medições obtidas nas imagens e as obtidas no campo (Tabela 8), com o respectivo desvio padrão.

TABELA 10 - DIFERENÇA ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS PARA OS INDICADORES DE MANEJO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

INDICADOR CHAVE	LANDSAT ¹	LANDSAT ²	ASTER ²
Distância entre pátios (metros) n=15	-0,3 (8,5)a	0,8 (19,7)a	8,0 (7,8)b
Distância entre estradas (metros) n=10	4,8 (13,0)a	1,7 (8,0)a	-1,5 (10,8)a

Médias apresentadas com desvio padrão (DP) entre parênteses. As letras diferentes indicam diferenças entre as classes com $p < 0,05$ utilizando o teste de Duncan.

n= número de amostras

¹Processada por modelo de mistura espectral

²Processada por segmentação e classificação orientada a objeto

As melhores estimativas das distâncias entre pátios de estocagem foram apresentadas pelas imagens LANDSAT processada por modelo de mistura espectral (-0,31 metro) e LANDSAT processada por segmentação e classificação orientada a objeto (0,79 metro) onde não foram observadas diferenças significativas em relação ao campo. Por outro lado, as distâncias entre pátios obtidas pela imagem ASTER (8,01 metros), apresentaram diferenças significativas em relação ao campo e em relação às imagens LANDSAT (Tabela 10 e Figura 12).

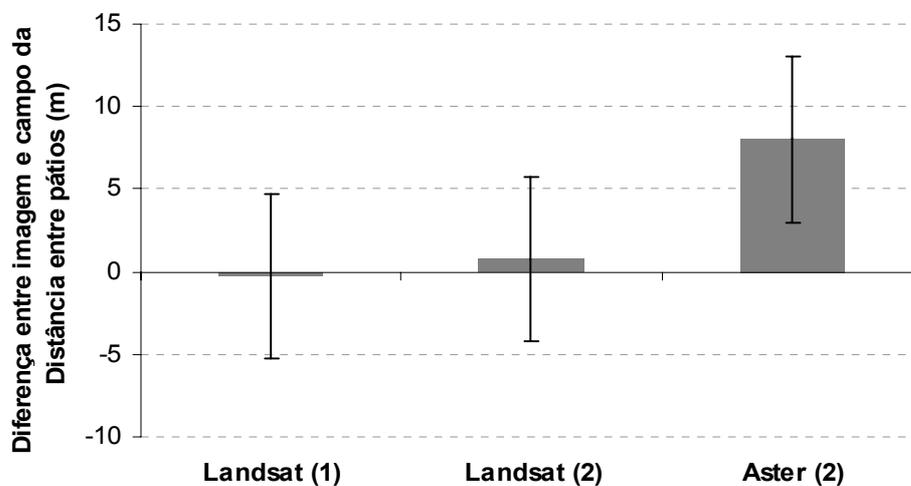


FIGURA 12 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT - PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT E ASTER - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

As estimativas fornecidas pelas imagens ASTER (-1,5 metros) e LANDSAT (1,73 metros) processadas por segmentação e classificação orientada a objeto; e LANDSAT (4,77 metros) processadas por modelo de mistura espectral não apresentaram diferenças significativas na distância entre estradas secundárias em relação ao campo (Tabela 10 e Figura 13). Sendo que as imagens processadas por segmentação e classificação orientada a objeto apresentaram as menores diferenças em relação ao campo, e portanto, as melhores

estimativas da distância entre estradas secundárias nesta região. Não houve diferença significativa na estimativa deste indicador entre as imagens.

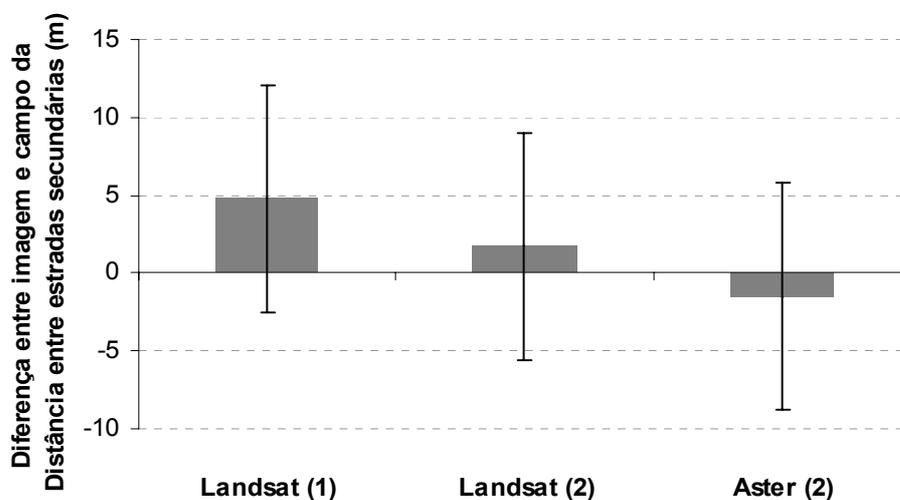


FIGURA 13 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT – PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT E ASTER - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA DAS ESTRADAS SECUNDÁRIAS EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A avaliação do indicador “impacto da exploração no dossel” feita na imagem de abundância de vegetação normalizada, obtida da imagem LANDSAT, apresentou diferenças significativas entre as formas de exploração para a região de Paragominas. A análise estatística mostrou que a abundância de vegetação foi 22% significativamente menor na EC e 16% menor na EM comparado à floresta intacta. Quando comparamos a abundância de vegetação entre EC e EM, observamos diferenças significativas em torno de 6% (Tabela 11).

TABELA 11 - ANÁLISE DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA ENTRE FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

	FLORESTA INTACTA (n=6)	EM (n=3)	EC (n=3)
Abundância de vegetação normalizada	0,90 (0,02)a	0,74 (0,01)b	0,68 (0,01)c

Médias apresentadas com desvio padrão entre parênteses (DP). As letras diferentes indicam diferenças entre as classes com $p < 0,05$ utilizando o Teste de Duncan.

Os histogramas normalizados para todos os 36 ha (400 pixels) de cada classe, mostraram que a abundância média de vegetação normalizada foi de 91% para floresta intacta, 77% para EM e 68% para EC (Figura 14). A abundância de vegetação para EM e para EC, neste caso, foi estatisticamente diferente em relação à floresta intacta (Teste de Duncan, $p < 0,05$). As variações da abundância de vegetação ocorreram largamente na EM (mínimo= 53% e máximo = 88%) e na EC (mínimo= 30% e máximo= 92%). Portanto, a presença de pixels com menor percentagem de abundância de vegetação na EC ratifica o maior impacto no dossel por este tipo de exploração.

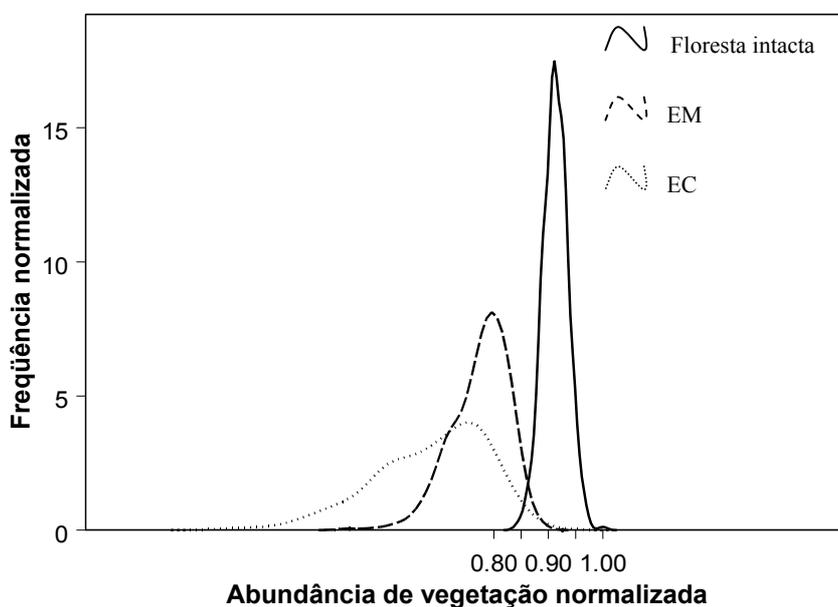


FIGURA 14 - HISTOGRAMAS DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA PARA FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A análise temporal das imagens de abundância de vegetação mostrou uma significativa redução de 23% da abundância de vegetação, devido à exploração, na EC (33 m³/ha extraído) e de 17% na EM (32 m³/ha extraído). Após um ano da exploração, a abundância de vegetação aumentou 2% na EM e significativamente 6% na EC. Comparando os resultados

neste período, observamos que a redução da abundância de vegetação na EC (74%) e na EM (76%) continuou significativa quando comparada à floresta intacta (91%) (Tabela 12 e Figura 15).

TABELA 12 - ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

TIPO DE EXPLORAÇÃO	VOLUME EXPLORADO (m ³ /ha)	IDADE DA EXPLORAÇÃO		
		1 ano antes (n=3)	Exploração (n=3)	1 ano depois (n=3)
Manejada	32	0,91 (0,01)a	0,74 (0,01)b	0,76 (0,01)b
Convencional	33	0,91 (0,01)a	0,68 (0,01)b	0,74 (0,01)c

Médias apresentadas com desvio padrão entre parênteses (DP). As letras diferentes indicam diferenças entre as classes com $p < 0,05$ utilizando o Teste de Duncan.

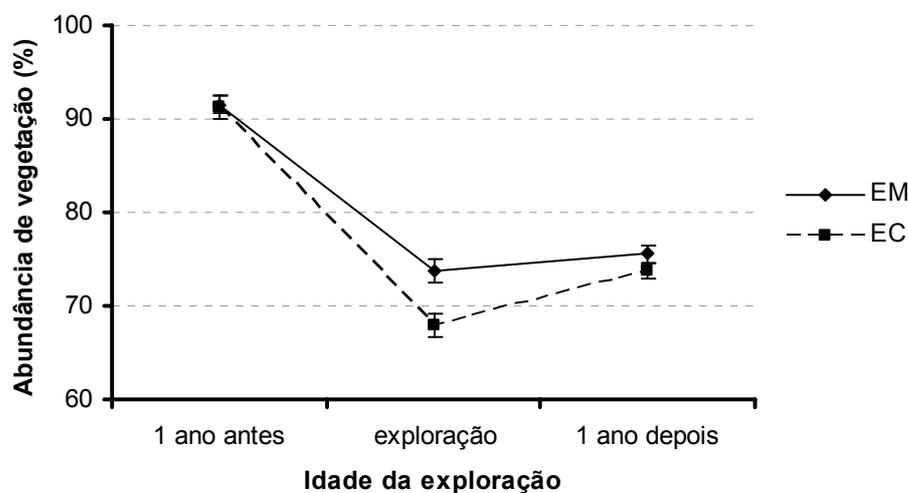


FIGURA 15 - ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A avaliação temporal mostrou que a abundância de vegetação na EC e EM foi significativa mesmo 1 ano após a exploração, sendo que o maior incremento da abundância de vegetação neste período pela EC em relação a EM, foi devido em grande parte, pela

regeneração de espécies pioneiras e cipós que são favorecidas pela entrada excessiva de iluminação causada pela maior abertura no dossel na EC (Monteiro et al, 2004). Não consideramos na análise temporal a variação fenológica das espécies devido a grande variabilidade intra e interespecífica da floração, frutificação e disseminação destas espécies em relação à época, duração e frequência desses eventos (Leão et al, 2001).

A significativa redução da abundância de vegetação na EC pode ser claramente observada na Figura 16. Comparando as imagens de abundância de vegetação nos dois tipos de exploração, notamos uma tonalidade de verde mais clara na EC (Figura 16B), devido a maior perda do dossel, em decorrência da não aplicação de técnicas de manejo como planejamento de abertura de estradas, pátios de estocagem e trilhas de arraste, corte de cipós e derrubada direcional da árvore. Também foi possível distinguir a EM da EC pela forma delineadas pelas cicatrizes da exploração. Na EM foi detectada uma forma regular (retilínea), devido ao planejamento da exploração. Por outro lado, a EC apresentou uma forma irregular (não retilínea), devido a ausência de planejamento da exploração.

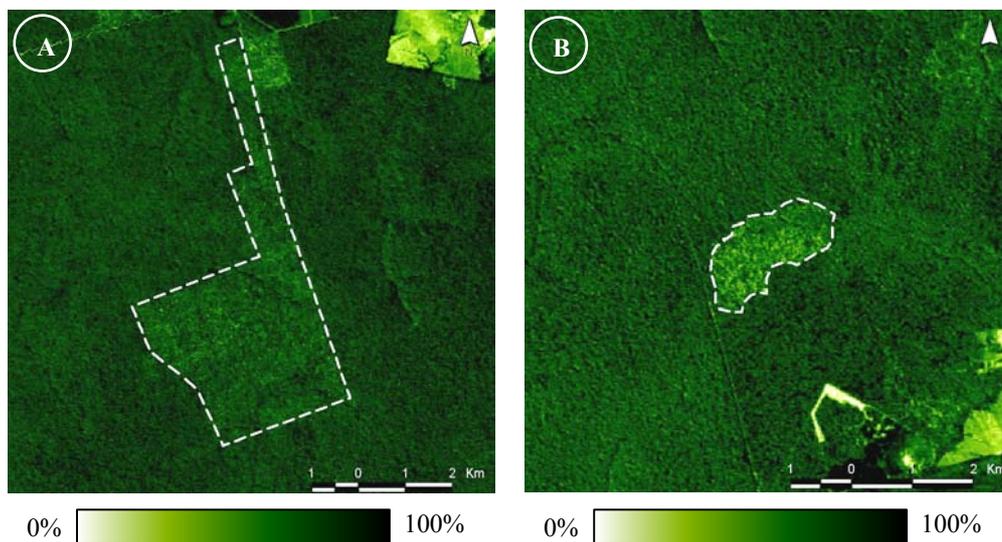


FIGURA 16 - COMPARAÇÃO DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (A) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A avaliação da exploração na Unidade de Produção Anual (UPA) através da sobreposição do vetor na imagem LANDSAT (composição colorida R=5; G=4; B=3), mostrou que a exploração manejada ocorreu respeitando os limites da UPA (Figura 17). A avaliação deste indicador na exploração manejada só foi possível devido disponibilidade do vetor georeferenciado dos limites da UPA para esta área. Pela não disponibilidade desta informação para a exploração convencional não foi possível avaliar este indicador nesta área. O monitoramento deste indicador é extremamente importante para acompanhar se a exploração vem ocorrendo dentro da unidade de manejo florestal ou mesmo se a área está sendo utilizada para fins de extração de madeira como declarada no plano de manejo.



FIGURA 17 – AVALIAÇÃO NA IMAGEM LANDSAT ETM+ RGB (5,4,3) DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA UNIDADE DE PRODUÇÃO ANUAL (UPA) EM EXPLORAÇÃO MANEJADA NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A avaliação do respeito as Áreas de Preservação Permanente (APPs), feito na imagem de abundância de solos para região de Paragominas, mostrou que não houve violação destas áreas na EM (Figura 18A). Ao contrário da EC onde foram detectadas violações das APPs (Figura 18B). Estas irregularidades foram checadas em campo, onde foi constatada a

ocorrência de exploração de madeira dentro das APPs e a obstrução de cursos d'água com a abertura de estradas (Figura 7).

O uso de imagem de abundância de solos associada ao vetor georeferenciado das APPs, em SIG, apresenta grande implicação na fiscalização e monitoramento destas áreas. Uma vez identificada a violação da APP na imagem, os fiscais das agências ambientais poderiam ser enviados ao campo para comprovar a infração, determinar a extensão da violação e aplicar a multa ao infrator.

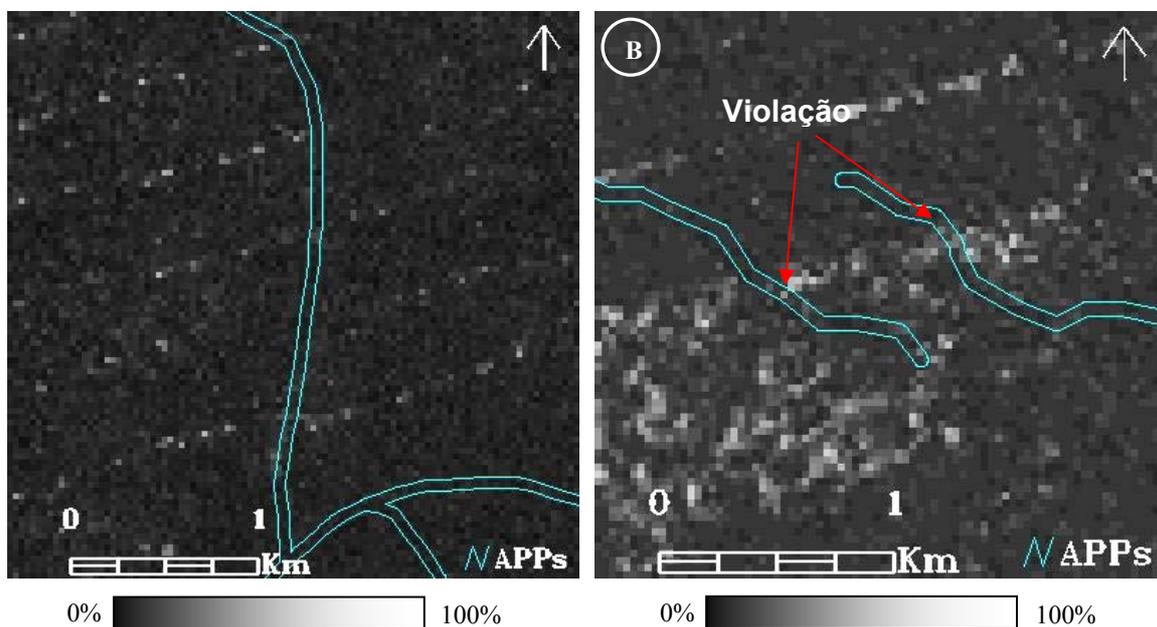


FIGURA 18 - AVALIAÇÃO NA IMAGEM DE ABUNDÂNCIA DE SOLOS (LANDSAT ETM+) DO RESPEITO AS APPS EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (SEM VIOLAÇÃO; A) E EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (COM VIOLAÇÃO; B) NA REGIÃO DE PARAGOMINAS - PA

A avaliação da proteção florestal contra incêndios florestais, através de inspeções diretas nas imagens, mostrou a ocorrência de floresta intacta circundando as áreas exploradas, servindo de sistema quebra-fogo natural. Não foi observada nas imagens de abundância de NPV, a ocorrência de fogo em nenhuma das áreas estudadas em Paragominas.

5.4.2 Sinop

Os resultados da análise comparativa entre as imagens LANDSAT processadas por modelo de mistura espectral e as imagens LANDSAT, ASTER, IKONOS MS e IKONOS PSM processadas por segmentação e classificação orientada a objeto para determinar as distâncias entre pátios e entre estradas em EC, na região de Sinop - MT, são apresentados na Tabela 13. Os resultados apresentados são as diferenças médias entre as medições obtidas nas imagens e as obtidas no campo, com o respectivo desvio padrão entre parênteses.

TABELA 13 - DIFERENÇA ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NAS IMAGENS E NO CAMPO PARA OS INDICADORES DE MANEJO EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

INDICADOR	LANDSAT ¹	LANDSAT ²	ASTER ²	IKONOS ² MS	IKONOS ² PSM
Dimensão dos pátios (metros quadrados) n=6	-	-	-	283,4a (392,5)	20,0a (477,8)
Largura das estradas principais (metros) n=6	-	-	-	1,4a (0,6)	1,3a (1,1)
Largura das estradas secundárias (metros) n=11	-	-	-	3,1a (0,9)	1,0b (1,7)
Distância entre pátios (metros) n=15	-6,8a (17,9)	-7,9a (10,2)	-5,4a (12,3)	-4,9a (6,2)	-5,7a (6,3)
Distância entre estradas secundárias (metros) n=10	10,2a (16,9)	-3,1b (5,3)	-2,9b (4,1)	-0,1b (4,4)	1,4b (5,7)

Médias apresentadas com desvio padrão (DP) entre parênteses. As letras diferentes indicam diferenças entre as classes com $p < 0,05$ utilizando o teste de Duncan

n= número de amostras

¹Processada por modelo de mistura espectral

²Processada por segmentação e classificação orientada a objeto

A melhor estimativa da dimensão média dos pátios de estocagem, feita pela imagem IKONOS PSM (19,97 metros quadrados), não apresentou diferença significativa em relação ao campo (Tabela 13 e Figura 19). Por outro lado, a superestimativa média da dimensão dos pátios em 283,37 metros quadrados, pela imagem IKONOS MS, foi significativamente diferente em relação ao campo. Não houve diferença significativa das estimativas da dimensão dos pátios entre as imagens IKONOS PSM e IKONOS MS.

A estimativa da dimensão de pátios de estocagem em área de exploração madeireira por processamento automático de imagens de satélite é uma abordagem nova em sensoriamento remoto. Há registro de estimativa da dimensão de pátios de estocagem, utilizando imagens de satélite, apenas por métodos manuais. Read et al (2003), através de interpretação visual de imagens IKONOS PSM, detectaram pátios de estocagem de 1.000 a 3.000 metros quadrados de dimensão em exploração manejada na região de Itacoatiara no Estado do Amazonas.

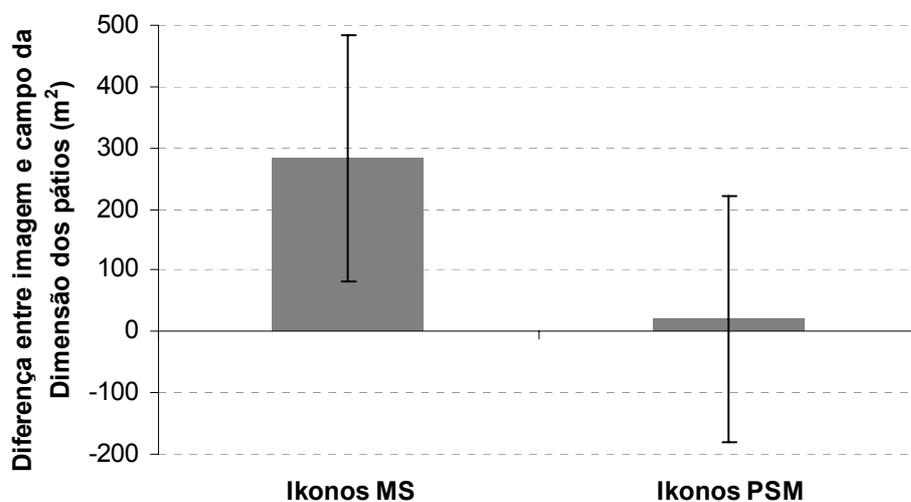


FIGURA 19 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA DIMENSÃO MÉDIA DOS PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

Na avaliação da distância entre pátios de estocagem, na EC em Sinop, foram observados que as melhores estimativas foram feitas pelas imagens IKONOS MS (-4,94 metros) e ASTER (-5,4 metros) que não apresentaram diferenças significativas em relação ao campo (Tabela 13 e Figura 20). Entretanto, as subestimativas das imagens IKONOS PSM (-5,7 metros), LANDSAT (-7,18 metros) processada por segmentação e classificação orientada a objeto, e LANDSAT (-6,27 metros) processada por modelo e mistura espectral

foram significativamente diferentes em relação ao campo. Entre as imagens não houve diferença significativa das estimativas.

As subestimativas da distância entre pátios de estocagem na EC, deste estudo, podem ter ocorrido devido à variação na determinação dos centróides que representaram a localização geográfica destes pátios. Considerando que os pátios na EC, deste estudo, apresentaram dimensões maiores comparadas aos pátios da EM, a determinação dos centróides dependeu da forma apresentada pelos pátios classificados na imagem.

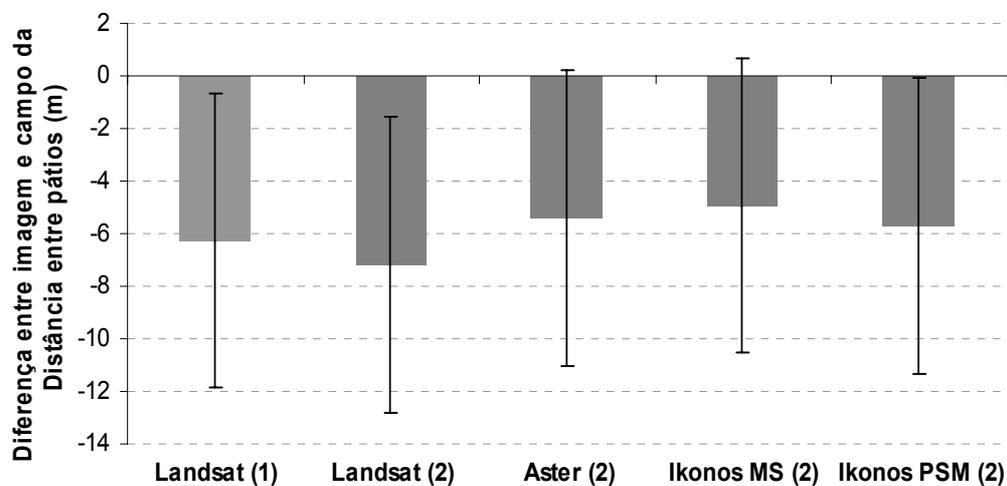


FIGURA 20 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT – PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) – PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

As distâncias entre estradas secundárias, na EC de Sinop, foi melhor estimada respectivamente pelas imagens IKONOS MS (-0,11 metros), IKONOS PSM (1,45 metros), ASTER (-2,86 metros) e LANDSAT (-3,07 metros) processada por segmentação e classificação orientada a objeto, não apresentando diferenças significativas em relação ao campo, e nem entre as imagens. Entretanto, a imagem LANDSAT processada por modelo de mistura espectral superestimou a distância entre as estradas em 10,23 metros,

diferenciando significativamente do campo e das demais imagens (Tabela 13 e Figura 21). As melhores estimativas da distância entre estradas secundárias obtidas pelas imagens processadas por segmentação e classificação orientada a objeto mostram a eficiência desta técnica para detectar estradas madeireiras.

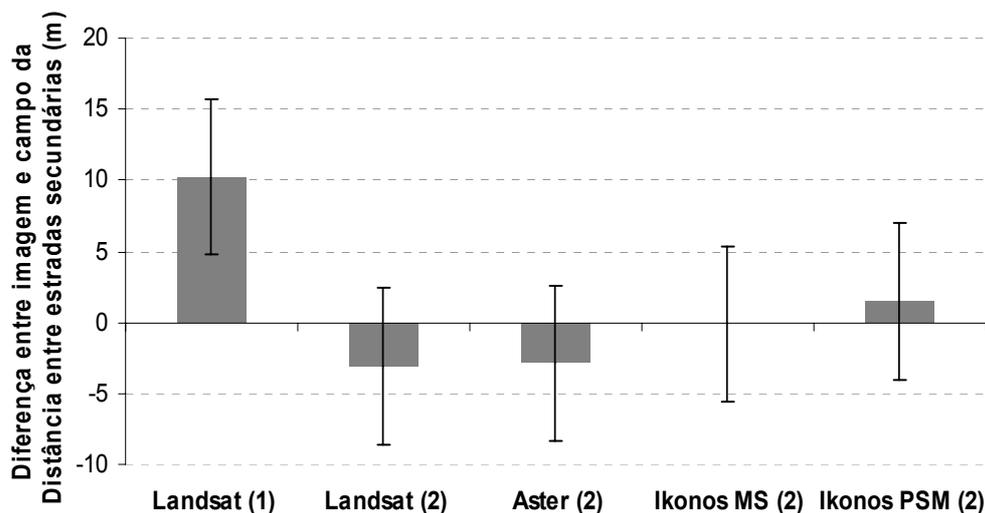


FIGURA 21 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NA IMAGEM LANDSAT – PROCESSADA POR MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (1) E NAS IMAGENS LANDSAT, ASTER, IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO (2) DA DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE ESTRADAS SECUNDÁRIAS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

A largura da estrada principal foi superestimada pelas imagens IKONOS MS (1,3 metros) e IKONOS PSM (1,4 metros), apresentando diferença significativa em relação ao campo (Tabela 13 e Figura 22). Entre as imagens IKONOS não houve diferença significativa. A determinação direta da largura de estradas madeireiras por processamento automático de imagens satélite é uma abordagem nova em sensoriamento remoto. Estudos realizados basearam-se apenas na detecção de estradas madeireiras. Read et al (2003) interpretando visualmente imagem IKONOS PSM (1 metro) detectaram estradas principais de largura entre 20 a 25 metros em exploração manejada na região de Itacoatiara - AM. Brandão Jr. & Souza Jr. (2003), utilizando interpretação visual e automática de imagem

LANDSAT, detectaram estradas madeireiras principais de 5 a 6 metros de largura na região de Paragominas - PA.

A largura das estradas secundárias também foi superestimada pelas imagens IKONOS PSM (1,03 metros) e IKONOS MS (3,12 metros), com diferença significativa em relação ao campo e entre as imagens IKONOS (Tabela 13 e Figura 23). Brandão Jr. e Souza Jr. (2003), através de interpretação visual e automática de imagem LANDSAT, detectaram estradas madeireiras secundárias de 4 a 5 metros de largura na região de Paragominas. Read et al (2003), através de interpretação visual de imagem IKONOS PSM (1 metro) detectaram estradas secundárias em exploração manejada na região de Itacoatiara - AM de largura entre 10 a 20 metros.

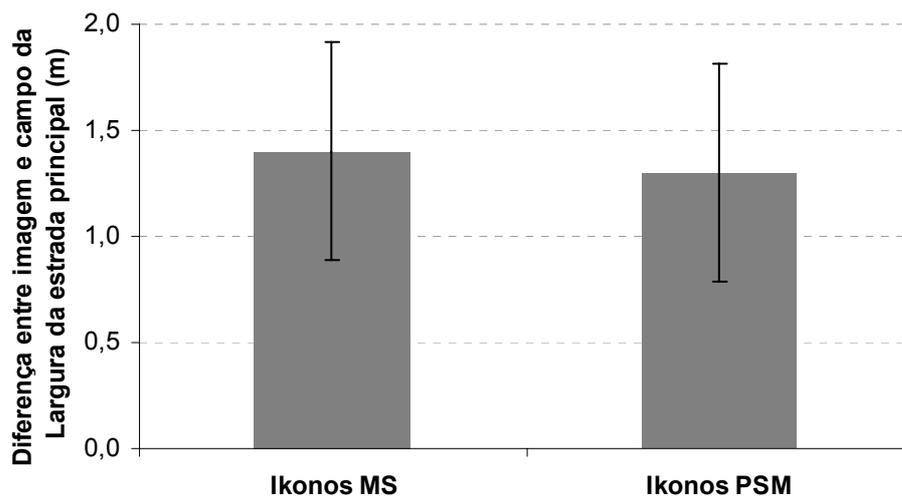


FIGURA 22 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) - PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA LARGURA MÉDIA DA ESTRADA PRINCIPAL EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

As superestimativas da largura das estradas principal e secundária, podem estar associadas ao fato de medirmos em campo apenas a largura do leito das estradas, não considerando as margens (solo e resíduos raspados do leito das estradas). Johns et al. (1996),

encontraram largura média da margem da estrada de 1,7 metros para EM e de 2 metros para EC na região de Paragominas.

O indicador “impacto da exploração no dossel” para a região de Sinop avaliado na imagem de abundância de vegetação normalizada apresentou diferenças significativas entre os ambientes de exploração. A abundância de vegetação foi 9% significativamente menor na EC e 3% menor na EM comparado à floresta intacta (Tabela 14). Entre os tipos de exploração, observamos que a abundância de vegetação foi 6% significativamente menor na EC em relação a EM.

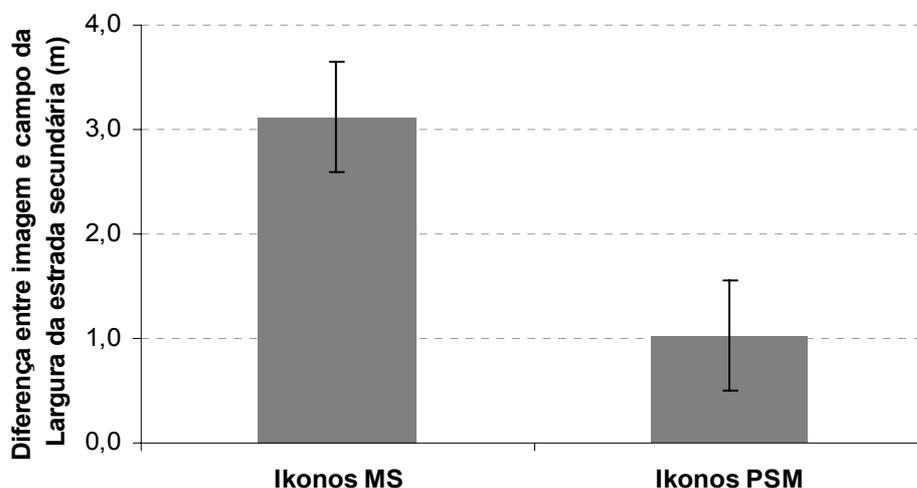


FIGURA 23 - DIFERENÇA (E O INTERVALO DE CONFIANÇA) ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS NO CAMPO E NAS IMAGENS IKONOS MS (4m) E IKONOS PSM (1m) – PROCESSADAS POR SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DA LARGURA MÉDIA DAS ESTRADAS SECUNDÁRIAS EM EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

A abundância de vegetação na EC foi menor que na EM, apesar da intensidade de exploração na EM ter sido maior que na EC. Isto mostra que a abundância de vegetação na imagem de satélite, de uma área submetida a exploração, pode estar diretamente relacionada com a qualidade do manejo aplicado. Asner et al (2002), analisando imagens de fração da abertura no dossel (*canopy gap fraction*) em ambiente de derrubada de árvores de diferentes padrões de exploração, encontraram valores de duas a três vezes maior na EC em relação EM.

A análise dos histogramas normalizados para os 36 ha (400 pixels) de cada classe mostrou diferenças significativas da abundância média de vegetação normalizada para floresta intacta (82%), EM (79%) e EC (73%) (Figura 24). A abundância de vegetação nas EM e EC foi estatisticamente diferente em relação à floresta intacta (Teste de Duncan, $p < 0,05$). As variações mínima e máxima respectivamente da abundância de vegetação foram de 50% e 92% na EM e de 42% a 86% na EC.

TABELA 14 - ANÁLISE DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA ENTRE FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

	FLORESTA INTACTA (n=6)	EM (n=3)	EC (n=3)
Abundância de vegetação normalizada	0,82 (0,01)a	0,79 (0,01)b	0,73c

Médias apresentadas com desvio padrão entre parênteses (DP). As letras diferentes indicam diferenças entre as classes com $p < 0,05$ utilizando o Teste de Duncan

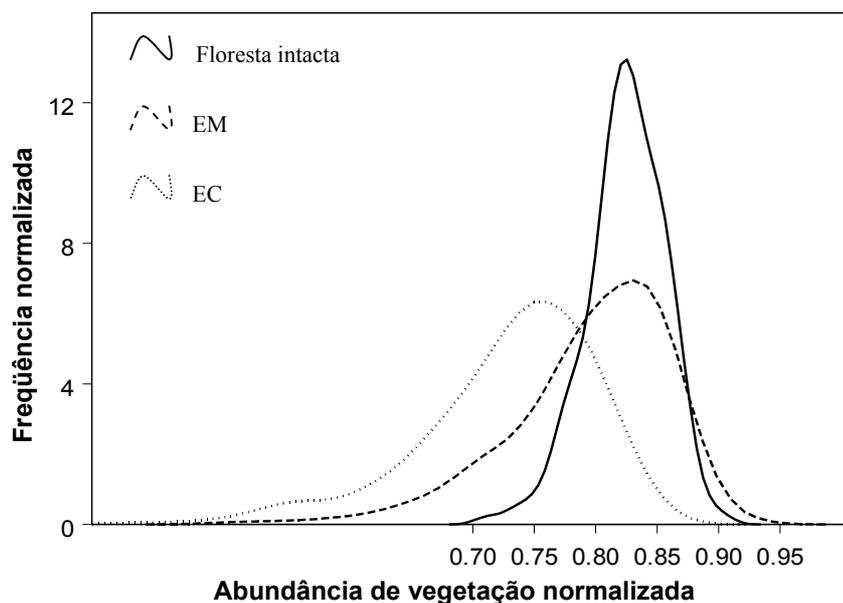


FIGURA 24 - HISTOGRAMAS DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA PARA FLORESTA INTACTA, EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

A análise temporal das imagens de abundância de vegetação normalizada mostrou uma significativa redução de 10% na abundância de vegetação, devido à exploração, na EC (34

m³/ha extraído) e de 3% na EM (35 m³/ha extraído). Após um ano da exploração, a abundância de vegetação aumentou significativamente 6% na EM e 8% na EC. Como ocorreu em Paragominas, o maior incremento da abundância de vegetação na EC em relação à EM, pode ser explicado pela presença de espécies pioneiras e cipós que são favorecidas pela ocorrência de uma floresta mais aberta neste sítio e pela maior abertura do dossel na EC. Após um ano da exploração, ainda observamos diferença significativa da abundância de vegetação na EC (81%) e na EM (85%) quando comparada à floresta intacta (Tabela 15 e Figura 25).

TABELA 15 - ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

TIPO DE EXPLORAÇÃO	VOLUME EXPLORADO (m ³ /ha)	IDADE DA EXPLORAÇÃO		
		1 ano antes (n=3)	exploração (n=3)	1 ano depois (n=3)
Manejada	35	0,82 (0,01)a	0,79 (0,01)b	0,85c
Convencional	34	0,83 (0,01)a	0,73b	0,81 (0,01)c

Médias apresentadas com desvio padrão entre parênteses (DP). As letras diferentes indicam diferenças entre as idades da exploração com $p < 0,05$ utilizando o Teste de Duncan

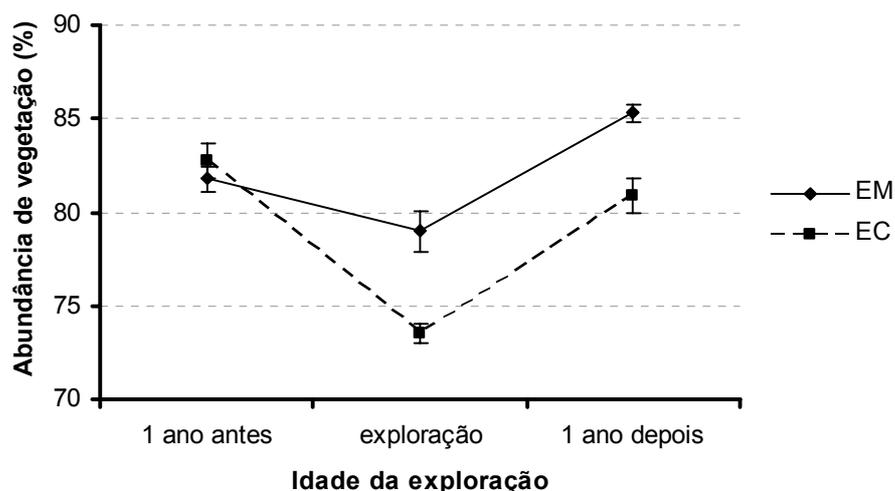


FIGURA 25 - ANÁLISE TEMPORAL DA ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) NA REGIÃO DE SINOP - MT

Ao contrário da área de Paragominas, as EC e EM não parecem visualmente distintas nas imagens de abundância de vegetação (Figura 26), apesar destas terem sido exploradas em diferentes intensidades (Tabela 15). Comparando as imagens de abundância de vegetação entre as formas de exploração, notamos uma tonalidade de verde clara tanto na EC como na EM. A baixa distinção visual das EC e EM nas imagens de abundância de vegetação pode estar associado ao fato das áreas em Sinop serem cobertas por floresta de transição, caracterizada por ser uma floresta menos densa em relação à floresta ombrófila densa de Paragominas. Diferentemente de Paragominas, não foi possível distinguir visualmente EM de EC pela forma delineada pelas cicatrizes da exploração. Isto mostra que apenas a presença de forma retilínea desenhada pelas cicatrizes, não indica que a floresta foi explorada com técnicas de manejo florestal.

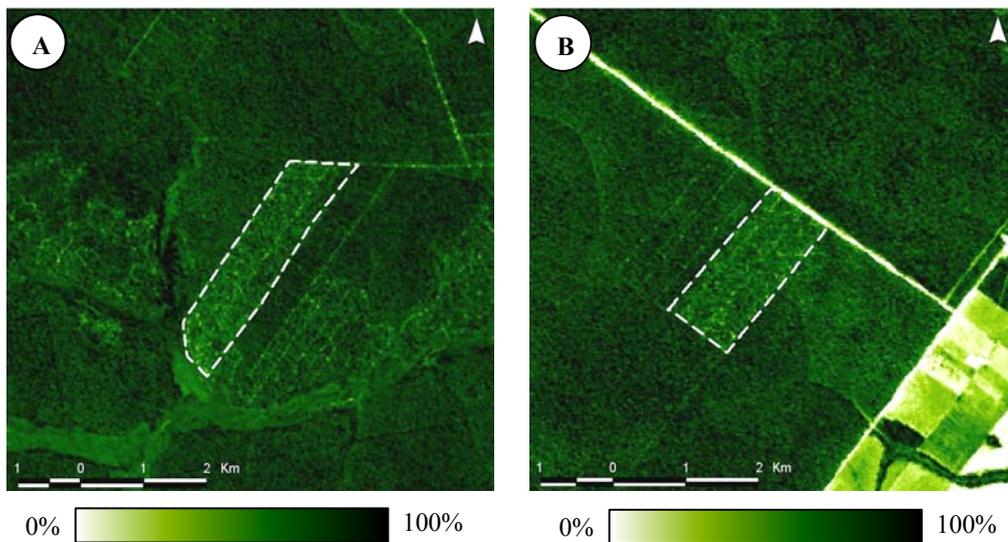


FIGURA 26 - COMPARAÇÃO DAS IMAGENS DE ABUNDÂNCIA DE VEGETAÇÃO EM EXPLORAÇÃO MANEJADA (A) E EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (B) NA REGIÃO DE SINOP - MT

Na avaliação do indicador “exploração florestal na Unidade de Produção Anual” observamos que a exploração manejada ocorreu dentro dos limites da UPA (Figura 27). Como em Paragominas, não foi possível avaliar este indicador na exploração convencional em Sinop

por não dispormos do vetor georeferenciado dos limites da UPA desta área. A avaliação do indicador “respeito às Áreas de Preservação Permanente” na imagem de abundância de solos mostrou que não houve violação das APPs nas EM e EC. Isto pôde ser comprovado na checagem de campo. No indicador “proteção florestal contra incêndios florestais” foi observada, por inspeção visual das imagens, a ocorrência de áreas de florestas intactas circundando a área explorada. A análise da imagem de abundância de NPV não mostrou ocorrência de fogo nas áreas de EM e EC desta região.

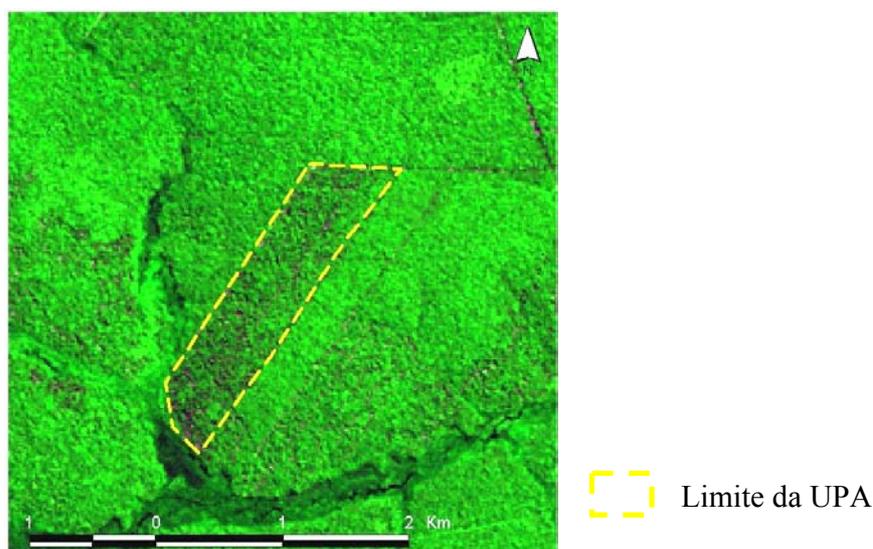


FIGURA 27 – AVALIAÇÃO NA IMAGEM LANDSAT ETM+ RGB (5,4,3) DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA UNIDADE DE PRODUÇÃO ANUAL (UPA) EM EXPLORAÇÃO MANEJADA NA REGIÃO DE SINOP - MT

5.5 Fiscalização e Monitoramento de Planos de Manejo Florestal

A metodologia utilizada neste estudo pode subsidiar o processo de fiscalização e monitoramento dos planos de manejo florestal em operação na Amazônia. Indicadores de manejo monitorados em campo, como os relacionados à infra-estrutura (pátios e estradas), ao impacto da exploração no dossel, ao respeito às APPs, a exploração na UPA e a proteção contra incêndios florestais poderiam ser monitoradas remotamente através de imagens de

satélite. Neste estudo, apresentamos um método para monitorar estes indicadores, contribuindo no procedimento de identificação e distinção da exploração manejada da predatória. Com isso, seria possível monitorar planos de manejo florestal através da avaliação destes indicadores com imagens de satélite.

TABELA 16 – AVALIAÇÃO GERAL DO POTENCIAL DAS IMAGENS LANDSAT, ASTER E IKONOS PARA MONITORAR OS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL EM ÁREAS DE EXPLORAÇÃO CONVENCIONAL (EC) E EXPLORAÇÃO MANEJADA (EM)

INDICADOR CHAVE	LANDSAT ¹	LANDSAT ²	ASTER ²	IKONOS ² MS	IKONOS ² PSM
Dimensão dos pátios	X	X	X	X	✓
Largura das estradas principais	X	X	X	✓	✓
Largura das estradas secundárias	X	X	X	X	✓
Distância entre pátios	✓	✓	✓	✓	✓
Distância entre estradas secundárias	✓	✓	✓	✓	✓
Impacto da exploração no dossel	✓	-	-	-	-
Exploração Florestal na UPA	✓	-	-	-	-
Respeito às APPs	✓	-	-	-	-
Proteção contra incêndios florestais	✓	-	-	-	-

✓ Possível; X Impossível; - Não avaliado

¹Processada por modelo de mistura espectral

²Processada por segmentação e classificação orientada a objeto

Na Tabela 16 apresentamos uma avaliação geral do potencial das imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS para monitorar os planos de manejo florestal através dos indicadores avaliados neste estudo. A avaliação consistiu em qualificar, em possível e impossível, o uso da imagem para o monitoramento dos indicadores. De acordo com os resultados deste estudo, é possível monitorar a dimensão dos pátios em imagem IKONOS PSM (1 metro de resolução espacial); a largura da estrada principal em imagens IKONOS (MS – 4 metros e PSM – 1 metro); a largura da estrada secundária em imagem IKONOS PSM; e as distâncias entre pátios e entre estradas secundárias em imagens LANDSAT (processadas por modelo de mistura espectral e segmentação e classificação orientada a objeto), ASTER e IKONOS (MS e PSM). Finalizando, os indicadores relacionados ao impacto da exploração no dossel,

exploração florestal na UPA, a proteção contra incêndios florestais e o respeito às APPs podem ser monitorados em imagem LANDSAT.

5.6 Avaliação do Custo e Benefício para o Monitoramento Remoto dos Indicadores de Manejo Florestal

Na Tabela 17 são apresentados os custos médios, em dólar americano por quilômetros quadrados, para monitorar os indicadores de manejo florestal por imagens de satélite e por campo, baseados nos custos deste estudo. Os custos referem-se às aquisições das imagens LANDSAT, ASTER e IKONOS, aos honorários do técnico para avaliar os indicadores por imagem de satélite, aos honorários do técnico e dos ajudantes para avaliar os indicadores por campo, e aos custos com transporte, hospedagem, alimentação e materiais de campo. Na avaliação dos indicadores por imagens de satélite, é assumido que a instituição/empresa já dispõe da infra-estrutura de computadores e programas de processamento de imagem e SIG para realizar tal tarefa. Foi adicionado a todos os custos 20% referente aos custos administrativos.

A Figura 28 mostra uma comparação do custo e benefício para o monitoramento dos indicadores de manejo florestal, baseado neste estudo, por imagem LANDSAT, ASTER, IKONOS MS e IKONOS PSM, e por campo. Os custos, em dólar americano por quilômetros quadrados, referem-se à avaliação dos indicadores de manejo por imagem de satélite e por campo. Os benefícios referem-se ao número de indicadores potenciais de serem avaliados por imagens de satélite e por campo.

Na avaliação real dos custos para monitorar os indicadores por campo, foram necessárias quatro semanas para cobrir uma área de 24,26 Km², ou seja, foram gastos aproximadamente US\$ 2.100,00 e US\$ 1.400,00 com honorários de técnicos e ajudantes respectivamente.

Enquanto que para monitorar os indicadores por imagem de satélite, foi gasto uma semana para cada imagem. Portanto, na comparação do custo e benefício do monitoramento dos indicadores de manejo florestal realizado por imagens de satélite e por campo, conclui-se que a melhor relação foi apresentada pela imagem LANDSAT (processada por modelo de mistura espectral) juntamente com a imagem IKONOS PSM, onde foram gastos US\$ 1.133,20 contra US\$ 3.726,79 do campo para monitorar nove indicadores de manejo florestal.

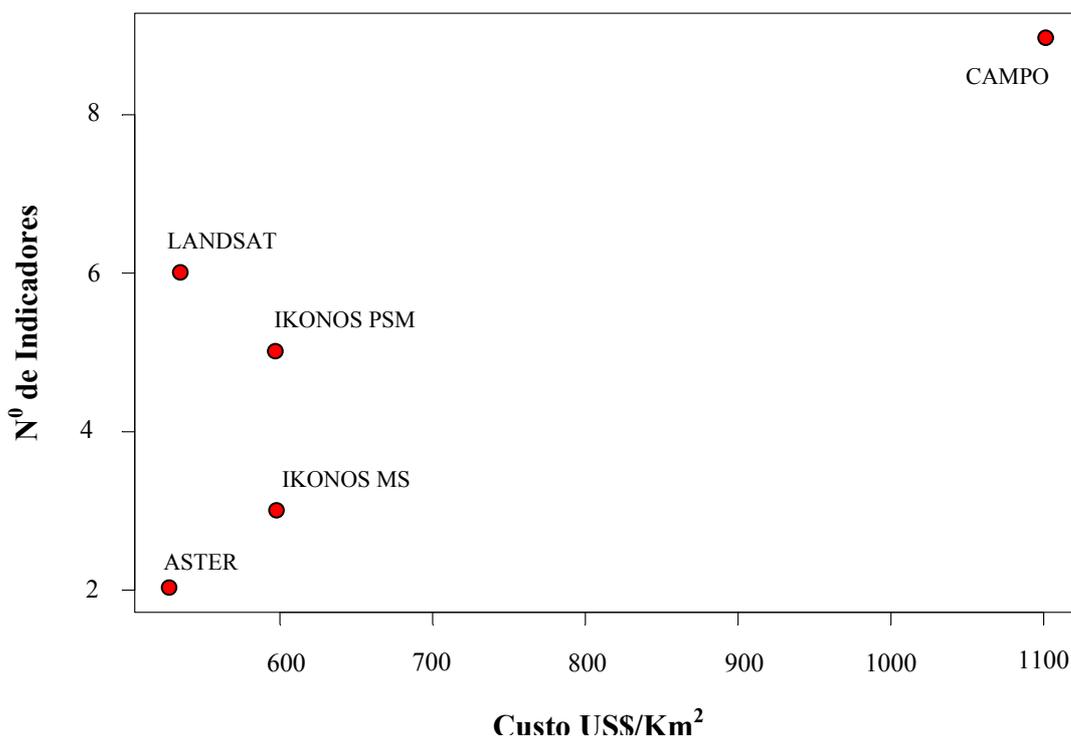


FIGURA 28- COMPARAÇÃO DO CUSTO E BENEFÍCIO PARA O MONITORAMENTO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL POR IMAGENS DE SATÉLITE E POR CAMPO

TABELA 17 - CUSTOS PARA O MONITORAMENTO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL

ITEM	CUSTOS US\$/Km ²				
	LANDSAT	ASTER	IKONOS MS	IKONOS PSM	CAMPO
Honorário ^a técnico/semana	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00
Honorários ^a ajudantes/semana					350,00
Imagem ^b	11,20	2,97	72,00	72,00	
Outros ^c					226,79
TOTAL	536,20	527,97	597,00	597,00	1.101,79

^aFoi necessário 1 técnico (US\$ 437,5 x 20%) para avaliar os indicadores por imagem de satélite, e 1 técnico (US\$ 437,5 x 20%) e 2 ajudantes (US\$ 262,5 x 20%) para avaliar os indicadores por campo.

^bOs custos das imagens por quilômetros quadrados foram estimados para imagem Landsat ((US\$ 226,5/24,26)*20%), para imagem Aster ((US\$ 60/24,26)*20%) e para imagem Ikonos (US\$ 60*20%). Sendo os custos unitários das imagens: Landsat (US\$ 226,5/cena), Aster (US\$ 60,00/cena) e Ikonos (US\$ 60,00/Km²). Finalizando 24,26 é a área em Km² coberta no campo.

^cCustos de campo com hotel, transporte, alimentação e materiais ((US\$ 4.584,92/24,26)*20%). Sendo US\$ 4.584,92 o custo total de campo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

- Imagens de satélite LANDSAT, ASTER e IKONOS podem ser usadas para detectar e monitorar indicadores de manejo florestal relacionados a infraestrutura, aos impactos da exploração no dossel, a exploração nas Unidades de Produção Anual, ao respeito as Áreas de Preservação Permanentes, e a proteção florestal contra incêndios;
- O método de estudo mostrou-se eficiente para distinguir exploração convencional de exploração manejada através da avaliação remota dos indicadores de manejo florestal;
- Na avaliação dos indicadores de manejo devem-se considerar as características regionais dos sítios (i.e., tipologia florestal e volume explorado);
- Indicadores como largura de estradas e dimensão dos pátios de estocagem devem ser avaliados por imagem de alta resolução espacial (i.e., IKONOS);
- Imagens de abundância de vegetação são úteis para avaliar e distinguir os impactos no dossel pela exploração convencional e exploração manejada;
- Imagens de abundância de solos são úteis para detectar violações das Áreas de Preservação Permanentes (APPs);
- Segmentação e classificação orientada a objeto são úteis para extrair e quantificar largura de estradas e dimensão de pátios de estocagem;
- As imagens LANDSAT, processada por modelo de mistura espectral, e IKONOS PSM (1 metro) apresentaram a melhor relação custo e benefício para o monitoramento dos indicadores de manejo florestal;

- O método deste estudo pode contribuir para otimizar os programas de fiscalização e monitoramento anual da exploração madeireira pelas agências ambientais (i.e. IBAMA) e pelas certificadoras;
- Este método tem potencial para baixar custos de fiscalização e auditorias de certificação em campo.

6.2 RECOMENDAÇÕES

- Buscando a redução dos custos em programas de monitoramento da atividade madeireira, imagens de satélite como a do sensor CBERS (Satélite Sino-Brasileiro), disponibilizada gratuitamente, poderiam ser avaliadas para monitorar os indicadores de manejo florestal deste estudo.
- Considerando as diferentes tipologias florestais, os diferentes sistemas e escala de exploração de madeira na Amazônia, recomenda-se testar a metodologia deste estudo em outros tipos de floresta, sistemas e escala de exploração de madeira da região.
- Estudos poderiam ser conduzidos, utilizando imagens de satélite, para determinar a dimensão mínima de área de floresta intacta (zona tampão) capaz de servir de barreira contra o fogo em áreas de exploração madeireira.

REFERÊNCIAS

AMARAL, P., VERISSIMO, A., BARRETO, P., VIDAL, E. **Floresta para Sempre: um Manual para Produção de Madeira na Amazônia**. 137p. Belém: IMAZON, 1998.

ANTUNES, A. F. B. **Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial**. Curitiba, 2003. 147 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná.

ASNER, G. P., KELLER, M., PEREIRA, R., ZWEEDE, J. C. Remote sensing of selective logging in Amazonia Assessing limitations based on detailed field observations, LANDSAT ETM⁺, and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, 80, p. 483-496, 2002.

ASNER, G. P., SILVA, J. N., BUSTAMANTE, M. M. C., KELLER, M. Remote Sensing of Selective Logging: Early Results of a Basin-wide Analysis. SEVENTH LBA-ECO SCIENCE TEAM BUSINESS MEETING, **Book of abstracts**, 2003, Fortaleza, Brazil.

BAATZ, M. & A. SCHÄPE. Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag: 12-23. Disponível em: www.definiens-imaging.com/documents. Acesso em: 28 de mar. 2005.

BARRETO, P & SOUZA Jr, C. **Controle do desmatamento e da exploração de madeira na Amazônia: diagnóstico e sugestões**. IBAMA, Belém, PA, 2001, 32p. Relatório Técnico do Componente III, PPG7/Promanejo.

BARRETO, P. **Manejo Florestal para produção de madeira na Amazônia: situação e perspectivas**. Estudos sobre manejo florestal na Amazônia Brasileira – Banco Mundial, 2002. 68p. Relatório técnico.

BENZ, U. C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I., HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing** 58, p. 239-258, 2004.

BOARDMAN, J. W., KRUSE, F. A., & GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data: **In summaries**, FIFTH JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, JPL Publications 95-1, v.1, p.23-26. Allen, E. (1990). “Government Development Policies and Deforestation in Brazil Amazon Region – Mahar, Dj. “Third World Quarterly 12(1): p. 229-235, 1995.

BOLFARINE, H & BUSSAD, W. Elementos de amostragem. Instituto de Matemática e Estatística – Universidade de São Paulo. Versão Preliminar, Julho, 2000. 280p.

BRANDÃO Jr., A. O. & SOUZA Jr., C. M. Avaliação de imagens LANDSAT para identificação e extração de estradas madeireiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. **Anais**, São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3503-3509. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.

BSRSI. Disponível em: <<http://www.bsrsi.msu.edu>>. Acesso em 09 de dez. 2004.

CARLOTTO, M. J. Reducing the effects of space varyin, wavelength dependent scattering in multispectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 20(17), p. 3333-3344, 1999.

CIKEL BRASIL VERDE S.A. **Avaliação de Certificação do Manejo Florestal das florestas naturais da Cikel Brasil Verde S.A. Fazenda Rio Capim – Paragominas, PA, Brasil**. Scientific Certification Systems, Inc. 2001. 39p. Relatório técnico.

COCHRANE, M. A. & SOUZA Jr., C. Linear mixture model classification of burned forest in the eastern Amazon. **International Journal of Remote Sensing** 19 (17): p. 3433-3440, 1998.

COCHRANE, M. A. & SHULTZ. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eASTERn Amazon: Effects on forest structure, biomass, and species composition. **Biotropica** 31(1): p. 2-16, 1999.

COPPIN, POL. R. & BAUER, M. E. The Potential Contribution of Pixel-Based Canopy Change Information to Stand-Based Forest Management in the Northern U.S. **Journal of Environmental Management** 44, p. 69-82, 1995.

de WASSEIGE, C & DEFOURNY, P. Remote Sensing of selective logging impact for tropical forest management. **Forest Ecology and Management**, 188, p. 161-173, 2004.

FERN. **Footprints in the forest. Current practice and future challenges in forest certification**. 2004, 78p. Report.

FIRESTONE, L. & SOUZA Jr. The role of Remote Sensing and GIS in enforcement of Areas of Permanent Preservation in the Brazilian Amazon. **Geocarto International**, 17 (2), p. 51-56, 2002.

FORESTRY STEWARDSHIP COUNCIL. **Forestry Stewardship Principles and Criteria for Natural Forest Management**. Oaxaca, Mexico, 12p, 1994.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL – FSC BRASIL. **Brasil assume o primeiro lugar em área de florestas certificadas na América Latina**. Disponível em: <<http://www.fsc.org.br>> Acesso em: novembro de 2004.

GEF (GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY). **“Forest Certification and Biodiversity: Opposites or Complements?”**. New York, 2002, 30p.

GERWING, J. J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, 157, p. 131-141, 2002.

GRAÇA, P. M. L. A., SANTOS, J. R., SOARES, J. V., SOUZA, P. E. U. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte de Mato Grosso. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril de 2005, INPE, p. 1555-1562, (CD ROOM).

HOFMANN, P. **Detecting building and roads from IKONOS and DEM data with eCognition**. eCognition Application Note. Vol. 2, No. 5, August 2001. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.com>> Acesso em: mar. 2004.

HOLDSWORTH, A. R. & UHL, C. Fire in Amazonian selective logged rain forest and the potential for fire reduction. **Ecological Applications** 7(2): p. 713-725, 1997.

HOLMES, T. P., BLATE, G. M., ZWEEDE, J. C., PEREIRA JUNIOR, R., BARRETO, P., BOLTZ, F. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em comparação à exploração florestal convencional na Amazônia Oriental**. Belém: Fundação Floresta Tropical, 2002. 69p.

HOUGHTON, R. A. Land-use change and the carbon cycle (review). **Global Change Biology** 1(4): p. 275-287, 1995.

IBAMA. **Manejo Florestal Sustentável na Amazônia**. Projeto PNUD BRA 97/044. Brasília-DF, 2001. 119p. Relatório técnico.

IBGE. Base Cartográfica Integrada Digital do Brasil ao Milionésimo Versão 1.0 para ArcGis Desktop/ArcView. 2003. CD-ROM.

IMAZON. **Mapeamento de Áreas Desmatadas do Estado do Acre**. 2001. Relatório técnico.

INPE. 2004a. Disponível em: <http://www.inpe.br/Informacoes_Eventos/amz2000_2001>
Acesso em: 09 dez. 2004

INPE. 2004b. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/produtos/queimadas/proarco>>
Acesso em 09 de dez. 2004.

ISO (International Standardization Organization). Environmental Ecolabelling: **Guiding Principles, Practices and Criteria for Multiple Criteria-Based Practitioner Programs**. Guides for Certification Procedures, Geneva Switzerland, 1995.

ITTO (International Timber Trade Organization). **Criteria and Indicators for the Sustainable Management of Natural Forests**. ITTO Policy Development Series No. 7. 1998. Disponível em: <<http://www.itto.or.jp>> Acesso em: jan. 2004.

ITTO. **Criteria for the measurement of sustainable tropical forest management**. Yokohama, Japan, 28 p, 1992.

JANECZEK, D. J. **Detection and Measurement of Amazon Tropical Forest Logging using Remote Sensing Data**. 1999. A Master's Thesis presented to Michigan State University, Department of Geography.

JOHNS, J. S., BARRETO, P., UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eASTERn Amazon. **Forest Ecology Management**, 89(1-3): p. 59-77, 1996.

KESHAHA, N. & MUSTARD, J. F. Spectral Unmixing. **IEEE Signal Processing Magazine**, p. 44-57, 2002.

KRUG, T. Deforestation and Fire in the Brazilian Amazonia: a historical perspective. In. LBA FIRST SCIENTIFIC CONFERENCE. **Book of Abstracts**. Belém. Pará, 2000.

LEÃO, N. V. M., DE CARVALHO, J. O. P. Fenologia reprodutiva de 25 espécies arbóreas da Amazônia. In: SILVA, J. N. M., DE CARVALHO, J. O. P., YARED, J. A. G. **A Silvicultura na Amazônia Oriental**: contribuições do Projeto Embrapa/DFID. Belém: Embrapa Amazônia Oriental: DFID, 2001. 459p.: il.

LENTINI, M., VERISSIMO, A., SOBRAL, L. **Fatos Florestais da Amazônia 2003**. Belém: Imazon 2003. 108p. Disponível em: <http://www.imazon.org.br>

LENTINI, M., VERISSIMO, A., PEREIRA, D. A Expansão Madeireira na Amazônia. Boletim informativo **O Estado da Amazônia**. Belém: Imazon 2005. Disponível em: <http://www.imazon.org.br>

MACQUEEN, D. J., GRIEG-GRAN, M., LIMA, E., MACGREGOR, J., MERRY, F., PROCHNIK, V., SCOTLAND, N., SMERALDI, R., YOUNG, C. E. F. Exportando sem crises: a indústria de madeira tropical brasileira e os mercados internacionais. **Small and Médium Forest Enterprises Series No. 1**. International Institute for Environment and Development, Londres, Reino Unido. 2004, 16p.

MARTINI, A., ROSA, N., UHL, C. An attempt to predict which Amazonian tree species may be threatened by logging activities. **Environmental Conservation** 21(2): p. 152-162, 1994.

MATRICARDI, E. A. T., SKOLE, D. L., CHOMENTOWSKI, M. A., COCHRANE, M. A. **Multi-temporal detection of selective logging in the Amazon using remote sensing**. Special Report BSRSI Research Advances – Tropical Forest Information Center, Michigan State University Nº. RA03-01/w, 2001, 27p.

MENDOZA, G. A., PRABLU, R. Fuzzy methods for assessing criteria and indicators of sustainable forest management. **Ecological Indicators** 3, p. 227-236, 2003.

MONTEIRO, A. L., SOUZA Jr. C., BARRETO, P. Detection of logging in Amazonian transition forest using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, 1 (24): p. 151-159, 2003.

MONTEIRO, A. L., SOUZA Jr, C., BARRETO, P., PANTOJA, F., GERWING, J. Impactos da exploração madeireira e do fogo em florestas de transição da Amazônia Legal. **Scientia Forestalis**, n.65, p. 11-21, 2004.

NEPSTAD, D., VERISSIMO, A., ALENCAR, A., NOBRE, C., LIMA, E., LEFEBVRE, P., SCHLESINGER, P., POTTER, C., MOUTINHO, P., MENDOZA, E., COCHRANE, M., BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature** 398(6727): p. 951-953, 1999.

QI, J., WANG, C., MATRICARDI, E., SKOLE, D. Improved selective logging detection with LANDSAT images in tropical regions. In: IGRARSS'02, Toronto, Canada, vol. 4, p. 2078-2080, 2002.

RADAMBRASIL. Departamento de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais. Folha SC.21 Juruena**. Rio de Janeiro, 20, p. 39-40, 1981.

READ, J., CLARK, D. B., VENTICINQUE, E. M., MOREIRA, M. P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, 40, p. 592-600, 2003.

RICHARDS, A. J. **Remote Sensing Digital Image Analysis An Introduction Second Edition**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1993, 340p.

ROBERTS, A. D., BATISTA, G. T., PEREIRA, J. L. G., WALLER, E. K., NELSON, B. W. Change Identification Using Multitemporal Spectral Mixture Analysis: Applications in Eastern Amazonia, in **Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Applications and Methods**, edited by C. Elvidge and R. Lunetta, p. 137-161, Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, 1998.

ROLIM, F. A. **Análise de classificação orientada ao objeto em imagens de alta resolução para o auxílio ao monitoramento ambiental em uma microbacia hidrográfica**. Curitiba, 2003. 107 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.

ROWE, J. P., WARNER, T. A., DEAN Jr, D. R., EGAN, A. A remote sensing strategy for measuring logging road system length from small-format aerial photography. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 65, No. 6, p. 697-703, 1999.

SANTOS, J. R., SHIMABUKURO, I. E., DUARTE, V., GRAÇA, P. M. L. A., SILVA, P. G. Linear spectral mixture model as a tool for monitoring deforestation and timber exploitation in the Brazilian Amazon. In: SPIE'02 – 9th International Symposium on Remote Sensing, 2002. Crete, Greece. Proceedings. [CD-ROM].

SCHNEIDER, R., ARIMA, E., VERRISIMO, A., BARRETO, P., SOUZA Jr, C. **Amazônia Sustentável: limitantes e oportunidades para o desenvolvimento rural**. Serie Parcerias Banco Mundial – Brasil n^o 1. Brasília – Banco Mundial, Belém: Imazon, 2000. 58p.

SILVA, P. G., SANTOS, J. R., SHIMABUKURO, I. E., SOUZA, P.E.U; GRAÇA, P. M. L. A. Change vector analysis technique to monitor selective logging activities in Amazon tropical rainforest. In: IGARSS'03, Toulouse, France, 2003, [CD-ROM].

SIVAM. Disponível em: <<http://www.raytheon.com/produts/sivam>>. Acesso em 09 de dez. 2004.

SOUZA Jr., C. & BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, 21, p. 173-179, 2000.

SOUZA Jr., C. & BARRETO, P. **Aplicação de Geoprocessamento no Controle Florestal**. Projeto de Apoio ao Manejo Florestal Sustentável na Amazônia – ProManejo. 2001. 18p. Relatório técnico.

SOUZA Jr., C.; FIRESTONE, L.; MOREIRA, L.; ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, 87, p. 494-506, 2003a.

SOUZA Jr., C., BARRETO, P., MONTEIRO, A. L. Exploração madeireira na Amazônia: é possível monitorar por satélite. **Ciência Hoje**, 197, p. 62-65, 2003b.

SOUZA Jr. & ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the Amazon region with IKONOS images. **International Journal of Remote Sensing**, 26, p. 425-229, 2005.

STONE, T. A. & LEFEBVRE, P. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in Para, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 19, p. 2517-2526, 1998.

UHL, C. & VIEIRA, I. C. G. Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon: a case study from the Paragominas region of the State of Para. **Biotropica**, 21(1):98-106, 1989.

VAN DER HOUT, P. Testing the applicability of reduced impact logging in greenheart forest in Guyana. **International Forestry Review** 2 (1), 2000.

VAN DER SANDE, C. J., DE JONG, S. M., DE ROO, A. P. J. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 4 (3), p 217-229, 2003.

VERÍSSIMO, A., BARRETO, P., TARIFA, R., UHL, C. Extraction of a high-value natural resource from Amazon: The case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, 72, 39-60, 1995.

VERSTRAETE, M. M., B. PINTY, MYNENI, R. B. Potential and Limitations of Information Extracting on the Terrestrial Biosphere from Satellite Remote Sensing. **Remote Sensing of Environment** 58(2):201-214, 1996.

VIDAL, E., GERWING, J., BARRETO, P., AMARAL, P., JOHNS, J. **Redução de desperdícios na Produção de Madeira na Amazônia**. Serie Amazônica, nº 5. Imazon, 21p, 1997.

WATRIN, O. S.; ROCHA, A. M. A. **Levantamento da vegetação natural e do uso da terra no Município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/LANDSAT**. Boletim de Pesquisa, 124, Embrapa/CPATU, Belém, PA, 40, 1992.

ANEXO 1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS SENSORES

	LANDSAT ETM+	ASTER	IKONOS II
Altitude	705 Km	705 Km	680 Km
Inclinação	98,2 ⁰	98,2 ⁰	98,1 ⁰
Velocidade		8,3 Mbps	7 Km/s
Sentido da Órbita	Descendente equatorial	Descendente	Descendente
Duração da Órbita	98,9 min		98 min
Tipo de Órbita	Heliosíncrona	Heliosíncrona	Heliosíncrona
Resolução Espacial	30 metros (multiespectral - MS) e 15 metros (pancromática - PAN)	15 metros (visível); 30 metros (infra- verm próx) e 90 metros (infra- verm termal)	4 metros (MS) e 1 metro (PAN)
Bandas espectrais	0,52 – 0,90µm (pan) 0,45 – 0,52µm (azul) 0,53 – 0,61µm (verde) 0,63 – 0,69µm (verm) 0,78 – 0,90µm (infra-verm próx) 1,55 – 1,75µm (infra-verm méd) 2,09 – 2,35µm (infra-verm méd) 10,4 – 12,5µm (termal)	0,5 – 0,9µm (visível) 1,6 – 2,5µm (infra-verm próx) 8 – 12µm (infra-verm termal)	0,45 – 0,90µm (pan) 0,45 – 0,52µm (azul) 0,52 – 0,60µm (verde) 0,63 – 0,69µm (verm) 0,76 -0,90µm (infra-verm)
Imageamento	185 Km	60 Km	13 Km
Resolução Temporal	16 dias	16 dias	2,9 dias (PAN) e 1,5 dias (MS)

FONTE: Engesat (www.engesat.com.br)

ANEXO 2 - FICHA PARA VERIFICAÇÃO DOS INDICADORES DE MANEJO FLORESTAL NO CAMPO

Sítio =

Tipo de exploração=

Ano da exploração=

Id da UPA =

Planejamento e abertura de estradas e pátios de estocagem

N^o de estradas Principal = Secundária =

N^o de pátios =

Estrada (UT)	Localização geográfica	Largura (m)	Categoria
#			
Pátio (UT)	Localização geográfica	Dimensão comp. x larg. (m)	Distância entre pátios (m)
#			

Impacto da exploração no dossel

Clareira (foto)	Localização geográfica	Observações
#		

Exploração na Unidade de Produção Anual (UPA)

Ponto	Localização geográfica	Situação
#		

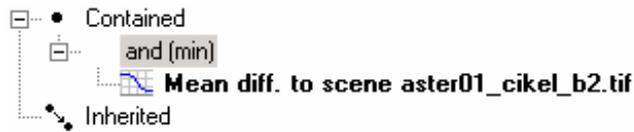
Respeito as Áreas de Preservação Permanente (APPs)

Rio (ponto)	Localização geográfica	Situação
#		

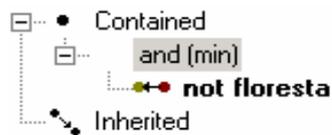
Proteção florestal contra incêndios

Ponto	Localização geográfica	Situação
#		

ANEXO 3 - SÍNTAXE DAS REGRAS FUZZY



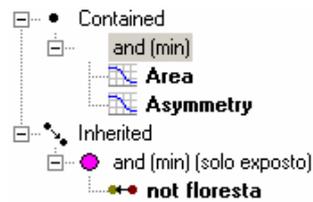
Classe= **FLORESTA**
 Descritor= **diferença do valor médio da banda para a cena**



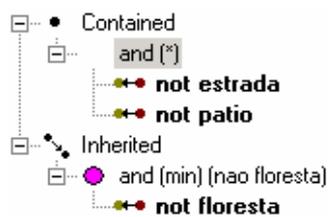
Classe= **NÃO FLORESTA**
 Descritor= **não floresta**



Classe= **ESTRADA**
 Descritor= **assimetria**
 Herança= **não floresta**



Classe= **PÁTIO**
 Descritor= **área**
 Herança= **não floresta**



Classe= **NUVEM**
 Descritor= **não estrada e não pátio**
 Herança= **não floresta**



Classe Hierárquica