

MOACIR ALBERTO ASSIS CAMPOS

**PADRÃO E DINÂMICA DE FLORESTA TROPICAL, ATRAVÉS DE
CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO E DA ANÁLISE DA
PAISAGEM COM IMAGENS LANDSAT**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Dra. Christel Lingnau

Co-Orientador: Dr. Nelson Carlos Rosot

CURITIBA

2005

MOACIR ALBERTO ASSIS CAMPOS

**PADRÃO E DINÂMICA DE FLORESTA TROPICAL, ATRAVÉS DE
CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO E DA ANÁLISE DA
PAISAGEM COM IMAGENS LANDSAT**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Dra. Christel Lingnau

Co-Orientador: Dr. Nelson Carlos Rosot

CURITIBA

2005

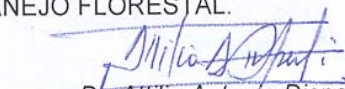


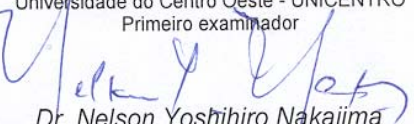
Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

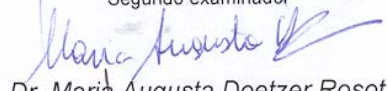
PARECER


Defesa nº. 623

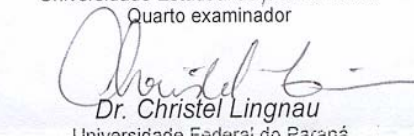
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) doutorando(a) *Moacir Alberto Assis Campos* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**Padrão e Dinâmica de Floresta Tropical Amazônica, através da Classificação Orientada a Objeto e Análise da Paisagem com Imagens Landsat.**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **MANEJO FLORESTAL**.


Dr. Attilio Antonio Disperati
Universidade do Centro Oeste - UNICENTRO
Primeiro examinador


Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima
Fundação Universidade Regional de Blumenau
Segundo examinador



Dr. Maria Augusta Doetzer Rosot
Embrapa/Florestas
Terceiro examinador


Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Quarto examinador


Dr. Christel Lingnau
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 26 de agosto de 2005.


Graciela Ines Bolzon de Muniz
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Carlos Roberto Sanquetta
Vice-Coodenador do Curso

A Rosineia, Levi e André

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao ALTÍSSIMO, o princípio e o fim de todas as coisas.

A professora Doutora CHRISTEL LINGNAU pelo seu trabalho de orientação e ao professor Dr. NELSON ROSOT pela co-orientação.

A Dra. MARIA LUCIA ABSY pelo empenho e sucesso na obtenção de uma bolsa de estudos junto ao CNPq.

Ao CNPq pela concessão da Bolsa e taxa de bancada.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA na pessoa de seus diretores, coordenadores de pesquisas e pessoal de apoio por promoverem e dar suporte à formação dos seus pesquisadores.

Aos professores FLÁVIO KIRCHNER e HENRIQUE KOEHLER pela presença referência e consideração.

A Coordenadora do Curso GRAZIELA INÊS BOLZÓN DE MUÑIZ e ao seu pessoal de apoio REINALDO, ELINOR e DAVID.

Aos irmãos do grupo familiar Ágape e Shamah pelo suporte espiritual que foi muito importante para alcançar esta meta.

Ao Dr. UBIRATAN OLIVEIRA que resolveu ser meu amigo, companheiro, advogado e a Morah sua esposa.

Aos amigos ADILSON AMARO ALVES e sua esposa NEUSA, CARLOS MARCHIORATO e sua esposa ROSÂNGELA e ao DÉLCIO HONÓRIO e sua esposa REGINA.

Aos colegas do curso de pós-graduação e do LABGEO (EGON WILDAUER, FRANCISCA DIONÍSIA DE ALMEIDA MATOS, KEYLAH MARA, MARCOS ALVES E PYRAMON ACCIOLY) pelo companheirismo e apoio, fundamentais nas horas mais difíceis.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu mantivesse os focos e esperaram de mim o melhor e se alegraram com minha vitória.

Que darei ao Senhor por todos os seus
benefícios para comigo?
Tomarei o cálice da salvação e
invocarei o nome do Senhor.
(Salmos 116: 12-13)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE QUADROS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO	4
2.1.1 O Paradigma da Orientação a Objeto	5
2.1.2 A Segmentação de Imagens para Mapeamento da Cobertura do Solo	7
2.1.3 A Teoria de Conjuntos Fuzzy na Classificação Digital de Imagens	11
2.1.3.1 Operadores <i>Fuzzy</i>	14
2.1.3.2 Aplicações da lógica <i>fuzzy</i> na análise de imagens digitais	15
2.1.4 O Algoritmo do Programa eCognition	16
2.2 ANÁLISE DA PAISAGEM	18
2.2.1 A Ecologia da Paisagem	19
2.2.2 Conceitos e Terminologia em Ecologia da Paisagem	20
2.2.3 Índices da Paisagem	22
2.2.4 Dimensão fractal	23
3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	26
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
3.1.1 Cobertura Original do Solo	28
3.1.2 Solo e Clima	28
3.2 BASE DE DADOS	29
3.2.1 Correção Geométrica e Registro de Imagens	30
4 METODOLOGIA	31
4.1 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO	31
4.1.1 Segmentação	31
4.1.1.1 O parâmetro de escala	32
4.1.1.2 Os critérios mistos de heterogeneidade	33
4.1.2 Classificação Orientada a Objeto	35
4.1.3 Avaliação da Acurácia	41
4.2 ANÁLISE DA PAISAGEM	43
4.2.1 Dimensão Fractal	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO	47
5.1.1 Segmentação	47
5.1.1.1 Parâmetros de escala	48
5.1.1.2 Critérios de homogeneidade	48

5.1.1.3 Aspectos relevantes da segmentação	52
5.1.2 Classificação Orientada a Objeto	54
5.1.2.1 Níveis hierárquicos	54
5.1.2.2 Grupos	54
5.1.2.3 Descritores de classe	56
5.1.2.4 Classificação	58
5.1.3 Acurácia da Classificação	60
5.2 ANÁLISE DA PAISAGEM	62
5.2.1 Índices da paisagem	62
5.2.1.1 Tamanho e densidade da paisagem	62
5.2.1.2 Borda e forma da paisagem	65
5.2.1.3 Contágio e nível de dispersão e justaposição da paisagem	68
5.2.2 Índices por classes de cobertura do terreno	69
5.2.2.1 Tamanho e densidade por classe de cobertura	69
5.2.2.2 Borda e forma por classe de cobertura	76
5.2.2.3 Nível de difusão e justaposição	82
5.2.3 Dimensão Fractal	83
5.2.3.1 Dimensão fractal da paisagem	83
5.2.3.2 Dimensão fractal das classes de cobertura	85
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
REFERÊNCIAS	90
ANEXOS	98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA DOS OBJETOS DE IMAGENS COM TRÊS NÍVEIS	17
FIGURA 2 - COMPARAÇÃO DE MEDIÇÕES DOS QUADRADOS ($D=1$) E REGIÕES DE KOCH ($D=3/2$)	24
FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
FIGURA 4 - PADRÃO DO SISTEMA VIÁRIO NO DISTRITO AGROPECUÁRIO	27
FIGURA 5 - ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO	36
FIGURA 6 - EXEMPLO DA CLASSIFICAÇÃO POR VIZINHO MAIS PRÓXIMO	37
FIGURA 7 - AMOSTRA DO RESULTADO DA SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT DE 1999	49
FIGURA 8 - HIERARQUIA DE CLASSES ELABORADA PARA CLASSIFICAÇÃO NO Ecognition	55
FIGURA 9 - AGRUPAMENTO DAS CLASSES DE ACORDO COM SISTEMA IBGE	56
FIGURA 10 - AMOSTRA DAS IMAGENS CLASSIFICADAS	59
FIGURA 11 - NÚMERO DE UNIDADES DE PAISAGEM DAS CLASSES DE FLORESTA E SUCESSÃO SECUNDÁRIA	74
FIGURA 12 - QUANTIDADE E DENSIDADE DE BORDA DA FLORESTA DE TERRAS BAIXAS	76
FIGURA 13 - QUANTIDADE E DENSIDADE DE BORDA DA FLORESTA ALUVIAL(a) E FLORESTA ALTERADA (b)	77
FIGURA 14 - QUANTIDADE E DENSIDADE DE BORDA DA SUCESSÃO SECUNDÁRIA INTERMEDIÁRIA (a) E INICIAL (b)	78
FIGURA 15 - QUANTIDADE DE BORDA E DENSIDADE DA SUCESSÃO SECUNDÁRIA ALTERADA	79
FIGURA 16 - ÍNDICE DE FORMA DAS CLASSES DE COBERTURA	79
FIGURA 17 - ÍNDICE DE FORMA MÉDIO DAS CLASSES DE COBERTURA	81
FIGURA 18 - ÍNDICE DE FORMA PONDERADO DAS CLASSES DE COBERTURA	81
FIGURA 19 - ÍNDICE DE DIFUSÃO E JUSTAPOSIÇÃO POR CLASSE DE COBERTURA DO TERRENO	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTATÍSTICA DA DIFERENÇA ENTRE O PRIMEIRO E O SEGUNDO RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO PARA IMAGEM DE 1999	61
TABELA 2 - ÍNDICES DE ÁREA, DENSIDADE E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA A PAISAGEM TOTAL	63
TABELA 3 - ÍNDICES DE BORDA E DENSIDADE DE BORDA DA PAISAGEM TOTAL	66
TABELA 4 - ÍNDICES DE FORMA E VARIAÇÕES DA PAISAGEM TOTAL NOS ANOS 1999, 2001 E 2003 ...	67
TABELA 5 - CONTÁGIO E NÍVEL DE DIFUSÃO E JUSTAPOSIÇÃO DA PAISAGEM	69
TABELA 6 - ÍNDICES DE ÁREA EM HECTARES E PORCENTAGEM DE COBERTURA DAS CLASSES	70
TABELA 7 - DENSIDADE EM 100 HECTARES POR CLASSE DE COBERTURA DO TERRENO	75
TABELA 8 - DIMENSÃO FRACTAL DA PAISAGEM TOTAL OBTIDA POR ANÁLISE DE REGRESSÃO E MÉDIA DAS UNIDADES DE PAISAGEM, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .	83
TABELA 9 - DIMENSÃO FRACTAL DAS CLASSES DE COBERTURA DO SOLO NOS ANOS DE 1999, 2001 E 2003	85

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS UTILIZADAS NESTE ESTUDO	29
QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DAS CLASSES DE COBERTURA UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	39

RESUMO

Esta pesquisa trata da análise de paisagem a partir da classificação orientada a objeto, com o objetivo de avaliar o padrão e a dinâmica espacial da fragmentação da paisagem em área do Distrito Agropecuário da SUFRAMA, Manaus-AM, localizada entre 2° 28'48" e 3° 1'19" de latitude Sul e 59°47'29" e 60°27'54" de longitude Oeste. Os objetivos específicos foram: mapear a cobertura do terreno através da classificação orientada a objeto, utilizando segmentação hierárquica, algoritmo baseado em lógica *fuzzy* e sistema especialista; avaliar o uso da classificação orientada a objeto de imagens Landsat na região amazônica; analisar a estrutura da paisagem e determinar as mudanças ocorridas nos períodos de 1999 a 2001 e de 2001 a 2003. A classificação utilizou a informação espectral, de contexto e de forma a partir de uma base de conhecimento com classes hierárquicas e descritores para gerar os mapas temáticos. Os resultados da classificação foram usados para análise da paisagem. A segmentação potencializou a extração de informações utilizadas na classificação. O banco de conhecimentos foi estruturado em três níveis, sendo dois auxiliares e um intermediário onde foi efetuada a classificação final. A análise da paisagem foi realizada para a paisagem total e individualmente para as classes de cobertura do terreno. Os resultados obtidos indicam que a área possui uma unidade de paisagem dominante, pouco fragmentada, que é a floresta. Verificou-se que a floresta apresentou uma redução de 2,5% no tamanho da sua área no período. Constatou-se, também o aumento do número de unidades de paisagem (674) e quantidade de bordas (2%) indicando que há um claro processo de fragmentação em andamento. O índice de contágio baixou de 85,3% em 1999 para 82,1%, em 2003. A floresta apresenta um *nível de difusão e justaposição* que alcança um valor máximo de 78%, em 2003. Além disso, o aumento de bordas e sua complexidade, revelada nos índices de forma e dimensão fractal configuram uma área em que as unidades de paisagem estão em contato com a floresta. Portanto, o processo de desflorestamento ocorre a partir dos limites das unidades de paisagem com florestas. Os principais índices usados para descrever esta configuração foram *contágio, nível de difusão e justaposição*, índices de forma e dimensão fractal.

Palavras chaves: classificação orientada a objeto, análise de paisagem, fractais.

ABSTRACT

This research deals with landscape analysis using the results of an object oriented image classification to evaluate the pattern and spatial dynamic of land cover fragmentation, in a region North of Manaus, Amazon, between 2° 28'48" and 3° 1'19" South and 59°47'29" to 60°27'54" West. The objectives were to map land cover by object oriented classification, using hierarchic segmentation, and an algorithm based on fuzzy logic, and a knowledge base; to evaluate the Landsat image classification for the Amazon region and analyze the landscape structure and changes from 1999 to 2001 and from 2001 to 2003. The classification used spectral, spatial and shape information from the knowledge base set up with hierarchic classes and descriptors based on fuzzy to generate the thematic maps. Classification results were used to perform the landscape analysis. Segmentation improved the extraction capabilities for the classification. The knowledge base was structured with three levels: two to support the classification and an intermediate level where the final classification was performed. Analysis at landscape and class level indicates that the area has a dominant forest patch and small ones spread through the entire landscape. Forest cover presented a reduction of 2.5%. An increase in the number of patches (674) and amount of border (2%) was detected revealing an ongoing fragmentation process. *Contagion* index decreased from 85.3% in 1999 to 82.1 in 2003. Forest patches presented an *interspersion and juxtaposition index (IJI)* reaching 78% in 2003. In addition, increasing in amount of borders and complexity, as demonstrated by shape index and fractal dimension, show the configuration of a landscape with most of patches adjacent to pristine forest. Therefore, the deforestation process is taking place in the boundaries of the forest patches. The main indexes used to describe this configuration were *contagion*, *IJI*, shape indexes and fractal dimension.

Key words: *object oriented classification, landscape analysis, fractal.*

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia vem sendo foco de atenção por parte de todos os segmentos da sociedade, incluindo governo, organizações não governamentais e ambientalistas. A ocupação dessa região, visando o seu desenvolvimento, tem sido baseada em paradigmas que não encontram respaldo na peculiaridade de suas características ecológicas e sócio-econômicas. Por esta razão, a degradação do meio ambiente e a conseqüente perda de biodiversidade têm sido tema de estudos por parte dos diversos segmentos da sociedade no Brasil e até no exterior.

Um dos principais agentes deste processo é o próprio governo, nas esferas federal e estadual, através de políticas equivocadas, baseadas em incentivos fiscais e tecnologias inapropriadas e sem uma legislação adequada para conservação das florestas. Além disso, as limitações de toda ordem por parte do órgão governamental responsável pela fiscalização, facilitam a ocorrência de toda sorte de ilegalidade desde a ocupação e uso do terreno até a comercialização de produtos florestais.

O processo de ocupação do terreno — a despeito do uso que lhe será dado — começa geralmente com a exploração seletiva das principais espécies florestais do mercado. Em seguida vem o desflorestamento (corte raso) e queima como forma de preparo do solo. Este processo geralmente ignora os aspectos da legislação e princípios básicos de conservação como a preservação de florestas ao longo dos rios ou de encostas.

Empresas, órgãos federais e agricultores usaram o desmatamento e queima freqüentemente no uso de terras no Distrito Agropecuário da SUFRAMA (DAS), ao Norte de Manaus. Como resultado, após alguns anos, verificou-se a existência de uma variedade de fragmentos de florestas com diferentes tamanhos e estágios de sucessão, pastagens e agricultura. As unidades de conservação, reservas ou equivalentes existentes na área sofreram imensa pressão, tendo seu estado original de isolamento alterado, tornando-se alvo de exploradores de madeira, caçadores e extrativistas. As estradas de acesso vêm aumentando em número e qualidade e possuem um papel importante no processo de colonização de novas áreas.

Sabe-se que a intensidade de uso e o tempo são fatores básicos na configuração da cobertura do terreno que tomará lugar após o abandono da área. De igual modo, a proximidade da floresta pode determinar a disponibilidade de propágulos para manutenção da biodiversidade em áreas exploradas e resultar em aspectos diferenciados na paisagem. Apesar disso não existe ainda uma abordagem prática para avaliar a estrutura e as mudanças ocorridas na área, nem projeções futuras em função de informações atuais ou passadas.

A tecnologia do sensoriamento remoto tem sido reportada como extremamente vantajosa neste tipo de abordagem pela sua capacidade de abranger grandes áreas. Além disso, a coleta de dados repetida sistematicamente por sensores é fundamental para o estudo de mudanças, onde poderão ser avaliados os aspectos sobre resolução espectral e espacial. O uso do sensoriamento remoto em florestas tropicais amazônicas vem sendo testado por diversos estudiosos para avaliação do desflorestamento (NEPSTAD et al., 1999; NOVO e SHIMABUKURO, 1997; SHIMABUKURO et al., 1998; MANTOVANI e SETZER, 1997; CONWAY; EVA; D' SOUZA, 1996), mapeamento de ecossistemas ou vegetação (TOWNSHEND; JUSTICE; KALB, 1987; HILL e FOODY, 1994; FOODY et al., 1996; BRONDÍZIO et al., 1996), mapeamento de áreas atingidas pelo fogo (NEPSTAD et al., 1999; COCHRANE e SOUZA Jr., 1998), além de estudos ligados a mudanças climáticas (ZERBINI; ÂNGELO; SANTOS, 1995; LBA, 2002; CEOS, 2002).

A pesquisa proposta procurou responder as seguintes questões: Qual o grau de mudança ocorrida na área nos últimos anos ao nível da paisagem e classes de cobertura do terreno? Quais os índices que descrevem melhor as características da paisagem? Qual foi o impacto sobre a cobertura florestal devido às mudanças?

O estudo gerou informações temáticas digitais e metodologia que podem ser aplicadas no processo de conservação dos recursos naturais e, conseqüentemente, na avaliação da biodiversidade. O planejamento do uso dos recursos deve ser realizado com base nas informações sobre a situação atual da fragmentação, semelhantes àquelas geradas neste trabalho. No futuro, o acréscimo de novas informações sobre os

processos tecnológicos e socioeconômicos envolvidos e cenários futuros, pode diminuir a pressão sobre a floresta, garantindo a conservação da cobertura florestal.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o padrão e a dinâmica espacial da fragmentação da paisagem em área do Distrito Agropecuário da SUFRAMA, Manaus, Amazonas, com ênfase à cobertura florestal, utilizando classificação orientada a objeto e análise espacial da paisagem nos anos de 1999, 2001 e 2003.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- a) mapear a cobertura do terreno através da classificação orientada a objeto, utilizando segmentação hierárquica, algoritmo baseado em lógica fuzzy e sistema especialista;
- b) avaliar a classificação orientada a objeto de imagens Landsat na região amazônica;
- c) analisar a estrutura da paisagem e determinar as mudanças ocorridas na área no período de 1999 a 2003;
- d) avaliar os índices que melhor descrevem a estrutura e as mudanças ocorridas na paisagem.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO

As ações para a restauração, conservação e manejo de florestas tropicais devem ser baseadas no dimensionamento do desflorestamento e das mudanças na cobertura do terreno e deve conter indicativos do tipo e intensidade de uso e padrões espaciais. Este enfoque permite o planejamento das atividades de restauração, conservação ou manejo com base no histórico da área e na intensidade de mudanças ocorridas. Além disso, fornece o suporte à decisão e execução de medidas mitigadoras para os processos de degradação ambiental em estágio avançado. O sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica (SIG) associados à crescente capacidade de processamento dos computadores pessoais devem ser utilizados mais amplamente para este tipo de estudo.

Atualmente, a classificação multiespectral de imagens de satélite pode ser realizada usando-se uma variedade de algoritmos, incluindo classificação convencional supervisionada ou não-supervisionada, classificação usando lógica *fuzzy* e/ou métodos híbridos, freqüentemente envolvendo o uso de informações auxiliares (JENSEN, 1996; RICHARDS e JIA, 1999).

A informação espacial — ou seja, o contexto — contida na imagem não é usada em algoritmos para classificação espectral. Este tipo de classificação, devido às suas limitações, vem dando lugar a processos que visam o uso de informações contextuais e menor rigidez na atribuição dos pixels às classes.

Nas últimas décadas, métodos de classificação que usam a informação espacial ou contextual e a espectral foram desenvolvidos para resolver os problemas inerentes à classificação que utiliza somente a informação espectral (LOBO; CHIC; CASTERAD, 1996; HUTCHINSON, 1982). Uma destas abordagens é a segmentação de imagem, como passo anterior à classificação. Por outro lado, a teoria de conjuntos *fuzzy* se tornou uma ferramenta alternativa à classificação convencional, por permitir a descrição de aspectos imprecisos ou graduais da natureza, de maneira mais apropriada.

Métodos que utilizem a informação espacial e gerem polígonos que podem ser diretamente usados na análise espacial, são importantes à medida que as informações sobre a cobertura do terreno são obtidas a partir da descrição destes polígonos e sua topologia.

O processo de classificação orientada a objeto utiliza os *polígonos* gerados na segmentação como *objetos de imagem*. As características espectrais, de forma e relações de vizinhança são as informações utilizadas na descrição destes objetos. A partir destes descritores os *objetos* podem ser agrupados em categorias com significado ou em classes temáticas (DEFINIENS, 2001).

A segmentação prévia das imagens e o uso de lógica *fuzzy* na classificação orientada a objeto aproximam-se do processo cognitivo humano, podendo melhorar significativamente a qualidade de um mapeamento automático como consequência da classificação mais acurada. Deste modo, uma grande parte das informações necessárias para o manejo e conservação dos recursos naturais podem ser extraídas de imagens pelo processo digital da classificação automática orientada a objeto. O mapa assim obtido pode ser utilizado em um sistema de informações geográficas para análise espacial, aplicada na análise de impacto ambiental, monitoramento da cobertura vegetal e estudos da paisagem.

2.1.1 O Paradigma da Orientação a Objeto

Segundo MEDEIROS (1999) o termo *orientação a objetos* denota um paradigma de trabalho que vem sendo utilizado de forma ampla para o projeto e implementação de sistemas computacionais. De fato, o paradigma da *orientação a objeto* encontra a sua maior expressão na elaboração de programas de computadores. É a partir dos conceitos ali desenvolvidos que se podem inferir suas principais características e potencial de uso nas mais variadas disciplinas. Não existe uma única e concisa definição do termo e ao mesmo tempo, uma terminologia definida e aceita por todos não foi adotada. A idéia geral da abordagem de *orientação a objetos* é aplicar as técnicas de classificação por divisão ou agrupamento. Entre os conceitos fundamentais

em orientação-a-objetos destacam-se os conceitos de *classe* e *objeto* e relacionamentos.

De acordo com BOOCH, RUMBAUGH e JACOBSON (2000) *classe* é uma descrição de um conjunto de objetos que compartilham os mesmos atributos, operações, relacionamentos e semântica. Uma *classe* pode ser definida como um molde básico, uma espécie de “forma” onde se reúnem os objetos com certas propriedades comuns ou identificáveis no molde básico.

Segundo MEDEIROS (1999) um *objeto* denota uma entidade capaz de ser individualizada, única, com atributos próprios, porém com pelo menos as mesmas propriedades da *classe* que lhe deu origem, ou melhor, um *objeto* é uma “materialização” ou instanciação da *classe*. O mesmo autor complementa que para uma análise mais completa, é muito útil reconhecer *sub-classes*, derivadas de uma *classe* básica, que permitem uma análise mais detalhada. A este mecanismo dá-se o nome de *especialização* ou *divisão*. No processo de *especialização*, as *classes* derivadas herdam as propriedades das *classes* básicas, acrescentando novos atributos que serão específicos destas novas *classes*.

O outro mecanismo fundamental da teoria de *orientação a objetos* é a *agregação* ou *composição*. Um objeto composto ou objeto complexo é formado por agrupamento de objetos de tipos diferentes. O relacionamento de agregação, também chamado de relacionamento “parte-de” permite combinar vários objetos para formar um objeto de nível semântico superior, no qual cada parte tem funcionalidade própria (ANTUNES, 2003).

A classificação orientada a objeto (COO) de imagens digitais, conforme implementada no *software* eCognition e aplicada no presente trabalho, assume estes conceitos, aplicando-os em seus algoritmos de classificação, a partir da segmentação da imagem. Sendo assim, os objetos são os polígonos resultantes da segmentação. Se estes polígonos são agrupados ou subdivididos, formando regiões maiores e menores, tem-se aí uma relação hierárquica que é explorada pelo algoritmo. Classes obtidas a partir da rotulação destes objetos podem ser agrupadas formando classes de significado semântico superior. A subdivisão de uma classe pode gerar classes que

possuem os atributos herdados da classe mãe e atributos específicos que lhe dão identidade única.

2.1.2 A Segmentação de Imagens para Mapeamento da Cobertura do Solo

Geralmente o primeiro passo em análise de imagens é a segmentação da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2000). A segmentação subdivide uma imagem em suas partes ou objetos constituintes. O nível até onde esta subdivisão deve ser realizada depende do problema a ser resolvido. A segmentação fornece dados de entrada para classificação e interpretação baseadas em polígonos. As regiões homogêneas geradas pela segmentação podem ser classificadas em categorias com maior acurácia do que poderiam ter através da classificação convencional (BÈNIÉ; THOMSON; GOLDBERG, 1989; KALLURI et al., 2000).

No processo de segmentação, os pixels devem ser agrupados em regiões que possam ser discriminadas por uma propriedade comum ou por um conjunto de propriedades em comum. Para determinadas aplicações em sensoriamento, é necessário delinear-se bordas ou regiões da imagem bem definidas, bem localizadas, sub-regiões coerentes e preservação dos dados espectrais dentro das regiões segmentadas (ACTON, 1996). Uma vez que a imagem é repartida em regiões, cada região pode ser atribuída a um tema dentro da cobertura do terreno ou da classe de vegetação (ABEYTA e FRANKLIN, 1998).

A categorização das técnicas de segmentação foi abordada por vários autores e todas guardam semelhanças entre si. GONZALEZ e WOODS (2000) afirmam que os algoritmos de segmentação para imagens monocromáticas são geralmente baseados em uma das seguintes propriedades básicas de valores de níveis de cinza: descontinuidade e similaridade. Na primeira categoria, o método consiste em subdividir a imagem, tendo por base mudanças bruscas nos níveis de cinza. As principais áreas de interesse nessa categoria são a detecção de pontos isolados e detecção de linhas e bordas na imagem. Na segunda categoria os métodos baseiam-se em limiarização, crescimento de regiões e na divisão e fusão de regiões.

Técnicas variadas de segmentação foram testadas com imagens de sensoriamento remoto, fornecendo resultados relevantes. Estas técnicas são classificadas em três tipos principais: métodos baseados em região, métodos baseados em bordas e combinações híbridas dos dois tipos que podem ser reduzidas a duas categorias amplas se são considerados apenas os métodos para criação dos segmentos: criação de limites e crescimento de regiões (BÈNIÉ; THOMSON; GOLDBERG, 1989; SHANDLEY; FRANKLIN; WHITE, 1996).

A estratégia usada nos algoritmos baseada em crescimento de regiões é agregar pixels similares para formar diferentes segmentos. A estratégia em algoritmos baseados em bordas é encontrar os limites de objetos e segmentar as regiões que se encontram dentro destes limites. Estes métodos precisam usar operadores de bordas específicos que as enfatizam antes da segmentação. Métodos híbridos usam a informação da borda para definir os limites do objeto e ao mesmo tempo usam a informação da intensidade para preencher lacunas dentro dos limites (BÈNIÉ; THOMSON; GOLDBERG, 1989).

De acordo com pesquisas recentes em compressão de imagens, a segmentação de imagens divide-se em dois domínios principais: métodos conduzidos pelo conhecimento prévio (*top-down*) versus métodos conduzidos por dados (*bottom-up*). Em métodos *top-down* o usuário já sabe o que quer extrair da imagem, mas não sabe como proceder a extração. Elaborando um modelo dos objetos de interesse, o sistema tenta encontrar o(s) melhor(e) método(s) de processamento para extraí-los. O modelo do objeto fornece implicitamente o significado do objeto. Nos métodos *bottom-up* os segmentos são gerados baseados em um conjunto de métodos estatísticos e parâmetros para processar toda a imagem (DEFINIENS, 2001).

Métodos *bottom-up* também podem ser vistos como um tipo de abstração de dados ou compressão de dados. Porém, como nos métodos de agrupamento, os segmentos de imagem não possuem significado, de modo que poderiam ser chamados mais apropriadamente de *elementos formadores* de objetos de imagem. Fica a critério do usuário determinar que tipo de objeto do mundo real os objetos gerados representam. A diferença básica entre as duas abordagens é: métodos *top-down*

conduzem a resultados locais porque eles apenas marcam pixels ou regiões que satisfazem a descrição do modelo, enquanto métodos *bottom-up* realizam a segmentação completa da imagem, agregando pixels em agrupamentos espaciais que satisfazem certos critérios de homogeneidade e heterogeneidade (DEFINIENS, 2001).

A segmentação prévia da imagem visando a classificação automática foi testada por vários pesquisadores, utilizando imagens de satélite e combinações variadas. Os algoritmos testados podem ser enquadrados em uma das categorias apresentadas anteriormente e todos demandam inúmeras tentativas no uso de parâmetros que controlam o processo de segmentação. Uma avaliação final do usuário é fundamental.

A composição colorida (TM 4, 3, 2) e combinações com imagens exposição do terreno, textura, componentes principais e índice de vegetação foram utilizadas para testar o desempenho do algoritmo de Woodcock e Harward na delimitação de áreas de uma bacia em um parque ao sul da Califórnia. A acurácia dos mapas de classes baseados na segmentação foi significativamente maior do que a acurácia do mapa obtido da classificação convencional (SHANDLEY; FRANKLIN; WHITE, 1996).

A segmentação de imagens Landsat TM, baseada em crescimento de regiões, mostrou-se eficaz na estimativa das áreas desflorestadas e mapeamento da cobertura do terreno na Amazônia. O uso de imagens frações reduziu o tempo de processamento em relação às técnicas tradicionais. Todavia, os valores de acurácia total foram relativamente baixos, ficando entre 84 e 90% considerando-se quatro classes temáticas de interesse (floresta, capoeira, pastagem e solo nu), subindo para 93 e 94%, quando as classes se restringem a floresta primária e não-floresta (ALMEIDA FILHO; NASCIMENTO; BATISTA, 1998). Uma técnica para mapeamento das mudanças de uso e cobertura do terreno baseada em segmentação foi desenvolvida por ALVES et al. (1996) e usada em imagens de Rondônia. Os autores afirmam que o resultado foi melhor visualmente quando a segmentação foi usada, por outro lado dependem ainda da verificação mais extensa em campo.

Para avaliar a acurácia da segmentação em delimitar áreas em um ambiente desértico na Califórnia, mapas de vegetação foram produzidos a partir de segmentação baseada em crescimento de regiões. Imagens Landsat TM, Componentes Principais de uma série temporal e textura da imagem foram testadas. A acurácia do produtor foi maior do que 90% para a localização dos limites de vegetação quando comparadas com amostras de campo (ABEYTA e FRANKLIN, 1998).

A estimativa de volumes de madeira a partir de imagens Landsat TM foi avaliada através da aplicação de dois algoritmos de segmentação para extração das informações espectrais em parcelas amostrais do inventário nacional na Finlândia. O método tradicional, que utiliza o pixel central da parcela amostral e seus vizinhos, forneceu estimativas de menor qualidade do que o método que utilizou a segmentação para definir a vizinhança (MÄKELÄ e PEKKARINEN, 2001).

De um modo geral, a aplicação de algoritmos para a segmentação de imagens do sensoriamento remoto, para uma posterior classificação automática, tem sido satisfatória. O aumento da acurácia tem sido freqüentemente relatado, além dos aspectos vantajosos sobre a classificação baseada no pixel. Como consequência alguns *software* comerciais para geoprocessamento incorporaram esta opção para processamento

O algoritmo de segmentação do SPRING — software desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) — depende da definição de duas variáveis: do grau de similaridade e do tamanho mínimo para o estabelecimento da região. O crescimento de regiões é uma técnica de agrupamento de dados na qual somente regiões adjacentes podem ser agrupadas. Inicialmente o processo de segmentação designa cada pixel como existente em uma região separada. Em seguida pixels com valores similares (diferença inferior ao limiar definido pelo usuário) são agrupados com base em teste de hipótese estatística, usando a média das regiões. Com base nisto, a imagem é repartida em sub-imagens as quais são reagrupadas de acordo com o limiar de agregação (o menor tamanho aceitável para uma sub-região), também definido pelo usuário (INPE, 1996).

O algoritmo de Woodcock e Harward foi desenvolvido para delimitar regiões estáveis em uma imagem, através do controle de um número de parâmetros, incluindo a taxa de fusão dos pixels, o grau de fusão e tamanhos mínimo e máximo da região. A imagem é percorrida e o valor de cada pixel é comparado (baseado em um limiar) com os segmentos vizinhos existentes. A fusão dos segmentos é realizada iterativamente, sendo que a taxa de fusão é controlada cuidadosamente pelo limiar fornecido pelo usuário (SHANDLEY; FRANKLIN; WHITE, 1996).

KALLURI et al. (2000) descreve, entre outros algoritmos para análise da dinâmica da cobertura da terra, um algoritmo de segmentação baseado em crescimento de regiões que pode ser usado para efetuar uma hierarquia de imagens com regiões rotuladas. No nível mais baixo da hierarquia uma região contém um conjunto de pixels conectados com critério de similaridade rigorosa. À medida que um nível superior da hierarquia é alcançado, o critério de similaridade torna-se menos rigoroso e regiões similares se fundem. O autor não apresenta mais detalhes, apenas enfatiza a necessidade de pré-processamento, através de filtros, para obtenção de melhores resultados. O filtro *SNF* (*Symmetric Neighborhood Filter*) desenvolvido especificamente para o trabalho em questão suaviza pixels no interior de uma região a um nível quase homogêneo, preserva as bordas e realça transições imprecisas (KALLURI et al., 2000).

2.1.3 A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* na Classificação Digital de Imagens

Normalmente usa-se a teoria dos conjuntos clássicos para classificar dados do sensoriamento remoto em classes de informação discretas e homogêneas, ignorando-se o fato de que no mundo real as fronteiras entre estas classes não são tão rígidas ou precisas. Um sensor normalmente registra o fluxo radiante refletido ou emitido de uma mistura heterogênea de materiais biofísicos tais como solo, água e vegetação. Da mesma forma, as classes de cobertura do terreno possuem uma gradação de uma para outra sem limites precisos e rígidos (WANG, 1990a; LAM, 1990).

Por exemplo, a paisagem típica na calha do rio Negro, no Estado do Amazonas, apresenta uma transição gradual da água para igapó (floresta inundada) e para a floresta de terra-firme. Normalmente quanto mais fechado for o dossel, maior a quantidade de energia infravermelha refletida ao longo deste contínuo. De igual modo, quanto maior a proporção de água em um pixel, mais energia infravermelha é absorvida. Uma abordagem clássica na classificação de uma faixa de terra englobando estes três ecossistemas, criaria classes discretas com limites de classes específicos sem nenhuma situação intermediária. Porém, sabe-se que existem transições graduais e pixels mistos ao longo dos limites de classes.

A lógica de classificação baseada nos conjuntos *fuzzy* leva em consideração a natureza imprecisa e heterogênea do mundo real. Pode ser usada em combinação com algoritmos de classificação supervisionada e não-supervisionada.

Ao invés de ser designado a uma única classe, entre todas as classes possíveis, cada pixel na classificação *fuzzy* tem m valores de graus de participação, cada um associado a sua probabilidade (ou correlação) com as classes de interesse. Esta informação pode ser usada pelo analista para extrair informações mais precisas sobre a cobertura do terreno, especialmente sobre a formação de pixels mistos (WANG, 1990b; FOODY, 1992; JENSEN, 1996).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* fornece algumas ferramentas úteis para se trabalhar com dados imprecisos. Em alguns casos é mais adequada para lidar com problemas reais do que a lógica tradicional e conforme descrito por Jensen (1996) baseia-se no seguinte: Seja X um universo cujos elementos são denotados por x . Ou seja, $X = \{x\}$. A participação em um conjunto clássico A de X é visto freqüentemente como uma função binária característica x_A proveniente de $X\{0 \text{ ou } 1\}$ tal que $x_A(x) = 1$ se e somente se $x \in A$. Da mesma forma, um conjunto *fuzzy* B em X é caracterizado por uma função de participação f_B que associa a cada x , um número real que varia de 0 a 1.

Quanto mais próximo de 1, $f_{(b)}(x)$ estiver, mais x pertence a B . Um elemento do conjunto (neste caso um pixel) pode ter participações parciais em várias classes. No exemplo hipotético dado anteriormente, valores de brilho abaixo de 24 teriam um grau

de participação 1, para água; valores de brilho acima de 70 teriam um grau 1, para terra-firme, um valor de brilho 30, ter-se-ia 0,5 para água e 0,5 para igapó.

Com base no trabalho de WANG (1990a) que usou como exemplo e referência o algoritmo de máxima verossimilhança, pode-se perceber que partição do espaço de atributos é extremamente diferente. Ao invés de ser designado para uma única classe, o vetor de medição (desconhecido) possui um grau de participação que descreve sua proximidade dos vetores das médias de m classes de treinamento. A repartição *fuzzy* do espaço espectral é uma família de conjuntos *fuzzy* F_1, F_2, \dots, F_m , no universo X tal que para cada x que é um elemento de X :

$$0 \leq f_{F_i} \leq 1$$

$$\sum_{x \in X} f_{F_i}(x) > 0;$$

$$\sum_{i=1}^m f_{F_i}(x) = 1$$

Onde:

F_1, F_2, \dots, F_m = classes espectrais

X = todos os pixels

m = número de classes de treinamento

x = vetor de medição do pixel

f_{F_i} = função de participação do conjunto *fuzzy* F_i ($1 \leq i \leq m$)

A repartição *fuzzy* pode ser registrada em uma matriz de repartição *fuzzy* (WANG, 1990a).

$$\begin{bmatrix} f_{F_1}(x_1) & f_{F_1}(x_2) & \cdots & f_{F_1}(x_n) \\ f_{F_2}(x_1) & f_{F_2}(x_2) & \cdots & f_{F_2}(x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{F_m}(x_1) & f_{F_m}(x_2) & \cdots & f_{F_m}(x_n) \end{bmatrix}$$

Onde:

m = número de pixels

x_i = i -ésimo vetor do pixel ($1 \leq i \leq n$)

A lógica *fuzzy* pode ser usada para calcular a média e a covariância *fuzzy* (WANG, 1990a).

$$\mu_c^* = \frac{\sum_{i=1}^n f_c(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n f_c(x_i)}$$

Onde,

n = número total dos vetores de medição dos pixels da amostra.

f_c = função de participação da classe c

x_i = vetor de medição do pixel da amostra

A matriz covariância *fuzzy* V_c^* é calculada da seguinte forma (WANG 1990a):

$$V_c^* = \frac{\sum_{i=1}^n f_c(x_i) (x_i - \mu_c^*) (x_i - \mu_c^*)^T}{\sum_{i=1}^n f_c(x_i)}$$

Quando se calcula uma média *fuzzy* para classe c , um vetor do pixel da amostra x é multiplicado pelo seu grau de participação em c , $f_c(x)$ antes de ser adicionado à soma. Da mesma forma ao calcular a covariância para a classe c , $(x_i - \mu_c^*) (x_i - \mu_c^*)^T$ é multiplicado por $f_c(x)$ antes de ser somado. Para realizar a partição do espaço de atributos, uma função de participação tem que ser definida para cada classe.

2.1.3.1 Operadores *fuzzy*

A relação entre conjuntos *fuzzy* é definida por operadores lógicos. Estes operadores definem relações semelhantes àquelas existentes entre os conjuntos convencionais (FOODY, 1992). O operador mais simples é o *complemento*, que opera em um único conjunto. Um determinado conjunto A tem um complemento A^C , com função de participação definida por:

$$\mu A^C = 1 - \mu(A) \text{ (FOODY, 1992; INPE,1996)}$$

Um conjunto *fuzzy* contém um outro conjunto *fuzzy* se e somente se a função de participação para o primeiro conjunto for sempre maior ou igual àquela do segundo conjunto, para todo x no universo de discurso:

$$A \subset B \iff \mu(A) \geq \mu(B), \quad \forall x \in U \text{ (FOODY, 1992; INPE,1996)}$$

Dois operadores que envolvem vários conjuntos são a *união* \cup e a *intersecção* \cap . A *união* de dois conjuntos é definida como o conjunto que inclui todos os membros de cada conjunto, definida como:

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) \vee \mu(B) \text{ (FOODY, 1992; INPE,1996)}$$

O símbolo \wedge indica maximização. A *união* pode ser considerada como um *OU* lógico: a participação na união de dois conjuntos indica o grau no qual o elemento é um membro de um ou de outro conjunto.

O operador de *intersecção* \cap inversamente, pode ser considerado um *E* lógico, A intersecção de dois conjuntos contém somente aqueles membros que pertencem a ambos os conjuntos. Sua função de participação é definida como:

$$\mu(A \cap B) = \mu(A) \wedge \mu(B) \text{ (FOODY, 1992; INPE,1996)}$$

Onde:

\vee = minimização.

2.1.3.2 Aplicações da lógica *fuzzy* na análise de imagens digitais

Em trabalho pioneiro, WANG, (1990b) aplicou um algoritmo de classificação supervisionada em imagem Landsat TM, usando lógica *fuzzy* e obteve um

aumento de acurácia total. O autor afirma que as informações sobre a composição do pixel, também podem ser obtidas neste processo.

O algoritmo *Fuzzy-C Means* foi testado em dados de sensor aerotransportado (ATM) para uma região do Reino Unido. O objetivo foi avaliar a aplicabilidade da técnica na representação da vegetação local ao longo de um gradiente. Os resultados mostraram que as funções de participação *fuzzy* apresentam realmente uma relação sistemática com a composição do dossel, além de apresentarem 100% de acurácia (FOODY, 1992).

Os resultados da classificação “convencional” de imagens freqüentemente geram um modelo fraco da localização e distribuição da vegetação. A modelagem *fuzzy* da vegetação foi investigada através da comparação com outras representações derivadas de classificação convencional e redes neurais. A conclusão é de que os resultados de classificação “convencional” podem ser “suavizados” para fornecer informações que permitiriam modelar a vegetação mais adequadamente do que a classificação propriamente dita. Em seguida, as técnicas baseadas em conjuntos *fuzzy* permitem obter o grau de incerteza a ser modelado, à medida que for necessário (FOODY, 1996).

2.1.4 O Algoritmo do Programa eCognition

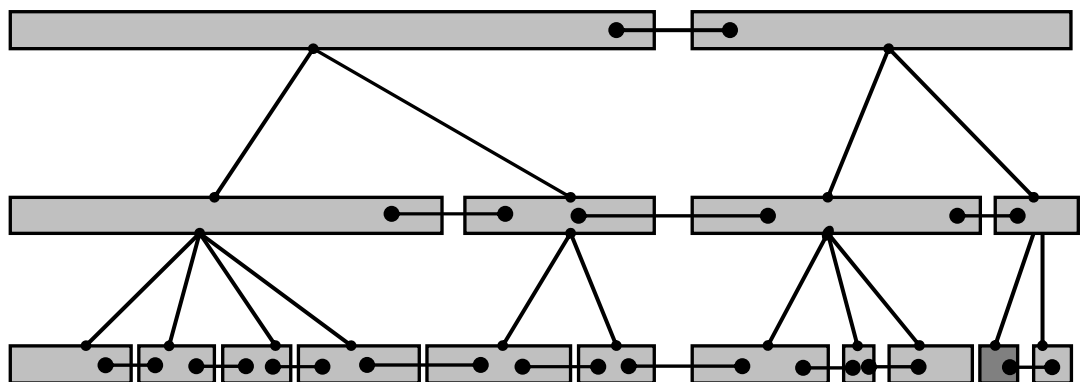
O procedimento para a segmentação do *software* eCognition baseia-se na possibilidade de gerar objetos de imagens em qualquer escala escolhida, permitindo vários níveis e suas conexões de forma hierárquica. Este processo é denominado segmentação multirresolução ou multiescala (DEFINIENS, 2001). É um processo de crescimento e fusão de regiões, onde cada pixel é uma semente. O parâmetro de escala controla o processo, limitando o tamanho médio dos objetos (segmentos) e a partir de pesos fornecidos pelo usuário faz otimizações quanto à heterogeneidade espectral e de forma. A forma é trabalhada em função da suavidade das bordas e da compacidade. Assim, podem ser gerados diferentes níveis de segmentação com objetos de tamanhos diferentes, com relações hierárquicas e de vizinhança conhecidas. Portanto,

informações sobre os objetos e suas relações em diferentes níveis de segmentação podem ser usadas na classificação para melhor discriminação das classes.

Várias opções para a segmentação no eCognition podem ser usadas para criação de uma rede hierárquica de objetos de imagem os quais representam informações sobre a imagem simultaneamente em diferentes resoluções espaciais. Os objetos de imagem são encadeados de maneira que cada objeto “conhece” seu contexto (vizinhança), seus superobjetos e seus subobjetos (Figura 1). Portanto é possível estabelecer relações entre objetos, como por exemplo, “borda relativa ou vizinhança a um objeto específico” e usar este tipo de informação contextual local.

A segmentação inicia com um pixel-objeto. Em numerosas etapas subseqüentes objetos menores são fundidos em outros maiores. Através de um processo de agrupamento, o processo de otimização minimiza a heterogeneidade ponderada nh dos objetos resultantes, onde n é o tamanho do segmento e h uma definição de heterogeneidade arbitrária. Em cada etapa, o par de objetos adjacentes sofre a fusão e pára somente quando o menor crescimento permitido pelo limiar definido pelo parâmetro de escala é superado.

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA DOS OBJETOS DE IMAGENS COM TRÊS NÍVEIS



FONTE: DEFINIENS (2001).

O eCognition tem sido utilizado em várias aplicações do sensoriamento remoto, principalmente na Europa onde foram realizados estudos sobre o potencial da segmentação em escalas múltiplas (SCHIEWE; TUFTE; EHLERS, 2001), vantagens da orientação a objeto na interface sensoriamento remoto - SIG (BLASCHKE e

STROBL, 2001) e aplicação de *banco de conhecimento* na classificação (BAUER e STEINNOCHER, 2001). Algumas aplicações foram relatadas em estudos urbanos como detecção de assentamento informal utilizando imagens Ikonos (HOFMANN, 2001). A facilidade de integração de diferentes dados (mapa cadastral, mapa de elevação) no processo também foi ressaltada (SCHIEWE; TUFTE; EHLERS, 2001; WILLHAUCK et al., 2000; SCHWARZ e WASER, 2001).

O Sistema de Monitoramento da Biodiversidade Européia utilizou a metodologia da orientação a objeto para extrair informações de imagens Landsat e IRS, obtendo resultados significativos (IVITS e KOCH, 2002). No que diz respeito a aplicação posterior em estudos de paisagem e análise de ecossistemas em múltiplas escalas, a metodologia vem apresentando vantagens sobre a tradicional análise baseada no pixel e outras alternativas como redes neurais, análise sub-pixel e modelos de mistura (BLASCHKE et al., 2000; BLASCHKE e HAY, 2002; IVITS e KOCH, 2002).

No Brasil, trabalhos recentes foram desenvolvidos para o norte do Estado do Paraná, em áreas agrícolas com pequenos remanescentes florestais. Imagens de alta resolução (Ikonos) foram usadas no mapeamento, visando estudos de bacias hidrográficas (ANTUNES, 2003; ROLIM, 2003). Estudos preliminares foram apresentados por CAMPOS e LINGNAU (2003) utilizando imagens Landsat para mapeamento da cobertura do solo na Amazônia.

2.2 ANÁLISE DA PAISAGEM

O sensoriamento remoto permite análise do uso e cobertura do solo em várias escalas espacial, temporal e espectral. Entretanto, a mera quantificação de classes de uso e cobertura do terreno, como é feita tradicionalmente, não atende plenamente a demanda de informações necessárias para o adequado manejo e conservação das florestas. Além disso, faz-se necessário o uso de métodos que considerem a dinâmica da cobertura do solo, revelada no mosaico resultante dos fenômenos naturais e antrópicos. Por isso, a Ecologia da Paisagem, em combinação

com a tecnologia do sensoriamento remoto, vem se tornando a ferramenta cada vez mais usada no estudo da fragmentação de florestas decorrente do desflorestamento.

A análise da paisagem é utilizada para avaliar a estrutura, a função e as mudanças de ambientes naturais em várias escalas. Além disso, favorece uma abordagem holística que, juntamente com o aumento da capacidade de análise dos sistemas computacionais, pode conduzir a soluções mais robustas para conservação e manejo de florestas. Por esta razão, acredita-se que sua aplicação a florestas tropicais pode gerar avanços significativos, principalmente nos aspectos de uso do terreno e manejo das florestas de forma sustentada.

2.2.1 A Ecologia da Paisagem

A Ecologia da Paisagem é uma disciplina emergente que integra vários campos tais como: hidrologia, geologia, geomorfologia, solos, vegetação, ecologia, direito, sociologia e engenharia (SOARES FILHO, 1998). A Ecologia da Paisagem é o estudo de como os *padrões* de cobertura do terreno influenciam processos tais como o fluxo de água, solo, nutrientes ou energia; movimento de organismos e seres humanos e o movimento de produtos, recursos e ou capital (NAVEH e LIEBERMAN, 1989).

FORMAN e GODRON (1986) conceituaram inicialmente Ecologia da Paisagem como o estudo da *estrutura, função e mudanças* em uma área de terra heterogênea composta de ecossistemas que interagem entre si. O conceito da IALE (Associação Internacional de Ecologia da Paisagem) estabelece que: “Ecologia da Paisagem é o estudo da variação espacial em paisagens, em várias escalas. Isto inclui as causas e conseqüências biofísicas e sociais da heterogeneidade da paisagem. Acima de tudo caracteriza-se pela multidisciplinaridade.” (IALE, 1998).

A *estrutura* da paisagem refere-se à relação espacial entre ecossistemas distintos ou *unidades* presentes na paisagem – mais especificamente, à distribuição de energia, material e espécies em relação ao tamanho, forma, número, tipos e *configuração* dos ecossistemas; a *função* diz respeito a interações entre as unidades espaciais, isto é, ao fluxo de energia, material e espécies entre os componentes do

ecossistema e finalmente, as *mudanças* são as alterações temporais na *estrutura* e na *função* do mosaico ecológico. Portanto, a Ecologia da Paisagem, envolve o estudo dos padrões de paisagem, as interações entre as *unidades de paisagem* dentro do mosaico terrestre e como estes padrões e interações mudam com o tempo. Além disso, aplica estes princípios em equacionar e solucionar problemas reais, bem como considera o desenvolvimento e a dinâmica da heterogeneidade espacial, incluindo sua simulação nos processos ecológicos e no manejo da heterogeneidade espacial (MCGARIGAL e MARKS, 1995; FORMAN, 2001).

2.2.2 Conceitos e Terminologia em Ecologia da Paisagem

Por tratar-se de uma ciência relativamente nova, conceitos e definições ainda estão em desenvolvimento e tem sido parte constante de artigos especializados. No Brasil, uma variedade de termos e de conceitos tem sido traduzidos, aparentemente sem uma preocupação de discutir-se uma terminologia e conceituação adequada às nossas condições. Não faz parte do escopo deste trabalho discutir esta questão. Todavia, a terminologia e conceituação usada neste trabalho procuraram seguir os trabalhos já realizados no Brasil, a maioria no âmbito das universidades, como Dissertações e Teses. Termos utilizados na Geografia e/ou no Paisagismo, ainda que possuam uma conexão histórica, não fazem parte desta abordagem.

A paisagem resultante da intervenção humana nas florestas caracteriza-se por uma heterogeneidade espacial, onde objetos são agregados formando limites distintos, gerando um mosaico terrestre (JORGE e GARCIA, 1997; FORMAN, 2001). O conceito de mosaico inclui os conceitos de *unidade da paisagem*, *matrizes*, *corredores* e *padrão*. Além da compreensão da heterogeneidade, a dinâmica das mudanças relacionada a fatores que a produziram pode descrever a paisagem como sistema vivo que possui uma *estrutura* e *função* e ainda pode sofrer *modificações* (TURNER, 1990; FORMAN, 2001).

Uma *unidade da paisagem* é uma área extensa, não linear, relativamente homogênea que difere do seu entorno. Os *corredores* são faixas de tipo específico que

difere do terreno adjacente de ambos os lados. A *matriz* é o ecossistema em um mosaico, caracterizada por cobertura extensiva, alta conectividade, e/ou um controle principal sobre a dinâmica. Basicamente, três mecanismos criam o padrão de um mosaico. A heterogeneidade do substrato, distúrbios naturais e atividade humana. Vários processos biológicos podem modificar ou realçar os padrões (FORMAN, 2001).

Uma vez que estrutura e mudanças são peculiares à paisagem, um outro importante conceito a esclarecer é o conceito de escala. O conceito clássico de escala nas disciplinas que tem o mapeamento como parte de suas atividades é a relação existente entre uma medida obtida de um objeto e a medida da sua representação gráfica. A escala é uma proporção como a razão entre um comprimento no mapa e o comprimento real (FORMAN, 2001). Em ecologia da paisagem a escala tem sido definida como o período de tempo e espaço no qual a os dados são integrados ou suavizados para fornecer uma informação (BURNETT e BLASCHKE, 2003), também o nível ou a grau de resolução espacial percebida ou considerada.

Um sistema funciona por toda uma variedade de escalas, mas quando observado em uma determinada resolução apenas algumas características são registradas, enquanto outras são filtradas. A observação de um mosaico de paisagem em escalas contínuas, como uma câmera em um balão que se distancia da superfície, revela uma seqüência de imagens que contêm o mesmo conteúdo de informação da paisagem heterogênea em foco (BURNETT e BLASCHKE, 2003). De uma certa forma, para diferentes níveis de escala podem ser observados diferentes mosaicos ecológicos que são percebidos por diferentes organismos (SOARES FILHO, 1998).

A escala assim conceituada pode ser descrita em termos do *grão* e da *extensão*. O *grão* é a área mínima na qual um organismo percebe e responde à estrutura das unidades de paisagem. A *extensão* é a escala mais grosseira da heterogeneidade espacial na qual os organismos reagem (FORMAN, 2001). As mudanças qualitativas e quantitativas em medidas realizadas a diferentes escalas dependem de como a escala é definida (BATTISTELLA, 2001). Portanto, a estrutura

de uma paisagem varia com a escala e medidas tomadas; em escalas diferentes podem não ser comparáveis.

2.2.3 Índices da Paisagem

A caracterização da estrutura da paisagem tem como um dos seus objetivos identificar as origens e os processos que resultam em diferentes texturas ou padrões da cobertura do terreno. Estas informações podem, também, ser utilizadas no desenvolvimento de modelos de paisagem. Portanto, são necessários métodos quantitativos que avaliem os padrões espaciais e posteriormente suas ligações com os processos ecológicos em amplas escalas temporais e espaciais.

Vários índices de paisagem têm sido propostos para caracterizar a complexidade das paisagens (MCGARIGAL e MARKS, 1995). SOARES FILHO (1998) cita uma gama de índices como a Forma da Mancha (*unidade de paisagem*), Isolamento, Acessibilidade, Riqueza, Diversidade e Reciprocidade de Simpson. O autor relaciona, de igual modo, medidas de textura como a Entropia, o Contágio, o Contraste e o Índice de Conectividade. FROHN et al. (1996) utilizaram Contágio e Dimensão Fractal.

A dimensão fractal pode ser calculada e usada como medida de complexidade espacial ou conteúdo de informação. Diferentes tipos de dados do sensoriamento, inclusive dados de diferentes tipos de terreno, sensores e bandas podem ser comparados e analisados baseados na dimensão fractal.

A medição da geometria fractal da paisagem e a análise do padrão de unidades de paisagem foram utilizadas no estudo de diferentes tipos de cobertura do terreno (DE COLA, 1989; JONG e BURROUGH, 1995; ALLEN e WALSH, 1996), da fragmentação de florestas (JORGE e GARCIA, 1997; YAMAJI, 2001) e de mudanças na cobertura do solo (LAGRO, JR., 1991).

A aplicação de alguns índices ainda não foi completamente testada. É necessário considerar aspectos da interdependência e eficiência de alguns índices. Entretanto, a habilidade de alguns índices em detectar padrões espaciais e suas

implicações ecológicas já pode ser evidenciada pelos trabalhos já realizados anteriormente (SOARES FILHO, 1998). Alguns índices têm sido considerados razoavelmente independentes um do outro e capazes de capturar as principais informações, sendo recomendados em estratégias voltadas ao monitoramento (FROHN et al., 1996). A análise da correlação entre índices tem sido estudada visando detectar redundâncias e sobreposições (HARGIS, BISSONETE e DAVID, 1998). Isto pode ser importante em termos de economia e interpretação dos dados. Além disso, revela a necessidade do desenvolvimento de novos índices, para situações específicas.

2.2.4 Dimensão fractal

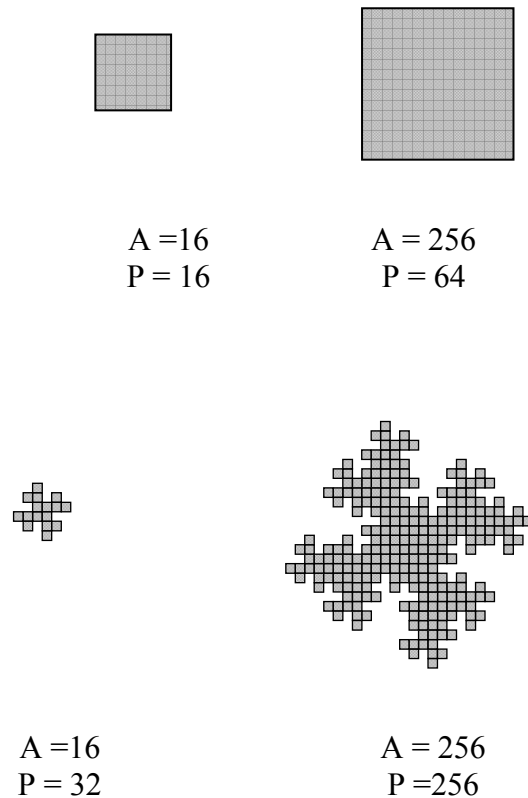
A modelagem espacial dos padrões da paisagem vem sendo estudada por diversos pesquisadores, revelando uma quantidade grande de técnicas, tipos de análises e métodos estatísticos (FORMAN, 2001). O termo fractal vem da mesma raiz da palavra fração e foi usado por MANDELBROT (1983) para nomear objetos conceituais que apresentam estruturas em todas as escalas espaciais e com auto-similaridade dependente da escala. De acordo com (MILNE, 1988), os conjuntos fractais apresentam auto-similaridade, que é a relação constante das partes com o todo, em uma série de escalas de comprimento e as suas propriedades estatísticas são preservadas mesmo quando há um deslocamento.

Na geometria clássica a dimensão de uma curva é definida como 1, a dimensão de um plano como 2 e a de um cubo como 3. Chamam-se dimensão topológica (D_i) e é caracterizada por valores inteiros. Na geometria fractal, a dimensão D de uma curva, pode ser qualquer valor entre 1 e 2 de acordo com o grau de complexidade da curva (LAM, 1990). Em outras palavras, para formas suavizadas, como círculos e quadrados D é igual a 1. Enquanto D é igual a $3/2$ para o modelo de Koch (Figura 2), D é igual a 2 no caso das feições cujo perímetro preenche o plano.

Sejam as duas regiões mostradas na Figura 2: quadrados e a chamada figura quadrática de Koch (MANDELBROT, 1983). Estas “regiões” podem ser medidas em termos de área e perímetro. Para quadrados — regiões com perímetros lisos — tem-se

o caso em que $PERÍMETRO \propto \sqrt{ÁREA}^1$. Esta relação é válida para todas as regiões com dimensão fractal $D = 1$ e para os quadrados em particular, este é o caso em que $PERÍMETRO = 4\sqrt{ÁREA}^1$.

FIGURA 2 - COMPARAÇÃO DE MEDIÇÕES DOS QUADRADOS ($D=1$) E REGIÕES DE KOCH ($D=3/2$)



FONTE: DE COLA (1989)

Por outro lado, as regiões quadráticas de Koch que foram construídas para terem as mesmas áreas que os quadrados, 16 e 256, respectivamente – mas com perímetros significativamente mais convolutos, de modo que $PERÍMETRO = 4\sqrt{ÁREA}^{3/2}$. Conseqüentemente, regiões maiores de Koch revelam mais detalhes do que regiões pequenas.

DE COLA (1989) realizou a análise fractal de imagens Landsat TM de Vermont, EUA. A classificação gerou oito classes que apresentaram diferentes dimensões fractais e tamanhos. As florestas apresentaram valores altos, enquanto as áreas agrícolas apresentaram valores inversamente proporcionais à intensidade de

cultivo. O autor sugere que os resultados podem ser usados para avaliar a qualidade da classificação.

A medição da geometria fractal da paisagem e a análise do padrão de unidades de paisagem foram utilizadas no estudo de diferentes tipos de cobertura do terreno (DE COLA, 1989; JONG e BURROUGH, 1995; ALLEN e WALSH, 1996), da fragmentação de florestas (JORGE e GARCIA, 1997; YAMAJI, 2001) e de mudanças na cobertura do solo (LAGRO JR., 1991).

A dimensão fractal em conjunto com dois outros índices da paisagem foi utilizada para avaliar mudanças ocorridas em uma Floresta Nacional no Estado de Nova Iorque, EUA. A forma das unidades de paisagem em imagens classificadas foi caracterizada, para cada classe de cobertura, a partir da quantificação da contigüidade e agrupamento de pixels dentro de cada unidade (LAGRO JR., 1991).

A dimensão fractal foi usada por ALLEN e WALSH (1996) para quantificar a complexidade de um ecótono altitudinal em um Parque Nacional, em Montana, nos Estados Unidos da América. Através de vários índices, incluindo a dimensão fractal, separaram pelo menos seis tipos diferentes de cobertura do terreno.

Com o objetivo de avaliar a relação entre padrões espaciais e processos ecológicos, OTTO (1996) investigou duas paisagens diferentes. A dimensão fractal revelou diferenças nos padrões espaciais em cinco escalas de resolução espacial e extensão, usados no estudo da fauna.

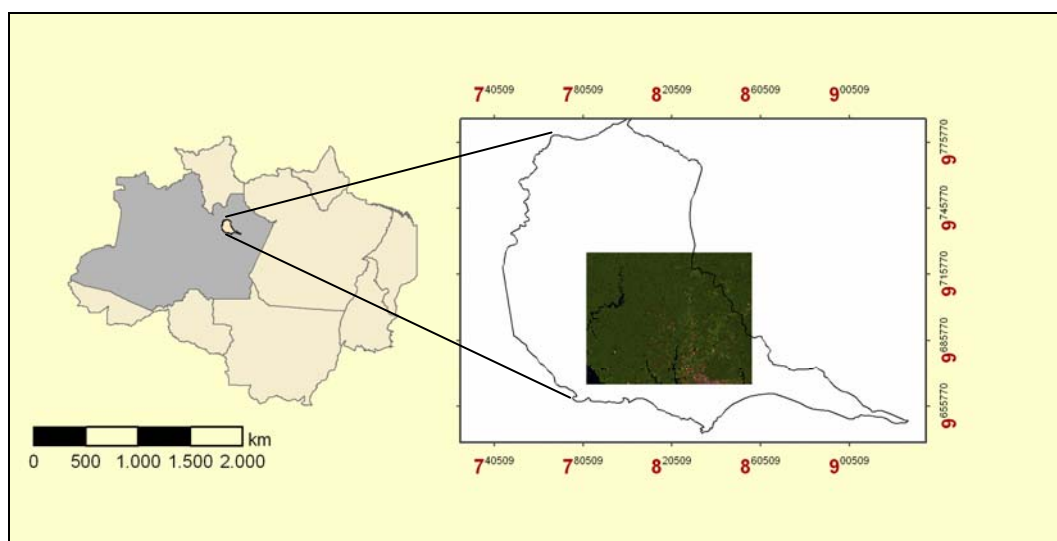
A fragmentação de uma floresta em Botucatu, no Estado de São Paulo, foi estudada por JORGE e GARCIA (1997) através da área média dos elementos da paisagem, perímetro, dimensão fractal, número elementos da paisagem e densidade. O estudo de uma floresta ombrófila mista, no Paraná, usando a abordagem fractal foi executado por YAMAJI (2001), que ressaltou a importância dos índices para descrever e analisar a fragmentação objetivamente.

3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área estudada encontra-se no Distrito Agropecuário da Superintendência (DAS) da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA (Ministério do Planejamento e Orçamento), na Amazônia Central, ao Norte de Manaus (Figura 3). Além dos projetos agropecuários instalados ao longo dos anos, esta região possui áreas destinadas a pesquisas, concedidas ao Instituto Nacional do Meio Ambiente - IBAMA, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Inpa e Comissão Executiva para o Planejamento da Lavoura Cacaueira - CEPLAC. Estas instituições vêm desenvolvendo pesquisas nas mais diversas áreas referentes ao meio ambiente amazônico nas áreas florestal, agrícola, botânica e ecológica.

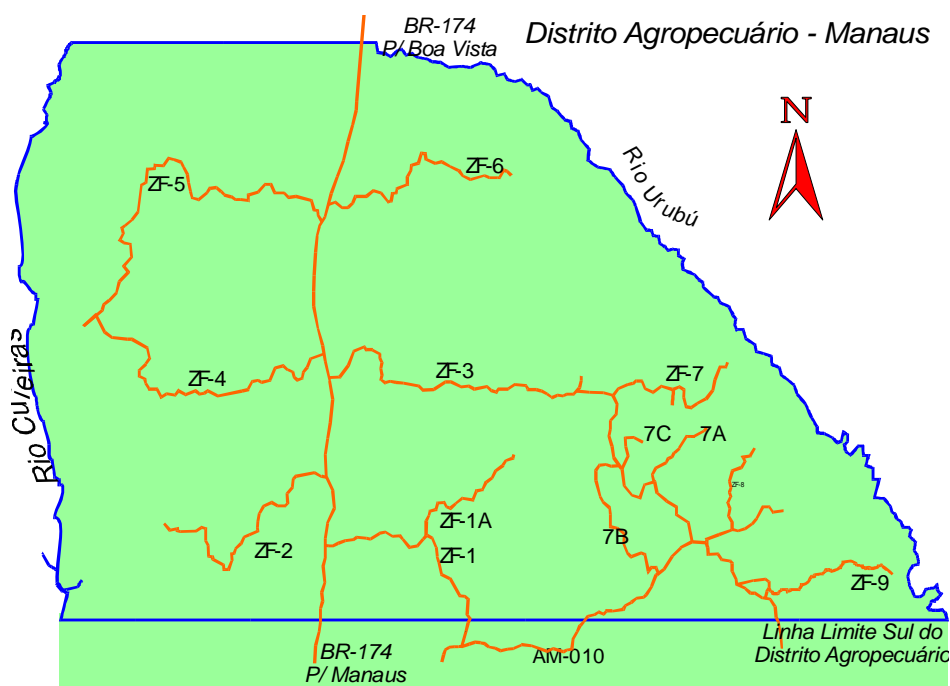
FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: IBGE (1997).

A área possui duas vias principais que permitem o tráfego de veículo durante o ano todo. A BR-174, Manaus - Boa Vista possui vicinais denominadas ZFs as quais foram estabelecidas tanto à direita como à esquerda, ao longo da Rodovia. A Rodovia AM-010 que liga Manaus ao Município de Itacoatiara, possui ligações com a BR-174 através de algumas destas vicinais (Figura 4).

FIGURA 4 - PADRÃO DO SISTEMA VIÁRIO NO DISTRITO AGROPECUÁRIO



FONTE: MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO (1996)

Os projetos agropecuários ali desenvolvidos inicialmente foram abandonados, dando lugar ao mosaico composto por florestas nativas remanescentes, com alguma exploração seletiva, florestas secundárias com diferentes estágios de desenvolvimento, novas pastagens, agricultura familiar e fruticultura. Em decorrência do término dos contratos iniciais, novas concessões têm sido feitas principalmente após asfaltamento da BR. Portanto, é comum a existência de áreas recém desmatadas para implantação de agricultura familiar, chácaras e até novas pastagens.

De interesse particular para este estudo são as áreas de pesquisas do Inpa, incluídas na área de estudo. A Reserva Biológica do Rio Cuieiras (21.000 ha), onde estão localizados os projetos de Manejo Florestal, a Estação Experimental de Silvicultura Tropical e a Reserva Biológica de Campina (900 ha) estão localizadas ao longo na BR - 174, Manaus - Boa Vista e vicinal ZF-2. A Reserva Florestal Adolfo Ducke (10.000 ha) e a Reserva Egler estão localizadas ao longo da Rodovia AM-010 que liga Manaus ao Município de Itacoatiara (Figura 4).

3.1.1 Cobertura Original do Solo

A vegetação predominante na área de estudos é a Floresta Ombrófila Densa, conforme o sistema de classificação do IBGE (1992). Esta denominação é localmente chamada de *terra firme*. Estas florestas, encontradas sobre platôs ou encostas com solos argilosos, apresentam alta diversidade, grande percentagem de espécies com baixa densidade e baixa similaridade florística entre parcelas próximas (NELSON e OLIVEIRA, 1999). Nos terraços baixos das planícies de alagação quaternárias ao longo dos rios de grande porte encontram-se as florestas aluviais, denominadas localmente como igapós.

Levantamentos da vegetação, realizados em diversas ocasiões (RODRIGUES, 1967; RADAMBRASIL, 1978; RAMOS et al., 1972, PRANCE et al. 1976, entre outros) indicam que as principais famílias encontradas no local são Leguminosae, Chrisobalanaceae, Sapotaceae, Lecythidaceae, Moraceae e Burceraceae. Uma das maiores densidades de espécies, 285 por hectare, foi relatada para este local próximo a Manaus e entre as principais espécies destacam-se principalmente a *Eschweilera odora* (Poepp.) Miers, *Scleronema micranthum* (Ducke) Ducke e *Pouteria anomala* (Pires) T.D. Penn. (OLIVEIRA e MORI, 1999).

A cobertura florestal da Bacia do Rio Negro é a mais heterogênea da Amazônia (HUECK, 1978). A grande heterogeneidade da floresta é comprovada no estudo de JARDIM e HOSOKAWA (1987), na vicinal ZF-2, os quais encontraram 324 espécies, 173 gêneros e 57 famílias e grande diferença entre a regeneração e o povoamento adulto. É uma floresta de porte relativamente baixo, quando comparado com outras florestas tropicais, com diâmetro médio inferior a 40 cm, portanto, com área basal e volumes médios por hectare também baixos, 25,010 m² e 298,668m³ respectivamente (JARDIM e HOSOKAWA, 1987).

3.1.2 Solo e Clima

Segundo RADAMBRASIL (1978) as características geomorfológicas da área são o planalto dissecado Rio Trombetas – Rio Negro, de relevo de interflúvios

tabulares predominantes em toda área, caracterizando-se pela presença de platôs de 750 a 1.750 m de extensão, separados por vales alargados e de fraco grau de aprofundamento onde os rios elaboram estreitas faixas de planície. Estudos locais informam que o relevo é plano a suave ondulado, típico da região. Os platôs extensos (500 a 1.000 m) estão cerca de 70 a 80 metros acima dos terrenos planos ao longo dos rios (baixios). Estudos localizados nas áreas protegidas, citadas anteriormente, informam que os tipos de solo predominantes são latossolos amarelos álicos e podzólicos vermelho-amarelo (RANZANI, 1980).

O clima da região de Manaus é do tipo Af_i, segundo a classificação de Köppen, apresentando pluviosidade de 2.485 mm e temperatura média anual de 25,6 °C, com estação seca de junho a outubro. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18 °C e não tem estação seca ou déficit hídrico (RIBEIRO, 1976).

3.2 BASE DE DADOS

A área selecionada para este estudo está localizado aproximadamente entre 2°30' e 3°00' de latitude Sul e 59°35' e 60°15' de longitude Oeste, abrange uma área de 60 x 90 km, ao norte de Manaus. Imagens Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM, contendo a área de interesse foram selecionadas em função da disponibilidade no acervo do SIGLAB do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Quadro 1).

QUADRO 1- CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS UTILIZADAS NESTE ESTUDO

IMAGEM	ÓRBITA/PONTO	DATA DA AQUISIÇÃO	BANDAS ESPECTRAIS
LANDSAT TM	231/62	13/07/1999	2,3,4,5 e 7
LANDSAT TM	231/62	11/08/2001	2,3,4,5 e ,7
LANDSAT ETM	231/62	11/01/2003	2, 3,4,5 e 7

Cartas topográficas correspondentes à área de estudo foram utilizadas para o georreferenciamento das imagens Landsat. As cartas produzidas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército - DSG, na escala 1:50000, projeção UTM, foram: Igarapé Goela (SA.20-Z-B-VI-1), Fazenda Codeagro (SA.20-Z-B-VI-2), Igarapé Coanã (SA.20-Z-B-VI-3) e Vivenda Verde (SA.20-Z-B-VI-4).

3.2.1 Correção Geométrica e Registro de Imagens

As cartas foram convertidas para o formato digital, via *scanner* (200 dpi), no tamanho A0 e georreferenciadas utilizando-se as informações contidas nas mesmas. As imagens Landsat TM de 1999 sofreram correção geométrica para o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) com uma resolução do pixel 30 m após a reamostragem e erro menor do que um pixel. Foram utilizados polinômios de primeiro grau, para retificação e o algoritmo vizinho mais próximo, para a reamostragem. As imagens de 2003 e 2001 foram registradas usando como referência a imagem de 1999. Em seguida foi extraída a área de interesse para este estudo.

4 METODOLOGIA

A metodologia aqui apresentada consiste na análise do uso e ocupação do solo nos anos de 1999, 2001 e 2003, usando-se a classificação orientada ao objeto, conforme implementada no programa eCognition, versão 2.1 (DEFINIENS, 2001). Os mapas temáticos gerados a partir da classificação orientada a objetos serviram de base para a análise estrutural da paisagem.

Para a análise da paisagem foram calculados os índices descritores da composição (número, densidade e tamanho de elementos da paisagem, entre outros) e configuração (contágio e o nível de difusão e justaposição), para avaliar os aspectos da cobertura florestal e sua mudança no período de 1999 a 2003. A análise fractal complementa este estudo, ressaltando a complexidade das formas e sua relação com a fragmentação.

4.1 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO

4.1.1 Segmentação

Com o objetivo de obter os elementos formadores dos objetos como unidades de processamento básicas, a orientação a objeto na análise de imagens requer a completa segmentação da imagem. Foi realizada, portanto a segmentação multirresolução (ou multiescala) e em níveis hierárquicos, determinados pelo critério de fusão de segmentos que se torna menos rígido conforme se ascende na escala hierárquica, ou vice-versa (vide item 2.1.4). Assim, neste estudo foram gerados diferentes resultados de segmentação, com diferentes tamanhos de objetos. Estes resultados se organizam em níveis inter-relacionados, sendo o nível superior o que possui segmentos maiores. O nível imediatamente inferior possui subobjetos que são formadores dos objetos do nível superior e assim sucessivamente (cf. Figura 1, item

2.1.4).

Para executar a segmentação, é necessário definir os seguintes valores:

- a) peso das bandas, isto é, quais bandas participarão da segmentação;
- b) parâmetro de escala e
- c) critérios mistos de heterogeneidade referentes aos valores espectrais e de forma.

O peso das bandas pode ser 1 ou 0, significando respectivamente sua participação ou não no processo de segmentação. O parâmetro de escala pode variar de acordo com o nível de resolução escolhido para a segmentação. Os valores de heterogeneidade (espectral e forma) variam de 0 a 1 e se complementam, de modo que a soma dos pesos para heterogeneidade espectral e forma é sempre igual a 1.

4.1.1.1. O parâmetro de escala

O parâmetro de escala é um valor que determina o máximo de mudança em heterogeneidade que é permitido ocorrer na fusão de dois objetos. Internamente este valor é elevado ao quadrado e serve como limiar que encerra o algoritmo. Quando se examina uma possível fusão de dois objetos, um *valor de fusão* entre aqueles dois objetos é calculado e comparado ao parâmetro de escala elevado ao quadrado.

O *valor de fusão* consiste em duas partes: Um critério de cor e um critério de forma. O critério de cor é a mudança na heterogeneidade que acontece após a fusão de dois objetos, descrita pela mudança do desvio ponderado dos valores espectrais. O critério de forma é um valor que descreve o aperfeiçoamento da forma em relação a dois modelos de padrão de forma. O cálculo genérico do *valor de fusão* para heterogeneidade da cor e para heterogeneidade da forma é feito da seguinte maneira:

$$f = w.h_{cor} + (1 - w).h_{forma} \quad (1) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

Onde:

w é o peso definido pelo usuário para cor ($0 \leq w \leq 1$)

f = valor de fusão

h_{cor} = heterogeneidade da cor

h_{forma} = heterogeneidade da forma

Em todo processo de segmentação é necessário que o usuário entre com valores de limiares testes até obter uma aproximação que o conduza a um resultado satisfatório. Neste estudo, foram considerados os parâmetros de escala que pudessem gerar polígonos com tamanho médio correspondente a unidade mínima de 1 ha (um hectare), pois ocorrem áreas desmatadas que possuem dimensões em torno deste valor. Por outro lado, unidades maiores correspondentes às feições “florestas” e “rios” demandaram parâmetros de escala maiores. Os valores testados foram aceitos a partir da avaliação da segmentação, quando esta correspondia à realidade dos limites das feições. Os polígonos foram avaliados quanto à heterogeneidade interna e delimitação da feição, segundo um critério de cor, forma e contexto.

4.1.1.2 Os critérios mistos de heterogeneidade

A descrição da heterogeneidade espectral é dada pelo somatório dos desvios padrões dos valores espectrais em cada banda ponderados pelo peso w_c (dado pelo usuário) de cada banda.

$$h = \sum_c w_c \cdot \sigma_c \quad (2) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

A heterogeneidade — como um desvio de uma forma compacta — é dada pela razão entre o comprimento real da borda l e a raiz quadrada do número de pixels (n) que formam o objeto de imagem:

$$h = \frac{l}{\sqrt{n}} \quad (3) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

Outra possibilidade de se descrever a heterogeneidade da forma é a razão entre comprimento real da borda e o menor comprimento possível b dado por um retângulo circunscrito ao objeto de imagem.

$$h = \frac{l}{b} \quad (4) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

O critério de heterogeneidade espectral é a mudança em heterogeneidade que ocorre após a fusão de dois objetos, tendo por base a modificação do valor do desvio padrão ponderado dos valores espectrais. O critério de forma é um valor que descreve o aperfeiçoamento da forma com base em dois modelos diferentes que descrevem formas ideais.

O critério espectral h_{cor} é a média ponderada das mudanças nos desvios padrões para cada banda c . Os desvios padrões são ponderados pelos tamanhos dos objetos n_{obj} :

$$h_{cor} = \sum w_c (n_{fusão} \cdot \sigma_c^{fusão} - (n_{obj1} \cdot \sigma_c^{obj1} + n_{obj2} \cdot \sigma_c^{obj2})) \quad (5) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

O critério de forma subdivide-se em dois: um para suavidade e outro, para compacidade. Assim, para cálculo do critério de forma eles devem ser combinados utilizando-se os pesos definidos pelo usuário, conforme relação abaixo:

$$h_{forma} = w_{cmpct} \cdot h_{cmpct} + (1 - w_{cmpct}) \cdot h_{suave} \quad (6) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

Sendo:

$0 \leq w_{cmpct} \leq 1$ = peso definido pelo usuário para o critério de compacidade.

A mudança de heterogeneidade de forma resultante de uma fusão é avaliada através da comparação da situação antes e depois da fusão. Portanto o cálculo da suavidade e compacidade das formas é feito da seguinte maneira:

$$h_{suave} = n_{fusão} \cdot \frac{l_{fusão}}{b_{fusão}} - \left(n_{obj1} \cdot \frac{l_{obj1}}{b_{obj1}} + n_{obj2} \cdot \frac{l_{obj2}}{b_{obj2}} \right) \quad (7) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

$$h_{cmpct} = n_{fusão} \cdot \frac{l_{fusão}}{\sqrt{n_{fusão}}} - \left(n_{obj1} \cdot \frac{l_{obj1}}{\sqrt{n_{obj1}}} + n_{obj2} \cdot \frac{l_{obj2}}{\sqrt{n_{obj2}}} \right) \quad (8) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

Onde:

n = é o tamanho do objeto (número de pixels),

l = perímetro do objeto e

b = perímetro do retângulo circunscrito.

A estrutura de objetos em cadeia (cf. 2.1.4 e 4.1.2) foi criada com três objetivos. O primeiro foi apresentar feições predominantes de florestas e água em um nível superior tendo em vista o isolamento de outras feições como não classificadas. O nível intermediário foi utilizado para obtenção da classificação final. Neste nível intermediário a classificação é realizada e todas as classes apresentadas de modo que as informações dos outros níveis possam ser usadas na descrição das classes. O nível inferior visa atender a análise de feições de tamanho pequeno, como áreas desmatadas para agricultura familiar e clareiras na floresta e feições lineares que aparecem na imagem como rios menores, estradas e linha de transmissão.

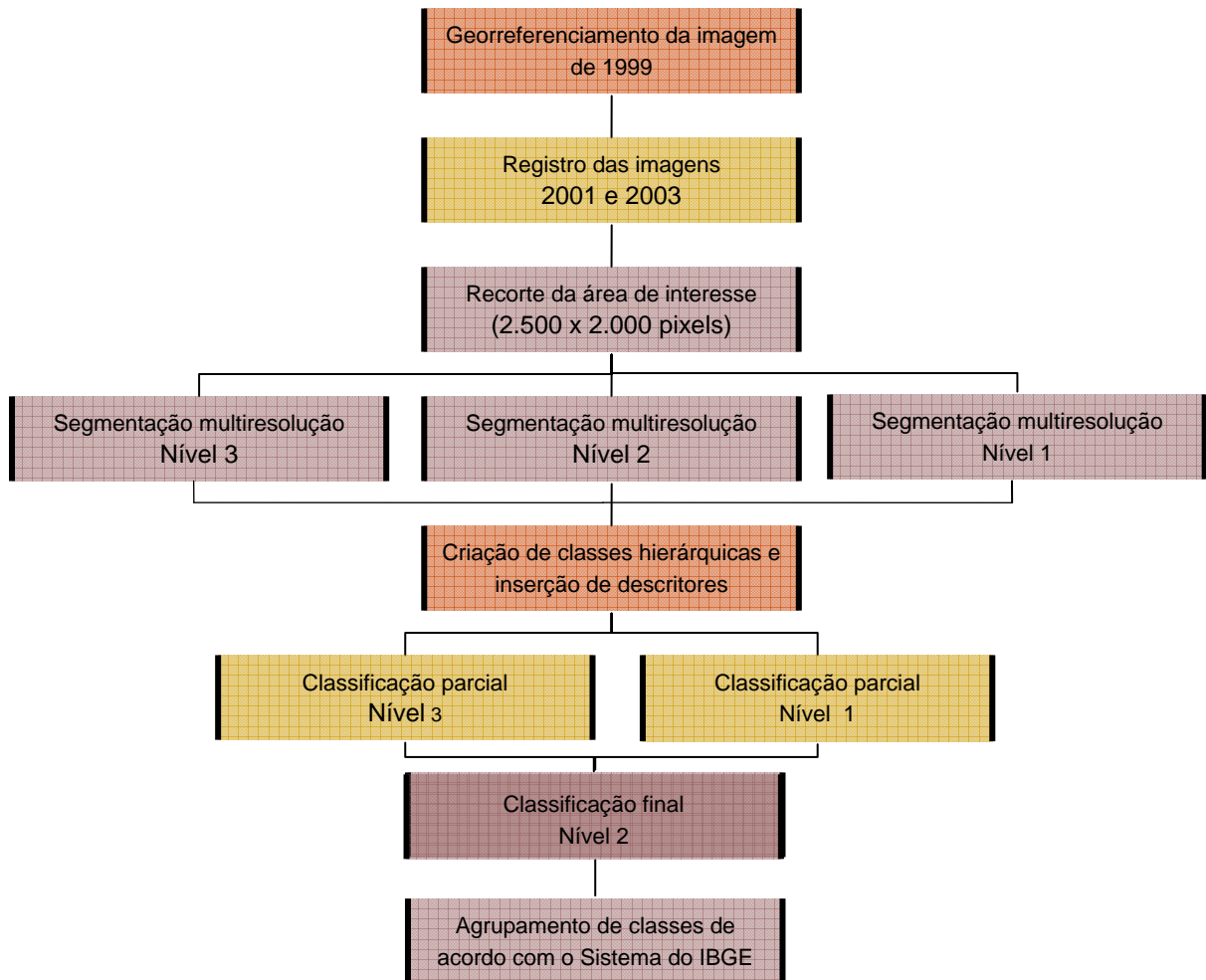
4.1.2 Classificação orientada a objeto

A técnica de classificação utilizada baseia-se no conceito de que informações semânticas importantes, necessárias para interpretar uma imagem, não estão representadas em um pixel individual, mas em objetos de imagem importantes e suas inter-relações.

A análise da imagem é baseada em regiões homogêneas contíguas que são geradas pela segmentação. Conectando todas as regiões, o conteúdo da imagem é representado como uma rede de objetos da imagem. Estes objetos de imagem funcionam como blocos de construção para a subsequente análise da imagem. Eles são caracterizados por mais propriedades do que a informação espectral pura ou

informação relacionada a esta. Estas propriedades são: forma, textura, vizinhança e contexto. O esquema de classificação orientada ao objeto, utilizado na presente Tese, pode ser entendido por meio da Figura 5.

FIGURA 5 - ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO



A classificação de objetos de imagem é feita de acordo com descritores de classes, organizados de forma sistemática. Para isso, é necessário criar um *banco de conhecimento*¹ e escolher um dos algoritmos baseados em lógica *fuzzy*. Deste modo, a hierarquia de classes é criada, onde cada classe é descrita por uma característica

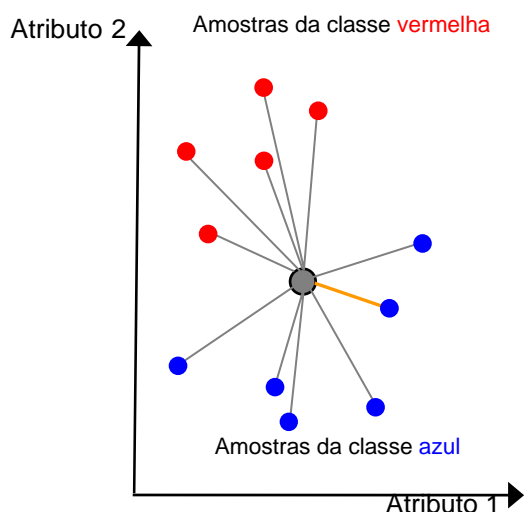
¹ *knowledge base, conjunto de informações usadas pelo sistema para tomada de decisões*

relacionada à cor, forma ou contexto. O *banco de conhecimento* propriamente dito é criado através de mecanismos, conceitos e métodos de herança.

Optou-se pelo algoritmo Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbor*) para efetuar a classificação devido à possibilidade de operar com os descritores² que utilizam amostras de treinamento, dado um espaço de atributo. A possibilidade de uso das classes com seus descritores em um outro conjunto de imagens semelhantes é uma vantagem deste algoritmo.

O algoritmo Vizinho Mais Próximo utiliza regras *fuzzy* para classificar os objetos. Estas regras consistem no uso de um ou mais descritores que são combinados por operadores lógicos. Este algoritmo gera automaticamente as funções de participação multidimensionais a partir de objetos amostrais. Assim, dado um conjunto representativo de amostras, o algoritmo procura a amostra mais próxima no espaço de atributos definido por descritores. Se a amostra mais próxima a um objeto de imagem pertence a *Classe A*, o objeto será designado à *Classe A* (DEFINIENS, 2001).

FIGURA 6 - EXEMPLO DA CLASSIFICAÇÃO POR VIZINHO MAIS PRÓXIMO



FONTE: DEFINIENS (2001)

Quanto mais próximo um objeto estiver da amostra, maior o grau de

² Conjunto de informações (espectral, forma, contexto, textura, etc) sobre objetos, gerados na segmentação, que podem ser usadas na separação de classes.

participação àquela classe. A distância é calculada da seguinte forma:

$$d = \sqrt{\sum_f \left(\frac{v_f^{(s)} - v_f^{(o)}}{\sigma_f} \right)^2} \quad (9) \text{ (DEFINIENS, 2001)}$$

Onde:

d = distancia entre amostra s e objeto o

$v_f^{(s)}$ = valor do descritor f para a amostra

$v_f^{(o)}$ = valor do descritor f para objeto

σ_f = desvio padrão dos valores do atributo

A distância entre um objeto a ser classificado e uma amostra no espaço de atributos é padronizada pelo desvio padrão de todos os valores. Assim descritores de amplitudes variadas podem ser combinados para a classificação. Com base na distância d é computada uma função exponencial multidimensional $z(d) = e^{-kd^2}$. O parâmetro k determina a diminuição de $z(d)$. Define-se este parâmetro com a variável inclinação da função, $k = \ln(1/\text{inclinação da função})$.

O esquema de classificação utilizado baseia-se na classificação da vegetação brasileira, conforme IBGE (1992) e usos do solo normalmente encontrados no local. O esquema de classes foi criado por um processo que levou em conta o tamanho mínimo das feições de interesse e as largas extensões de florestas existentes na área de estudo. As classes definidas foram agrupadas de acordo com o esquema de classificação do IBGE (1992) em Sistema Primário e Sistema Secundário. As áreas urbanas, água e solo exposto foram agrupadas na categoria “Outros”.

As classes de cobertura do solo utilizadas neste estudo possuem as características apresentadas Quadro 2, conforme descrições fornecidas por HUECK, (1978) e IBGE, (1992) e observações no local.

A seleção de descritores que melhor separam as feições foi realizada com base no estudo preliminar, partindo da interpretação visual das imagens, do gráfico do espaço de atributos e da imagem segmentada com o valor dos descritores em níveis de cinza. As classes foram introduzidas uma a uma com seus respectivos descritores.

Como critério geral para as classes mães (principais) foi usado o algoritmo Vizinho Mais Próximo Padrão, que adota como espaço amostral as médias dos níveis de cinza dos segmentos. As classes como água, solo exposto em geral, florestas e sucessão secundária foram classificadas desta forma.

QUADRO 2 - DESCRIÇÃO DAS CLASSES DE COBERTURA UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO (IBGE, 1992; HUECK, 1978)

TIPOLOGIA – DESCRIÇÃO	FOTOGRAFIA ILUSTRATIVA
<p>Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas Subdivisão da formação Floresta Ombrófila Densa. Não têm porte tão alto como os espécimes da Amazônia Oriental, entretanto chegam a atingir 30 a 40 m de altura. É típica a ocorrência de um estrato superior formado pelas emergentes, um estrato intermediário e um inferior onde a regeneração se confunde com as arbustivas.</p>	
<p>Floresta Ombrófila Densa Aluvial Subdivisão da formação Floresta Ombrófila Densa, que se caracteriza por não variar topograficamente e apresenta sempre ambientes repetitivos nos terraços aluviais dos flúvios. Trata-se de uma formação ribeirinha ou “floresta ciliar” que ocorre ao longo dos cursos d’água, ocupando os terraços antigos das planícies quaternárias.</p>	
<p>Floresta alterada Remanescente florestal com solo exposto e vegetação secundária. Este tipo de cobertura é proveniente da exploração seletiva e queimadas superficiais.</p>	
<p>Sucessão Secundária Intermediária Corresponde a <i>Quarta Fase do Sistema Secundário</i> do IBGE que se refere à capoeira propriamente dita e caracteriza-se por um grau de complexidade maior dos seus elementos. Em imagens de satélite Landsat pode ser confundido com culturas lenhosas.</p>	

QUADRO 2 - DESCRIÇÃO DAS CLASSES DE COBERTURA UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO (IBGE, 1992; HUECK, 1978) CONT.

TIPOLOGIA - DESCRIÇÃO	FOTOGRAFIA ILUSTRATIVA
<p>Sucessão Secundária Inicial Corresponde a <i>Segunda e a Terceira Fase do Sistema Secundário</i> do IBGE que se refere ao que é conhecido popularmente por “capoeirinha”. Este estágio sucessional secundário apresenta gramíneas, arbustos e plantas lenhosas.</p>	
<p>Sucessão secundária alterada Sob esta denominação estão incluídas áreas de sucessão secundária intermediária ou avançada que foram abertas para ocupação. Portanto, apresentando solo exposto, gramíneas e cultivos anuais.</p>	
<p>Pastagem Área com gramíneas. A ocorrência de árvores remanescente isoladas, ou grupos de árvores é comum. A delimitação destas áreas não é necessariamente regular. Algumas formas e tamanho estão relacionadas com os limites impostos pela topografia do terreno.</p>	
<p>Solo Exposto Área desmatada para implantação de agropecuária, exploração florestal ou áreas residenciais. Estradas vicinais não pavimentadas como a da figura ao lado foram classificadas como solo exposto.</p>	
<p>Água Corpos d'água de grande extensão, com largura significativa. Rios pequenos (<i>igarapés</i>), visíveis em áreas desmatadas ao longo das estradas.</p>	

A unidade mínima de mapeamento (UMM) adotada neste trabalho foi de 8.100 m² em função da resolução da imagem e do tamanho das áreas desflorestadas. O solo exposto e a sucessão secundária, representadas por segmentos de tamanho próximo a UMM, foram classificadas no nível 1 que possui segmentos de menor tamanho. As feições de maior extensão ficaram não classificadas. No nível 3, foram classificadas as feições de maior dimensão, como por exemplo, as florestas e os rios.

Na descrição das classes filhas no nível 2 foram utilizadas principalmente as relações de contexto, além dos valores espectrais já utilizados nos outros níveis. O processo foi executado de forma adaptativa para as imagens obtidas de 1999, 2001 e 2003, para todas as classes.

4.1.4 Avaliação da Acurácia

A acurácia da imagem classificada foi avaliada através de amostras localizadas em quadrículas de 500 x 500 pixels sobre a imagem, visando uma distribuição ampla e sistemática de pontos obtidos no campo em diferentes tipos de cobertura existentes na área. Estes pontos foram obtidos de modo que uma área equivalente a 90 x 90 m fosse identificada como pertencente a uma determinada classe de cobertura do terreno. Pontos acessados através das vias existentes na área foram verificados no campo para criação da referência utilizada como verdade de campo para cálculo das estatísticas de acurácia no software Erdas 8.4. A avaliação do mapa foi realizada com base na matriz de confusão gerada dos pontos classificados e pontos de referência.

Na matriz de confusão, o elemento da *linha i coluna k* (elemento da diagonal, $i = k$) contém o número de pixels identificados pelo usuário como corretamente classificados. Os demais elementos da linha *i* fornecem o número e distribuição dos pixels que foram classificados erroneamente. Portanto, a acurácia da classificação para classe *i* é dada pelo número de pixels da diagonal dividido pelo

número total de pixels de referência para esta classe. A acurácia geral é uma média da acurácia das classes expressa em percentagem (MATHER, 1999). Foram calculados, portanto a Acurácia geral (AT), Acurácia do produtor (AP) e Acurácia do usuário (AU) conforme indicado a seguir (JENSEN, 1996; DEFINIENS, 2001):

$$AT = \frac{\sum_{k=1}^N x_{kk}}{N} \quad (10)$$

$$AP(\text{classe}_i) = \frac{x_{ii}}{\sum_{i=1}^N x_{ki}} \quad (11)$$

$$AU(\text{classe}_i) = \frac{x_{ii}}{\sum_{i=1}^N x_{ik}} \quad (12)$$

Onde:

x_{kk}, x_{ik} = elementos da matriz de confusão

AT = Acurácia geral

$AU(\text{classe}_i)$ = acurácia usuário classe i

$AP(\text{classe}_i)$ = acurácia produtor classe i

Foi calculado o coeficiente *Kappa* (κ) que expressa a redução proporcional no erro gerado na classificação, comparado com o erro de uma classificação aleatória (ERDAS, 1999). Em outras palavras, representa o quanto a classificação efetuada foi melhor do que uma atribuição aleatória de pixels às classes. O coeficiente κ é uma medida estatística que resume as informações da matriz de confusão e serve como indicador da extensão em que os percentuais corretos da matriz de erros são devidos a concordâncias “reais” ou concordâncias “ao acaso” (LILLESAND e KIEFER, 1994). Um valor positivo de κ indica que o valor observado da concordância é maior do que da concordância aleatória. Assim, à medida que a concordância verdadeira se aproxima de 1 e a concordância aleatória se aproxima de 0, κ se aproxima de 1, indicando uma situação ideal (ROSOT, 2001). A formula para cálculo de κ pode ser

encontrada em JENSEN (1996) e é obtido por:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (13)$$

Onde:

κ = coeficiente Kappa

x_{ii} = os elementos da diagonal da matriz de confusão

x_{i+} = soma da linha i da matriz de confusão

x_{+i} = soma da coluna i da matriz de confusão

4.2 ANÁLISE DA PAISAGEM

Tendo em vista a avaliação da área de estudo quanto a cobertura florestal e seu estado de conservação, os conceitos e princípios da ecologia da paisagem foram aplicados através do uso de índices para sua caracterização. As modificações ocorridas no período de 1999 a 2003 foram avaliadas tendo por base estes índices, onde além de uma quantificação do desflorestamento, a estrutura e a configuração da paisagem são explicitadas, possibilitando uma análise mais completa.

Os índices foram gerados para a paisagem como um todo e para as classes de uso e cobertura do terreno (MCGARIGAL e MARKS, 1995). Os índices de área, forma e variabilidade foram obtidos como informação básica inicial para caracterização da paisagem.

Uma grande quantidade de índices de heterogeneidade e padrões espaciais está disponível para análise da paisagem. A seleção de um dado aspecto a ser medido é direcionada para atingir um determinado objetivo (SOARES FILHO, 1998; FORMAN, 2001). Índices de paisagem para a descrição da forma, densidade e borda foram gerados pelo Fragstats 3.3. Os seguintes índices foram usados: contágio, nível de difusão e justaposição por incluírem em seus cálculos as informações mais relevantes para o presente estudo. Um outro índice que reflete a complexidade da

forma das unidades é a dimensão fractal D , que vem recebendo particular atenção devido ao fato de ser uma medida independente da escala.

O contágio (C) é uma medida de textura que mede o grau de agregação de uma paisagem. Portanto, valores altos significam grandes elementos de paisagem contínuos, enquanto valores baixos indicam uma paisagem dissecada com muitos elementos pequenos. SOARES FILHO (1998) fornece a fórmula para obtenção de C :

$$C = 2 s \log s + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s q_{i,j} \log q_{i,j} \quad (14)$$

Onde:

s = número de tipos de habitat;

$q_{i,j}$ = probabilidade do habitat i ser adjacente ao habitat j ;

O nível de dispersão e justaposição (NDJ), de uma forma diferente do contágio, que é baseado na adjacência de pixels, baseia-se na adjacência das unidades considerando a borda. Este índice é calculado para a paisagem e ao nível de classes é dado por:

$$NDJ_{paisagem} = \frac{-\sum \left[\left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}} \right) \cdot \ln \left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}} \right) \right]}{\ln(m'-1)} \quad (100) \quad (15)$$

e

$$NDJ_{classes} = \frac{-\sum_{i=1}^{m'} \sum_{k=i+1}^{m'} \left[\left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}} \right) \cdot \ln \left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}} \right) \right]}{\ln(1/2[(m(m'-1))])} \quad (100) \quad (16)$$

Onde:

NDJ = nível de difusão e justaposição

e_{ik} = comprimento total da borda (m) entre unidades de uma mesma classe i e de uma classe k

m' = número de unidades presentes na paisagem pertencentes uma mesma classe

4.2.1 Dimensão Fractal (D)

A dimensão fractal dos dados como imagens TM ou classes de cobertura do terreno obtidas por um processo automático de classificação, pode ser calculada e usada como medida de complexidade espacial ou conteúdo de informação. É possível o uso do parâmetro D para sumarizar as mudanças de escala do fenômeno espacial, ou utilizar fractais não somente para descrever padrões, mas para gerar hipóteses a respeito das causas dos padrões (LAM, 1990).

A *dimensão fractal* foi calculada a partir da relação perímetro-área ao nível da paisagem e ao nível de classes. Foi utilizado o método tradicional baseado em análise de regressão, implementado no Fragstats 3.3 (MCGARIGAL e MARKS, 1995) e chamada de dimensão Fractal dilogarítmica (*DLFD*). A dimensão fractal D foi calculada no Programa Fragstats a partir da imagem classificada em formato raster.

É possível determinar D para um conjunto de regiões associadas a uma determinada classe (ex: resultado de uma segmentação) estimando-se os parâmetros da equação a partir da expressão linear fornecida por LAM (1990):

$$\ln(p_i) = \ln(c) + D \ln(\sqrt{s_j}) + \varepsilon \quad (17)$$

Onde:

p_i = perímetro da região

c = constante

s_j = área da região

ε = erro que reflete a homogeneidade das regiões e a consistência do processo de classificação.

A dimensão fractal calculada para as classes de cobertura utilizou análise de regressão e é igual a 2 dividido pela inclinação da curva de regressão do logaritmo da área (m^2) da unidade de paisagem pelo logaritmo do perímetro (m) da unidade de paisagem de acordo com MCGARIGAL e MARKS (1995):

$$DLFD = \left\{ \frac{\left[n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \cdot \ln a_{ij} \right] - \left[\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right] \left[\sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right]}{\left[n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right] - \left[\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right]} \right\} \quad (18)$$

Onde:

$DLFD$ = Dimensão fractal dilogarítmica

a_{ij} = Área (m^2) da unidade de paisagem ij

p_{ij} = Perímetro (m) do ij

O método da regressão requer um número suficiente (>20) de pares de área-perímetro para que possa fornecer resultados confiáveis. Quando isto não é possível é calculada a dimensão fractal média ($FRACT$) da unidade de paisagem que é igual a duas vezes o logaritmo do perímetro da unidade de paisagem (metros), dividido pelo logaritmo da área da unidade de paisagem (m^2), a saber:

$$FRACT = \frac{2 \ln(0,25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \quad (19) \text{ (MCGARIGAL e MARKS, 1995)}$$

Onde:

$FRACT$ = Dimensão fractal média das unidades

a_{ij} = Área (m^2) da unidade de paisagem ij

p_{ij} = Perímetro (m) do ij

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na seqüência representam a compilação das análises efetuadas para obtenção dos produtos da classificação orientada a objeto, análise de paisagem e análise fractal.

5.1 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA AO OBJETO

A discussão sobre classificação orientada a objeto limita-se ao processo de segmentação em três escalas e seus respectivos parâmetros. Somente os aspectos qualitativos em relação à delimitação das feições do terreno foram considerados. O processo de classificação propriamente dito, incluindo a criação de um banco de conhecimento com classes e subclasses é discutido, a seguir, mais amplamente.

5.1.1 Segmentação

A segmentação na imagem de 1999 gerou objetos que representavam satisfatoriamente as feições nas três escalas escolhidas. De igual modo, o conjunto de imagens de 2001 e 2003 apresentou objetos que se adequavam aos critérios de interpretação visual como a delimitação e a separação corretas de polígonos representando diferentes feições e a homogeneidade espectral interna dos mesmos.

O processo de segmentação de imagens digitais é sempre interativo, de modo que o usuário entra com valores (limiares) que determinam os critérios que vão definir o resultado final. Estes valores estão ligados diretamente aos objetivos de trabalho e também à heterogeneidade da área de interesse (SHANDLEY, FRANKLIN e WHITE, 1996). A segmentação multirresolução ou multiescala torna o processo mais flexível uma vez que feições de diferentes tamanhos e formas podem ser trabalhadas em diferentes níveis de segmentação.

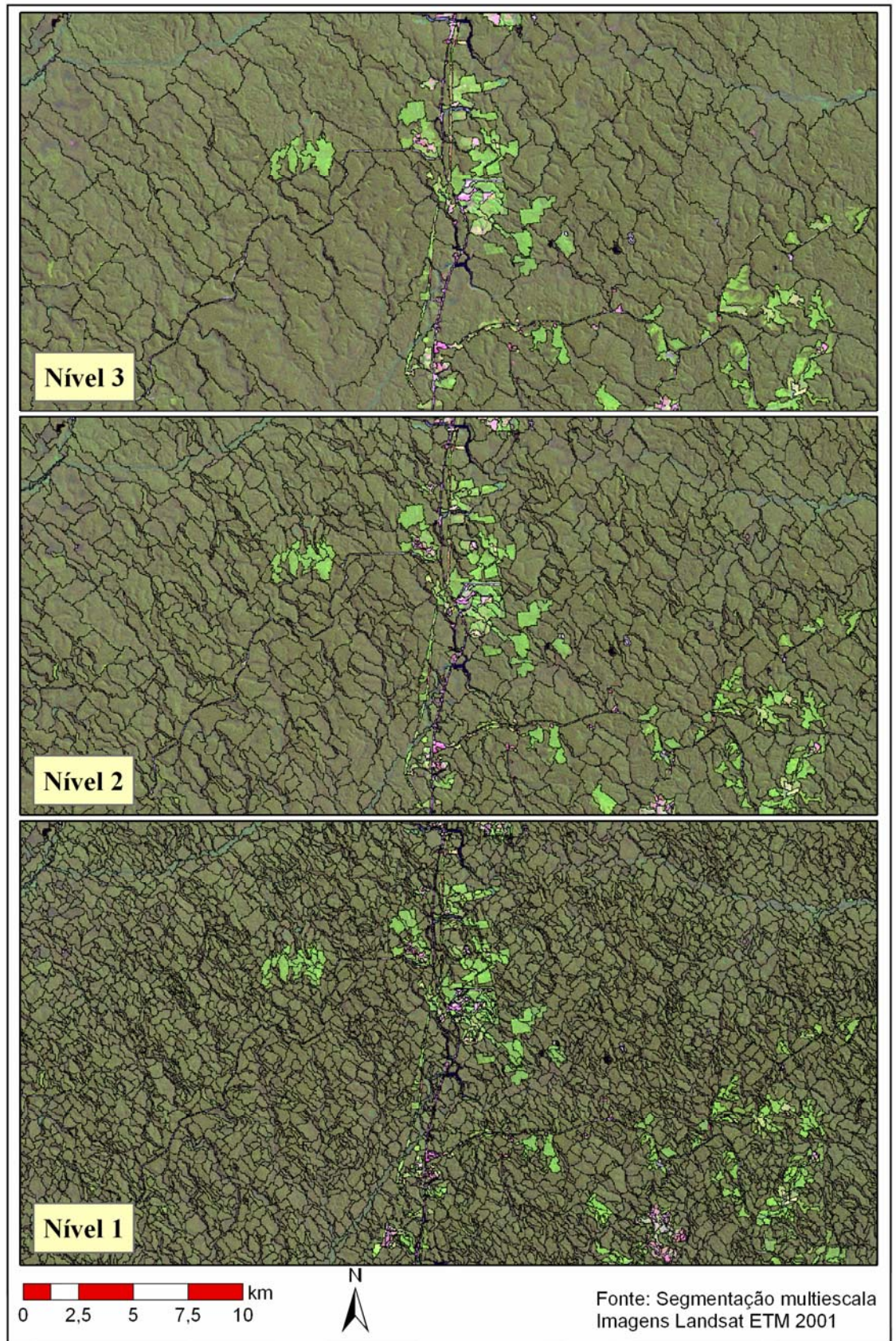
As opções de configuração da segmentação conduzem a infinitos resultados em imagens Landsat, tornando a tarefa de inspeção visual extremamente exaustiva. Geralmente a segmentação é satisfatória na primeira aproximação. Entretanto, a correção e o aperfeiçoamento de limites das feições pela manipulação dos critérios de forma (compacidade e suavidade) é sempre uma possibilidade.

Na segmentação realizada em um único nível é possível encontrar áreas segmentadas que são heterogêneas, contendo uma feição dominante e uma outra feição de área reduzida. Este resultado indesejável — devido à existência de classes temáticas com dimensões muito diferentes — é comum na segmentação convencional (NASCIMENTO e ALMEIDA FILHO, 1996). Por esta razão, o uso de níveis hierárquicos é perfeitamente adequado. Para as condições da área de estudo e objetivos do trabalho os limiares utilizados foram os mais adequados. Existe a possibilidade de outros valores fornecerem resultados similares, porém estes valores, de um modo geral, serão sempre próximos daqueles obtidos neste trabalho.

5.1.1.1 Parâmetros de escala

A segmentação que forneceu os resultados mais adequados, para cada conjunto de imagens, foi obtida utilizando-se os parâmetros de escala 7, 14 e 28 para os níveis 1, 2 e 3, respectivamente. Estes parâmetros foram obtidos após um processo iterativo de tentativa e erro, em conjunto com os critérios de homogeneidade. O uso de parâmetros de escala adequados possibilitou a extração de objetos de imagem homogêneos, com significados semânticos únicos e acurácia geométrica. Em outras palavras, a delimitação das feições em cada nível mostrou-se compatível com a interpretação visual baseada na informação espectral, no contexto e na experiência de campo (Figura 7). Comparativamente, áreas com reduzida cobertura florestal e predominância de áreas com formações antrópicas (como por exemplo: solo exposto, agricultura ou áreas urbanas) demandariam diferentes limiares para a segmentação.

FIGURA 7 – AMOSTRA DA SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM LANDSAT DE 2001



Na pesquisa de algoritmos para segmentação de imagens de satélite espera-se que cada segmento apresente acurácia posicional e temática (SCHIEWE, TUFTE; EHLERS, 2001). Por outro lado, a natureza não possui limites rígidos. Existem transições claras, mas também, transições suaves na cobertura do terreno. Por esta razão o conceito de objetos significativos³ é adequado, no sentido de permitir mais flexibilidade na questão da escala (BLASCHKE et al., 2000). Na segmentação convencional é possível ter-se feições bem delimitadas para uma determinada categoria de cobertura do terreno, enquanto uma outra não pode ser extraída adequadamente (COUTINHO, MIRANDA; MIRANDA, 2002).

O nível 3 da segmentação, gerado com o parâmetro de escala 28, teve como objetivo a obtenção de feições com características homogêneas e de grande tamanho, a saber, as florestas e os rios de largura maior do que 90 m (3 pixels). Neste nível com grandes objetos, a delimitação de feições³ foi levada em conta juntamente com o aspecto geral das feições, que foi privilegiado em detrimento do particular. Outras categorias, bem diferenciadas neste nível de segmentação como, por exemplo, as pastagens, poderiam ser melhor caracterizadas pelos diferentes componentes da cobertura, identificados a partir do nível de segmentação mais detalhado (nível 1). No nível 1, as pastagens, além de gramíneas, apresentam manchas de solo exposto ou regeneração natural e árvores isoladas, resultando em uma textura bastante variada. As variações no parâmetro de escala acima do nível 3, produziram objetos grandes contendo feições heterogêneas. Os objetos de imagem eram maiores e mais heterogêneos e não tinham valor na caracterização de classes de cobertura do solo com significado semântico superior dentro do esquema de classificação utilizado.

No nível 1 de segmentação, os objetos de tamanho próximo ao da resolução da imagem são perfeitamente delineados. A segmentação em uma resolução mais fina

³ Objetos da superfície terrestre que foram delimitados pela segmentação e possuem homogeneidade e limites corretamente definidos na escala escolhida.

permite o uso das características destes objetos menores, tendo em vista a seleção de descritores para as classes hierárquicas. Obviamente as feições com maior extensão (por ex. florestas) foram excessivamente segmentadas. Problemas de segmentação excessiva ou deficiente (subsegmentação) são irrelevantes quando existe a possibilidade de se trabalhar com níveis hierárquicos. Neste caso deve prevalecer o bom senso para evitar os extremos. Normalmente, a subsegmentação é um problema muito mais sério, pois classes diferentes ocorrem no mesmo segmento. No caso da segmentação excessiva pode-se realizar posteriormente a fusão dos objetos classificados em uma mesma categoria (SCHIEWE, 2002).

O nível intermediário (2) foi escolhido para conter a classificação final. Neste nível, a segmentação apresentou o melhor resultado de acordo com os objetivos deste estudo. Valores adequados de parâmetros da segmentação dependem dos objetivos do trabalho e das características da área, como relevo e uso da cobertura do terreno (ALVES et al., 1996).

Os resultados obtidos para os níveis de segmentação 1 e 3 foram satisfatórios pois o aumento do valor do parâmetro de escala no nível 3 resulta em maior heterogeneidade dos objetos. Uma redução no valor do parâmetro de escala do nível 1 gera polígonos com tamanhos excessivamente reduzidos. O tamanho adequado dos objetos que representam solo exposto e sucessão secundária foi obtido com o parâmetro de escala 7. Com este parâmetro, as feições de menor tamanho foram bem delimitadas, permitindo sua classificação nas etapas posteriores do processo de classificação orientada a objeto.

5.1.1.2 Critérios de Homogeneidade

No critério de homogeneidade (espectral e forma) considerou-se um maior peso (0,8) para o componente espectral, enquanto a forma teve um peso menor (0,2) no processo decisório de homogeneidade. Áreas com formas geométricas bem

definidas, semelhantes àquelas das plantações comerciais, são raras na área de estudo. Pela mesma razão a suavidade da forma foi privilegiada (peso = 0,8) em detrimento da compacidade (peso = 0,2). Não existe no local a feição típica de extensas áreas agrícolas, normalmente encontrada no sul e sudeste do país.

5.1.1.3 Aspectos relevantes da segmentação

No processo de obtenção dos limiares verificou-se que o uso de limiares maiores do que os utilizados neste trabalho, para a forma e compactação, para o mesmo parâmetro de escala, resultou em objetos menores. Isto significou um aumento do número de elementos formadores do objeto que aparentemente não acrescentou vantagem na geração de objetos de imagens.

Nota-se que a despeito da resolução espacial das imagens usadas neste estudo (30 m), o critério de homogeneidade é tão importante quanto o parâmetro de escala, na delimitação correta das feições. O princípio de estabelecer polígonos os maiores possíveis e tão pequenos quanto forem necessários (DEFINIENS, 2001) implica em simplicidade e economia úteis em qualquer processamento digital de imagens.

As características específicas e diferenciadas das imagens do sensoriamento remoto demandam técnicas de segmentação que considerem seus aspectos multiespectral, multiescala e a variedade de feições (tamanho, forma e comportamento espectral). COUTINHO, MIRANDA e MIRANDA (2002) relataram a inviabilidade de se mapear corpos d'água devido às dimensões dos polígonos gerados comparativamente com as de outras feições. O custo de uma segmentação excessiva, para as demais classes seria elevado. Por esta razão, os métodos de segmentação devem ser sistemas complexos que possam trabalhar com dados de várias origens simultaneamente, integrar estratégias de segmentação adequadas para todos os tipos de objetos que serão extraídos e criar vários níveis de generalização (SCHIEWE, 2002).

Em todo o processo, a segmentação em várias escalas foi realizada com sucesso, permitindo a criação dos três níveis de generalizações. Todavia, ainda foi necessária a interação do usuário para entrada dos parâmetros e avaliação visual dos resultados. Segundo SCHIEWE, (2002) isto é devido a uma ausência de funcionalidade dos algoritmos de segmentação e a uma dificuldade de definir generalizações para determinadas aplicações. Os variados resultados que podem ser obtidos em função da interação dos parâmetros e imagens precisam ser mais estudados, tendo em vista o possível estabelecimento de valores padrões para rotinas de segmentação (SHANDLEY; FRANKLIN; WHITE, 1996).

A avaliação da segmentação em imagens digitais ainda é realizada visualmente na maioria das vezes em que esta técnica é empregada (como por ex.: ALMEIDA FILHO; NASCIMENTO; BATISTA (1998), SHIMABUKURO et al. (1998)). Segundo SHANDLEY; FRANKLIN e WHITE (1996), pesquisadores têm encontrado dificuldade em fazer afirmativas quantitativas sobre resultados de segmentação. DARWISH, LEUKERT e REINHARDT (2003) afirmam que a avaliação da segmentação é feita indiretamente pela avaliação da classificação.

Recentemente foi desenvolvido um sistema quantitativo para avaliação da segmentação baseado em medidas de discrepância em relação a um dado de referência (OLIVEIRA, 2003). A pesquisa foi realizada em área agrícola com parcelas bem delimitadas e espécies identificadas no campo com GPS e mapa da interpretação visual, o que propiciou a aplicação da metodologia.

O índice proposto pelo estudo (Índice de Avaliação da Segmentação - IAVAS) requer adaptações e modificações para ser usado em área com feições naturais caracterizadas por limites irregulares e texturas variadas. Todavia, segmentos nunca representarão objetos com significado em uma única escala (BLASCHKE e STROBL, 2001). Uma escala ideal de objetos não existe. Objetos de diferentes níveis da segmentação (espacial) e diferentes significados (temáticos) devem ser combinados para diferentes aplicações (BLASCHKE et al., 2000).

Assim, os resultados de processos automáticos são variados para os diferentes tipos e tamanhos de cobertura do terreno. Desta maneira, os métodos de

amostragem desenvolvidos para pontos isolados são adaptações para testar acurácia de formas irregulares dos polígonos ou áreas resultantes da segmentação. Por esta razão, uma avaliação robusta e exequível dos resultados de segmentação ainda não foi estabelecida como padrão ou referência.

5.1.2 Classificação Orientada a Objeto

5.1.2.1 Níveis Hierárquicos

A base de conhecimento possui três níveis hierárquicos relacionados respectivamente com os níveis 1, 2 e 3 da segmentação (Figura 8). Estes níveis são separados por descritores e visam a manipulação dos níveis de segmentação hierárquica de forma independente e transparente. Não devem ser confundidos com os níveis de classificação que se referem às classes e subclasses de cobertura do terreno, as quais podem se apresentar em qualquer nível de segmentação.

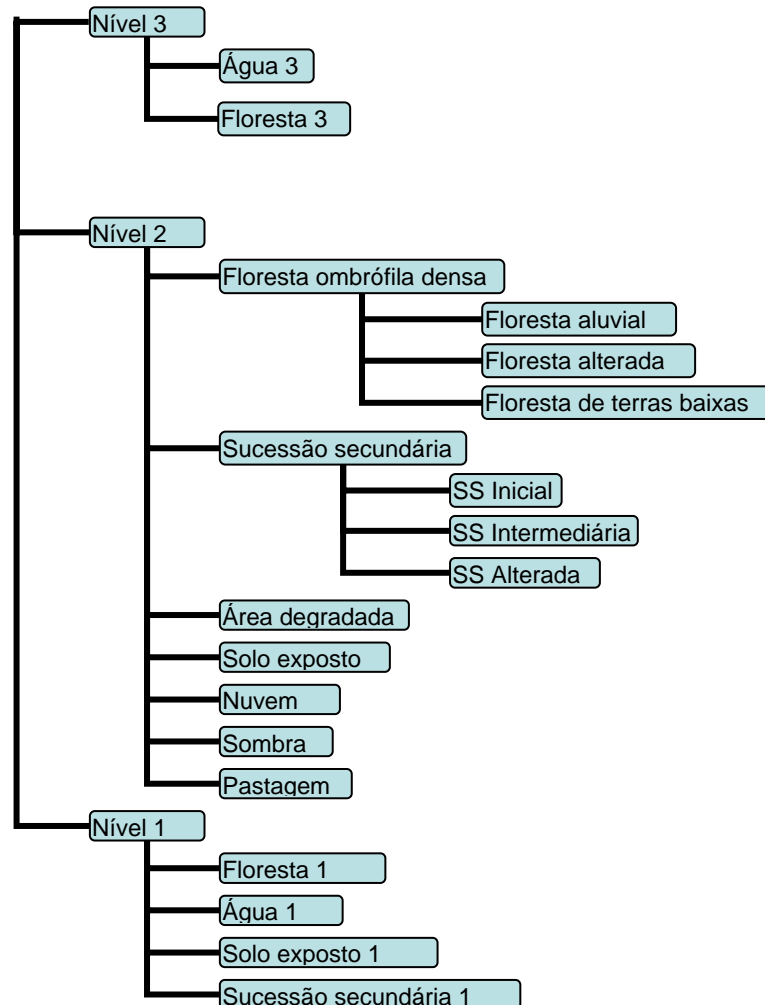
O nível 3 do banco de conhecimento relacionado com o nível de segmentação de menor resolução é útil na classificação das feições de maior tamanho, aquelas que tem maior extensão na cobertura do terreno. As feições Floresta e Água se enquadram perfeitamente nesta descrição para a área em estudo. O nível 2 é o nível onde será produzida a classificação final. O nível 1 serve principalmente para a classificação das feições solo exposto e sucessão secundária. Os três níveis, usados em conjunto, permitem trabalhar as relações de vizinhança entre os objetos de modo que os descritores de classe sejam introduzidos.

5.1.2.2 Grupos

Além dos níveis 1, 2 e 3, o banco de conhecimento possui classes abstratas (Sistema Primário e Sistema Secundário) para o agrupamento das classes de acordo com o sistema do IBGE (ver item 4.1.3, Quadro 2). As classes de cobertura que não se

enquadram neste sistema são agrupadas na categoria "Outros". As categorias usadas para nomear os *grupos* não possuem descritores e são marcadas como abstratas (Figura 9).

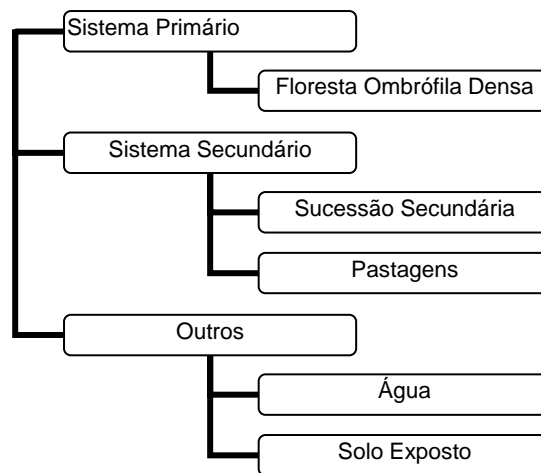
FIGURA 8 - HIERARQUIA DE CLASSES ELABORADA PARA CLASSIFICAÇÃO NO eCOGNITION



Este procedimento de agrupamento é realizado de forma interativa pelo usuário, de modo que as classes correspondentes a cada *grupo* são transportadas para dentro dos mesmos. Através deste processo, classes que não guardam relação hierárquica podem ser agrupadas de modo a permitir um resultado (classes de uso e ocupação do solo agrupados de acordo com o sistema do IBGE) para a visualização e análise. Como por exemplo, as classes de sucessão secundária e pastagem são

agrupadas na categoria Sistema secundário, de acordo com a classificação do IBGE, ainda que não possuam relações hierárquicas entre si. Deste modo o mapa gerado apresentará apenas três categorias bem distintas: Sistema primário, Sistema secundário e Outros.

FIGURA 9 - AGRUPAMENTO DAS CLASSES DE ACORDO COM SISTEMA IBGE



Três classificações foram geradas nos diferentes níveis de segmentação. Todavia, somente a segmentação no nível 2 foi usada para gerar a classificação final, com todas as classes de interesse. Basicamente, as classes estabelecidas nos níveis 3 e 1 são generalizadas, isto é, sem subclasses e atendem às feições de grandes e pequenas dimensões, respectivamente. O uso destes resultados na classificação final, realizada no nível 2, implica no relacionamento de classes entre os níveis de segmentação. Sendo assim o processamento é iterativo e se desenvolve em ciclos para obtenção de uma classificação de objetos interligados.

5.1.2.3 Descritores de classe

O banco de conhecimento é mais do que uma lista de feições encontradas na área de estudo e suas relações hierárquicas. Os descritores de classes são fundamentais

para execução do algoritmo de classificação que faz a separação baseada neles. Para separação das classes principais (mães) foi usado o algoritmo vizinho mais próximo padrão (secção 4.1.3), enquanto que as classes filhas (subclasses) possuem diferentes critérios para diferenciá-las. Este arranjo de classes e seus descritores constituem o banco de conhecimento necessário para executar a classificação. O conhecimento prévio da área de estudo, das características espectrais dos diferentes tipos de cobertura do terreno bem como suas relações espaciais reveste-se de uma importância maior do que em uma simples classificação supervisionada. Este banco ou base de conhecimentos pode ser reutilizado e/ou adaptado a condições semelhantes na região. Assim, o mesmo banco foi usado na área de estudos em períodos diferentes, tendo a mesma estrutura (Figura 8).

Para exemplificar o uso dos descritores a classe Floresta Ombrófila Densa foi classificada a partir da classificação dos objetos no nível 3 e no nível 2. Desta maneira os descritores *existência de floresta no nível 3* e *área relativa de floresta no nível 1* foram usados. Além disso, foi utilizado o operador lógico *or (max)* que retorna todos os elementos que preenchem a condição em cada conjunto (cf. item 2.1.3.1). Por outro lado, a Classe Floresta Ombrófila de Terras Baixas, que é uma subclasse da Floresta Ombrófila Densa, foi descrita a partir do descritor herdado e um novo descritor que a torna única. Neste caso, como novo descritor, foi usada uma razão entre a média do segmento na banda 4 e média nas demais bandas. O operador lógico usado foi *and (min)*. Os descritores usados são apresentados no Apêndice 1.

Quando os descritores de uma determinada classe se referem a uma outra classe é necessário efetuar a classificação tendo em conta este relacionamento entre classes. No processamento, o uso de classes relacionadas implica no fato de que cada objeto é classificado várias vezes em decorrência da classificação de outros objetos interligados. O uso desse tipo de relacionamento é mais complexo, pois a classificação de um objeto muda devido à classificação de um outro que está interligado. Portanto, dependências circulares foram evitadas para não tornar o processo instável. Assim,

descritores condicionados à classificação a priori de alguma feição, não foram empregados no mesmo nível de segmentação.

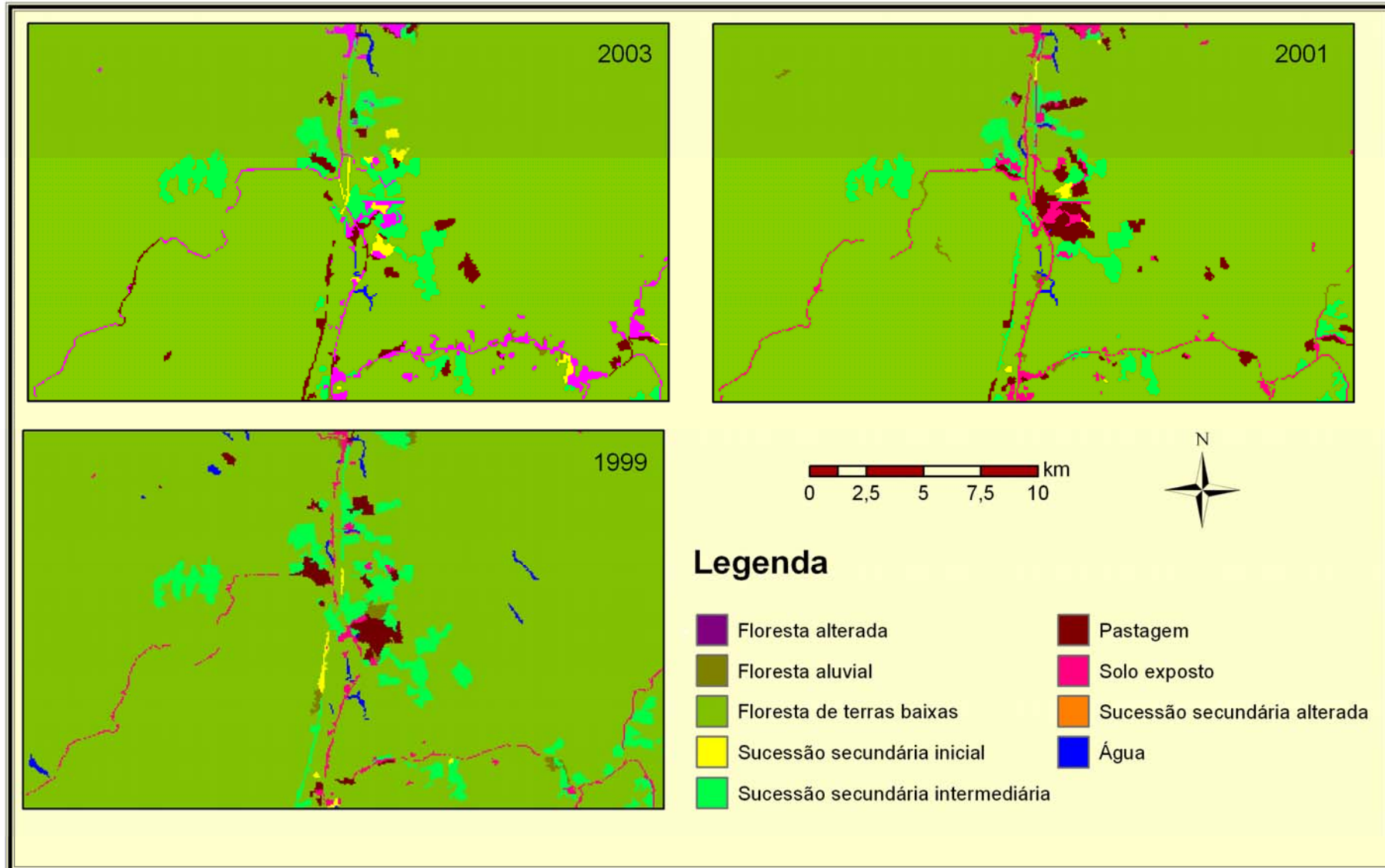
5.1.2.4 Classificação

O resultado da classificação das imagens de 1999, 2001 e 2003 não apresenta pixels isolados como acontece na classificação convencional (Figura 10). A classificação orientada a objeto resultou em um produto com aspecto mais homogêneo e mais próximo do que seria a interpretação visual humana, conforme já relatado por vários autores (HOFMANN, 2000; BLASCHKE e STROBL, 2001). As grandes extensões de florestas encontradas no local foram adequadamente classificadas, bem como os corpos d'água e áreas de influência antrópica, considerando as limitações de resolução das imagens usadas. A classificação obtida no nível de segmentação com menor resolução funcionou como uma máscara para as feições floresta e água, isolando as demais.

A classificação dos objetos do nível de maior resolução foi satisfatória para as classes que apresentavam menor dimensão tendo em vista o uso desta informação na classificação final realizada no nível intermediário. As feições lineares como rodovias, estradas secundárias e linhas de transmissões foram perfeitamente classificadas nesta resolução da segmentação. Conquanto não se tenha usado aspectos da forma, a segmentação destas feições favoreceu a classificação baseada nas características espectrais dos objetos delimitados no processo. Erros eventuais na classificação deste nível foram eliminados de forma eficiente na classificação total e final efetuada no nível 2 de segmentação.

A riqueza de informações contida no resultado da classificação orientada a objeto juntamente com os valores de participação *fuzzy* permitem inferências diretas a respeito da natureza, incluindo heterogeneidade e possíveis combinações, dentro das classes de cobertura.

FIGURA 9 - AMOSTRA DA CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS DE 1999, 2001 E 2003.



É possível identificar componentes, quantificar sua participação em polígonos heterogêneos, caso seja de interesse ou haja necessidade. WANG (1990a) havia deduzido que este tipo de informação poderia ser obtido na classificação convencional. Esta possibilidade se expande de forma multiplicativa na classificação orientada a objeto que utiliza níveis de segmentação hierárquicos como material para construção do banco de conhecimentos. As imagens resultantes da classificação das imagens de 1999, 2001 e 2003 são apresentadas no Apêndice 2.

O resultado clássico apresentado é resultante de uma redução dos valores *fuzzy* de participação gerados no processo para um valor único. Uma primeira aproximação para a avaliação da acurácia é dada pelas imagens de estabilidade da classificação. Dos três maiores valores possíveis de participação de um determinado objeto nas classes, a diferença entre o primeiro e o segundo, traduzida em uma escala de cores, indica a maior ou menor estabilidade da classificação. No exemplo mostrado. As cores em verde representam objetos classificados com uma grande diferença entre o primeiro valor e o segundo de participação a classes. Nesta escala a cor vermelha representa alto grau de instabilidade.

5.1.3 Acurácia da Classificação

A avaliação da acurácia apresenta limitações devido ao fato de que os dados de referência foram obtidos em data posterior (2004) à tomada das imagens. Vale ressaltar que o resultado da classificação orientada a objeto é um produto diferenciado daquele obtido na classificação convencional e, como consequência requer uma avaliação diferenciada que ainda não está completamente desenvolvida e assimilada.

Uma primeira aproximação é a chamada confiabilidade ou estabilidade da classificação (DEFINIENS, 2001). No resultado de uma classificação *fuzzy* os objetos podem pertencer a várias classes, com diferentes graus de participação. Para avaliar a confiabilidade é necessário avaliar os diferentes graus de participação. A estatística

descritiva dos graus de participação auxilia na interpretação destes resultados. Na Tabela 1 são apresentados os resultados para esta análise com os resultados de 1999. O objetivo é avaliar a estabilidade da classificação com base na diferença entre o melhor e o segundo valor do grau de participação.

TABELA 1 - ESTATÍSTICA DA DIFERENÇA ENTRE O PRIMEIRO E O SEGUNDO RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO PARA IMAGEM DE 1999

Classe	Objetos	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Floresta de Terras Baixas	7.738	0,99	0,01	0,5	1
Floresta aluvial	292	0,96	0,07	0,5	1
Floresta alterada	5	1	0	1	1
Sucessão inicial	73	0,98	0,03	0,82	1
Sucessão intermediária	897	0,99	0,03	0,6	1
Sucessão alterada	10	1	0	1	1
Pastagem	229	0,06	0,09	0	0,8
Solo exposto	2.806	0,87	0,33	0	1
Água	831	0,76	0,41	0	1

Pela Tabela 1 verifica-se que as classes de um modo geral foram classificadas com um alto grau de confiabilidade. Os valores de mínimo mostram que os objetos das classes de floresta foram bem discriminados e não têm possibilidade de ser classificados em uma outra categoria. Existem objetos que pertencem somente a classe floresta e não pertencem a nenhuma outra classe, como se pode verificar pelo valor máximo 1. Isto ocorre para as demais classes com exceção da classe pastagem que apresenta objetos com grau de participação no máximo igual a 0,8.

A acurácia total obtida a partir dos valores da matriz de erro foi de 98% para a imagem de 1999. O valor de *Kappa* obtido foi de 97% . Estes valores são considerados elevados. CONGALTON (1991) afirma que valores acima de 80% significam que *Kappa* é elevado. As classificações obtidas para as imagens de 2001 e 2003 apresentaram resultados semelhantes. Em 2001 os valores de acurácia total e *Kappa* foram de 96 e 95 %, respectivamente. Em 2003 os valores chegaram a 100%.

5.2 ANÁLISE DA PAISAGEM

Neste item são apresentados os resultados e a discussão para a análise da estrutura da paisagem nos três anos de estudos (1999, 2001 e 2003). Para isto foram utilizados os índices gerados pelo Fragstats 3.3 para a paisagem total e classes de cobertura. Os *índices da paisagem* representam o padrão espacial do mosaico total de paisagem, considerando todos os tipos de unidades simultaneamente, enquanto os *índices das classes* representam a distribuição espacial e o padrão de um único tipo de unidade (classe) dentro da paisagem.

5.2.1 Índices da Paisagem

5.2.1.1 Tamanho e densidade da paisagem

Na Tabela 2 são apresentados os índices: *número de unidades de paisagem*, *densidade*, *área* e coeficiente de variação para toda a paisagem. Observa-se que o número de unidades de paisagem na área de estudo aumentou nos anos de 1999 a 2001 e de 2001 a 2003. Foram verificados os acréscimos de 244 unidades em 2001 e 430 unidades em 2003, respectivamente 3,3% e 20,2% de aumento no número de unidades da paisagem. Estes valores indicam claramente o aumento de fragmentação da área como um todo e mais acentuadamente de 2001 a 2003.

Ao mesmo tempo em que o número de unidades da paisagem aumentou, constatou-se a redução do tamanho médio das unidades. A diminuição do *tamanho médio das unidades de paisagem* é principalmente, o resultado da multiplicação de áreas de pequena extensão. Outro fator que contribuiu para redução deste índice foi o desflorestamento. É possível que pela redução do tamanho das unidades de paisagem mais extensas, a média tenha sido influenciada, todavia em menor escala do que pela multiplicação das áreas pequenas.

TABELA 2 - ÍNDICES DE ÁREA, DENSIDADE E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA A PAISAGEM TOTAL

Índices	1999	2001	2003
Área total (ha)	450.000	450.000	450.000
Número de unidades	2.784	2.876	3.458
Tamanho médio das unidades (ha)	161,6	148,6	130,1
Densidade em 100 ha	0,6	0,7	0,8
Unidade de maior tamanho (%)	84,2	54,3	72,4
CV ⁽¹⁾ do tamanho da unidade	4.442,9	3.222,5	4.284,8

(1) coeficiente de variação

O índice *maior unidade de paisagem* corresponde à área (em m²) da maior unidade da paisagem dividida pela área total da paisagem, multiplicada por 100. Este índice corresponde à percentagem da área da paisagem ocupada pela maior unidade de paisagem. De 1999 a 2003 foi constatada uma redução de pelo menos 12,2% no tamanho da maior unidade.

A redução no valor do índice *maior unidade da paisagem* verificada em 2001 é decorrente de uma melhor delimitação das estradas secundárias, concretizando a separação dos grandes blocos de floresta nativa. A ausência de manutenção destas estradas resultou na impossibilidade de diferenciação espectral entre estas e a floresta marginal. Juntamente com isto, aspectos do sombreamento devido ao relevo resultaram na classificação destes trechos de estrada, como floresta. Por esta razão, nos anos de 1999 e 2003 os valores de maior unidade de floresta foram elevados em comparação a 2001. O coeficiente de variação do tamanho das unidades de paisagem apresenta uma redução em 2001, voltando a crescer em 2003, sugerindo maior variedade no tamanho de unidades de paisagem em 2003.

Evidentemente, com o aumento da fragmentação a *densidade das unidades de paisagem*, ou seja, o número de unidades em 100 hectares, aumentou. A composição da paisagem refletida nestes números mostra uma mudança gradual na sua estrutura com o aumento do número de unidades de paisagem e diminuição do tamanho das unidades maiores. Obviamente, o processo de fragmentação ocorre

principalmente ao longo das estradas em função da abertura de novas áreas para agricultura de queima e roça (familiar), fruticultura e chácaras. As áreas de expansão urbana colaboram, ainda que em menor escala, na redução da cobertura vegetal, devido a abertura de novas áreas residenciais e chácaras.

Os índices obtidos ao nível de paisagem são médias obtidas a partir das unidades. Apesar disso, servem como importantes indicadores da fragmentação em cada ano analisado. Vários índices têm sido propostos para descrever a complexidade de paisagem (FORMAN e GODRON, 1986; TURNER, 1990; MILNE, 1991; MCGARIGAL e MARKS, 1995). Estes índices podem ser classificados em quatro grandes grupos, a saber: índices de área; borda e forma; diversidade e configuração (IVITS e KOCH, 2002). Entretanto, a existência de correlações entre eles e problemas relacionados a mudanças na escala fazem com que o número de índices efetivos seja reduzido de forma expressiva (HARGIS, BISONETTE e DAVID, 1998).

O uso correto e a interpretação dos índices da paisagem estão ligados ao entendimento de limitações, amplitude dos valores e possíveis variações do contexto em que são empregados. O uso de vários índices redundantes e correlatos (BATTISTELLA, 2001) ou apenas alguns poucos índices que expressam a composição e configuração da paisagem (FROHN et al., 1996; JORGE e GARCIA, 1997; SOARES FILHO, 1998) está relacionado com os objetivos do trabalho e os dados disponíveis para análise. Neste trabalho, a mesma paisagem é analisada em uma escala temporal, utilizando a mesma base de dados. Isso permite que comparações com base nos índices sejam efetuadas sem problemas relacionados ao tamanho e a escala dos dados utilizados.

Observa-se pelos resultados apresentados que a paisagem é dominada por uma grande unidade de paisagem e possui inúmeras unidades de menor tamanho. Estes índices, analisados até aqui, mostram uma rápida modificação na paisagem com a redução do elemento dominante e aumento do número de unidades de paisagem, notadamente as de menor tamanho. Estudos desta natureza vêm sendo realizados com

um número reduzido de classes (FROHN et al., 1996; BATTISTELLA, 2001; MILLINGTON, VELEZ-LIENDO; BRADLEY, 2003) de modo que pouca informação é fornecida sobre o que acontece com outras coberturas do terreno que não sejam da categoria floresta, pois são agrupadas em apenas uma categoria ou no máximo duas. No entanto, as informações sobre as unidades de menor tamanho são de extrema importância para a compreensão do padrão espacial e de mudanças que pode ser detectado na paisagem.

O mapa temático obtido da classificação (Apêndice 2) revela que o padrão de desflorestamento ainda é a abertura de pequenas áreas para agricultura, a partir das vias rodoviárias ou fluviais. Este padrão é comum e está amplamente documentada a relação entre a abertura de estradas e desflorestamento. Portanto, com a consolidação das estradas e sua manutenção pode-se esperar um aumento progressivo da fragmentação e redução da cobertura florestal, comprometendo seriamente a sustentabilidade das práticas de uso do terreno no local. Posteriormente, a análise dos índices ao nível das classes fornecerá melhores indicadores sobre a estrutura da paisagem e as mudanças ocorridas.

5.2.1.2 Borda e forma da paisagem

Um outro grupo de descritores da paisagem está relacionado com o efeito de borda nos fragmentos e suas formas. O *comprimento total das bordas* é igual a soma dos comprimentos (m) de todos os segmentos de borda na paisagem. A *densidade de bordas* tem a mesma função que o *comprimento total das bordas*, apresentando o comprimento de bordas por unidade de área para facilitar a comparação entre paisagens com tamanhos diferentes (MCGARIGAL e MARKS, 1995). Observa-se na Tabela 3 que a borda total não aumentou em 2001, permanecendo no mesmo patamar que em 1999. Acredita-se que este resultado está relacionado com a fraca delimitação das estradas vicinais, como foi explicado anteriormente. O aumento em 2003 era

esperado devido à multiplicação das unidades de paisagem. Conseqüentemente, a densidade apresentou o mesmo padrão de crescimento em 2001 e 2003.

A quantidade de bordas em uma paisagem desempenha um papel importante no comportamento das variáveis ambientais e conseqüentemente sobre as espécies locais. Vários trabalhos têm sido realizados para estudar o efeito de bordas na região amazônica. LAURANCE et al. (2002) apresentam os resultados de 22 anos de pesquisas em fragmentos de vários tamanhos e mostram que o dano causado por ventos pode ser constatado até 400 m dentro do fragmento. Um dos mais significativos efeitos é o forte aumento de danos e mortalidade de árvores que ocorre dentro dos 100 m de borda. Mudanças decorrentes do efeito de borda são importantes no delineamento de unidades de conservação e determinação de limiares de desflorestamento em áreas de forte pressão antrópica.

TABELA 3 - ÍNDICES DE BORDA E DENSIDADE DE BORDA DA PAISAGEM TOTAL

Índices	1999	2001	2003
Borda total (m)	7.624.350,0	7.557.300,0	8.357.460,0
Densidade de bordas (m/ha)	16,9	16,8	18,6
Índice de forma da paisagem	28,4	28,1	31,1

O *índice forma da paisagem* é igual ao comprimento total das bordas em uma paisagem, dividido pela raiz quadrada da área da paisagem. É uma medida padrão do comprimento total da borda ou densidade de borda ajustada ao tamanho da paisagem. O *índice de forma da paisagem* também aumentou em 2003 e permaneceu estável de 1999 a 2001. Este índice mede a relação perímetro-área para a paisagem como um todo. Portanto, não houve aumento de complexidade na forma das unidades neste período. Por outro lado, em 2003 com o aumento deste índice, confirma-se que a paisagem possui mais bordas, como resultado de um maior número de unidades de paisagem e do aumento na irregularidade das bordas.

Na Tabela 4 é apresentado o índice *de forma médio* da paisagem e coeficiente de variação. O *índice de forma médio* é calculado a partir do índice *forma* de todas as unidades da paisagem. É o somatório da divisão do perímetro (m) pela raiz quadrada da área (m²) de cada unidade da paisagem, ajustado por uma constante para uma forma quadrada padrão, dividido pelo número total de unidades. Este índice pode crescer à medida que a forma se torna mais irregular, à medida que o comprimento de bordas dentro da paisagem aumenta, ou ambos. A forma também está relacionada com o efeito de borda, pois, juntamente com o tamanho da unidade de paisagem, determina a extensão da bordadura com as unidades vizinhas.

TABELA 4 - ÍNDICES DE FORMA E VARIAÇÕES DA PAISAGEM TOTAL NOS ANOS 1999,2001 E 2003

Índices	1999	2001	2003
Índice de forma médio	1,8	1,8	1,8
Índice de forma ponderado pela área	18,0	11,5	14,6
CV ⁽¹⁾ da forma	50,04	49,03	50,8

(1) coeficiente de variação

Este índice não apresentou mudanças no período estudado. Sua variação, também foi constante dentro de cada ano, conforme indicado pelo coeficiente de variação. As unidades de paisagem mantiveram-se dentro do padrão de complexidade original determinado pelas formas tradicionais de uso do terreno, ainda que nos últimos anos tenha se verificado um aumento da mecanização, principalmente na abertura de novas áreas. Uma outra forma de analisar este índice é fazendo um ajuste para o tamanho das unidades de modo que os valores obtidos sejam ponderados pela área de cada unidade dividida pela área total da paisagem. Desta maneira, em 2001 observa-se um decréscimo no índice em relação ao ano de 1999. Todavia, em 2003 houve um aumento em relação a 2001. Os valores ponderados maiores do que os não ponderados apontam para uma maior irregularidade de forma das unidades de maior tamanho em relação às de tamanho médio.

A interação entre forma e tamanho pode influenciar vários processos ecológicos importantes (MCGARIGAL e MARKS, 1995). Juntamente com a informação sobre quantidade de borda, a forma potencializa a informação relacionada ao efeito de borda. O fato de existir uma unidade dominante na paisagem sugere que a forma pode ser melhor entendida a partir dos valores ponderados.

5.2.1.3 Contágio e nível de dispersão e justaposição da paisagem

Um terceiro grupo de índices analisado neste trabalho refere-se à configuração da paisagem. A configuração da paisagem está relacionada às características da distribuição física ou espacial das unidades de paisagem. O *contágio* é uma destas medidas de configuração. O *contágio* quantifica o grau de agregação de uma paisagem, destacando a conectividade entre as unidades. O *nível de difusão e justaposição* é um outro índice que quantifica a configuração e é baseado na adjacência entre unidades de paisagem. Cada unidade é avaliada a respeito da adjacência com todos os outros tipos de unidades.

O *contágio* permanece no mesmo patamar (85%) nos anos de 1999 e 2001, porém cai para 82% em 2003 (Tabela 5). Os valores altos demonstram que a área, relativamente pouco fragmentada, é dominada por um tipo específico e extenso de unidade de paisagem. A redução deste valor em 2003 aponta para o aumento da fragmentação e redução de tamanho desta unidade mais conectada. Porém, observando-se o aspecto geral da área constata-se que este valor não pode ser considerado baixo, pois valores baixos de *contágio* indicam uma paisagem dissecada em muitas unidades de paisagem (SOARES FILHO, 1998). A classificação orientada a objeto evita problemas de estimativas de *contágio* reduzidas. Isto acontece na classificação convencional devido ao ruído de pixels isolados, classificados erroneamente, aumentando a fragmentação aparente de uma cena (FROHN et al., 1996).

TABELA 5 - CONTÁGIO E NÍVEL DE DIFUSÃO E JUSTAPOSIÇÃO DA PAISAGEM

Índices	1999	2001	2003
Contágio	85,31	85,70	82,10
Nível de difusão e justaposição	54,49	50,81	65,94

O índice de *difusão e justaposição* mede o nível de mistura entre as unidades. Valores altos são obtidos em paisagens nas quais os tipos de unidades estão, em relação uns aos outros, igualmente adjacentes. Por outro lado, os valores baixos caracterizam paisagens onde a distribuição eqüitativa dos tipos de unidades (classes de cobertura) é fraca, isto é, uma distribuição não proporcional de adjacências entre os diversos tipos de unidades de paisagem (MCGARIGAL e MARKS, 1995).

Os resultados obtidos (Tabela 5) apresentam valores que podem ser considerados médios, uma vez que este índice varia de 0 a 100. Observa-se uma diminuição entre os dois primeiros anos, porém foi obtido um maior valor em 2003, indicando um espalhamento em proporções iguais dos diferentes tipos de unidades da paisagem na área de estudos. A retomada da abertura de novas áreas em decorrência da recuperação das vicinais e a abertura de novas estradas favoreceu a formação de novas unidades de paisagem em outros locais. Assim a configuração foi mudada, resultando no valor obtido em 2003.

5.2.2 Índices por classes de cobertura do terreno

5.2.2.1 Tamanho e densidade por classe de cobertura

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as classes de cobertura do terreno. Estes índices devem ser analisados conjuntamente e dentro do contexto em que estão inseridos, uma vez que os cálculos efetuados são baseados nas unidades de paisagem e classes de cobertura do terreno. Inicialmente, as informações básicas geradas sobre a área de estudo são importantes para a compreensão dos valores de

composição e configuração que se seguem. Deste modo, a área ocupada pelas principais classes de cobertura do terreno, sendo uma informação básica, constitui-se em uma primeira aproximação na descrição da estrutura da paisagem, com base nas classes de cobertura. A área ocupada pelas classes de cobertura do terreno é apresentada com as respectivas percentagens de ocupação em relação à paisagem total (Tabela 6).

A área de uma classe é uma medida de composição da paisagem e mostra o quanto um tipo particular de unidade ocupa a extensão da paisagem (MCGARIGAL e MARKS, 1995). Neste trabalho é de particular importância saber qual a área de cobertura florestal na paisagem delimitada. Evidentemente, pelos resultados da classificação, a área de maior extensão é a área coberta por florestas.

TABELA 6 - ÍNDICES DE ÁREA EM HECTARES E PERCENTAGEM DE COBERTURA DAS CLASSES

Índices	Área total (ha) e percentagem		
	1999	2001	2003
Classes			
Floresta de terras baixas	389.190,5	389.202,9	378.238,2
Floresta aluvial	4.483,3	3.806,4	7.949,1
Floresta alterada	15,7	203,0	4.045,0
SS ¹ Intermediária	13.905,6	7.799,1	7.941,5
SS ¹ inicial	800,2	964,7	3.793,5
SS ¹ alterada	74,9	234,9	1.363,7
Pastagem	3.925,4	6.350,8	724,4
Solo exposto	20.314,3	27.396,1	26.708,3
Água	14.486,0	13.268,7	10.375,3

(1) SS =sucessão secundária

Os resultados apontam para um valor em torno de 85% da paisagem como sendo a área coberta por florestas nos três anos estudados. Esta proporção reflete bem a situação que prevalece no Estado do Amazonas, nos últimos anos, como um Estado que possui os menores índices de desflorestamento (INPE, 2005).

A alta percentagem de florestas dentro dos limites desta paisagem é realçada pelo fato de que esta área está localizada próxima a cidade de Manaus, capital do

Estado e conectada por Rodovias pavimentadas e inúmeras vicinais. Além da facilidade de acesso, a área já foi alvo de projetos agropecuários incentivados pelo e do Planejamento, no passado. Apesar disso, possui uma cobertura vegetal relativamente alta quando comparada a outras áreas em condições semelhantes na Amazônia. De fato, a omissão das indústrias em desenvolver projetos agropecuários, o abandono de alguns destes projetos e as condições precárias das vicinais retiveram um pouco este processo de desflorestamento tão comum na Amazônia. Todavia a pavimentação da Rodovia que liga Manaus a Boa Vista e a recuperação das vicinais trouxeram um novo impulso a colonização da área com projetos agropecuários nos últimos dez anos (Ministério do Planejamento e Orçamento, 1996).

Um outro aspecto diz respeito à composição florística e à volumetria da região. A região de Manaus em termos florísticos é considerada mais rica em espécies do que as regiões da Amazônia oriental (NELSON e OLIVEIRA, 1999) e possui uma volumetria intermediária em termos de Amazônia brasileira. Todavia, algumas espécies notáveis como, por exemplo, *Cedrela odorata* (cedro) e *Swietenia macrophylla* (mogno) não ocorrem na área de estudo. Isto pode explicar a pouca pressão sobre a área nestes anos. Aparentemente, apenas o aumento da população tem sido o principal fator que impulsiona o desflorestamento no local.

A degradação das florestas pela exploração seletiva e pelo fogo foi estimada por NEPSTAD et al. (1999) — com extenso trabalho de campo — provou ser muito maior do que a estimada pelos métodos convencionais do sensoriamento remoto. Os números aqui reportados devem ser considerados à luz das limitações inerentes à ferramenta e resolução da imagem utilizada.

O solo exposto é a segunda feição mais encontrada na área. De um modo geral, esta é a etapa mais evidente em imagens de satélite neste processo de conversão de florestas. As etapas anteriores como o raleamento do sub-bosque e a exploração seletiva não são tão evidentes (NEPSTAD et al., 1999; SOUZA e BARRETO, 2000; MONTEIRO; SOUZA Jr.; BARRETO, 2003). O montante de solo exposto é o

resultado de várias áreas desmatadas para diversos fins. Primeiramente, a derrubada e a remoção da floresta são visíveis, mesmo na agricultura de baixos insumos ou familiar. Em seguida, a construção de moradias rurais pressupõe sempre a ausência de árvores a, pelo menos, em um raio de 50 metros para efeito de segurança contra queda de árvores levando a mais áreas desmatadas. Finalmente, estradas vicinais sem pavimentação e áreas novas abertas para agricultura também fazem parte desta estimativa. Vale ressaltar que as datas das imagens de 1999 e 2001 correspondem ao período seco, portanto, usado para abertura de novas áreas e preparo de terreno na terra-firme.

A sucessão secundária possui vários estágios em decorrência do tempo de abandono da área. Todavia, este trabalho considera apenas um estágio inicial e um intermediário. Estes são os estágios que podem ser separados nitidamente por suas características espectrais, pois a sucessão secundária avançada se confunde com floresta primária. Outros estágios de sucessão se superpõem ou são semelhantes à agricultura perene ou plantios. Neste caso, a inexistência destas feições com formas definidas impede a separação por descritores de forma.

As classes de sucessão refletem a evolução da área em termos de uso e cobertura do terreno. Houve uma redução da área total do estágio intermediário. O tempo reduzido em que ocorreram estas mudanças não permite inferências sobre uma possível diferenciação espectral decorrente do crescimento desta feição a ponto de ser confundida com floresta primária. Observa-se que o aumento da área de solo exposto e a redução da área de sucessão secundária intermediária podem estar relacionados. Isto se prende ao fato de que as áreas cobertas por sucessão intermediária são as preferidas para implantação de áreas agrícolas e exploração de madeira de pequenas dimensões. Isto ocorre porque estas áreas, além de já terem efetuado a recuperação do solo, oferecem mais facilidade em termos de derrubada e preparo do terreno do que os estágios iniciais ou floresta primária.

O aumento da área de sucessão inicial reafirma que a área está em franco processo de fragmentação e mudança de sua fisionomia pela abertura de novas áreas. Conseqüentemente o mosaico inclui feições de sucessão secundária em diferentes estágios de desenvolvimento e áreas novas com solo exposto pela derrubada de áreas de sucessão secundária intermediária, florestas e sucessão inicial provenientes do uso e abandono destas áreas.

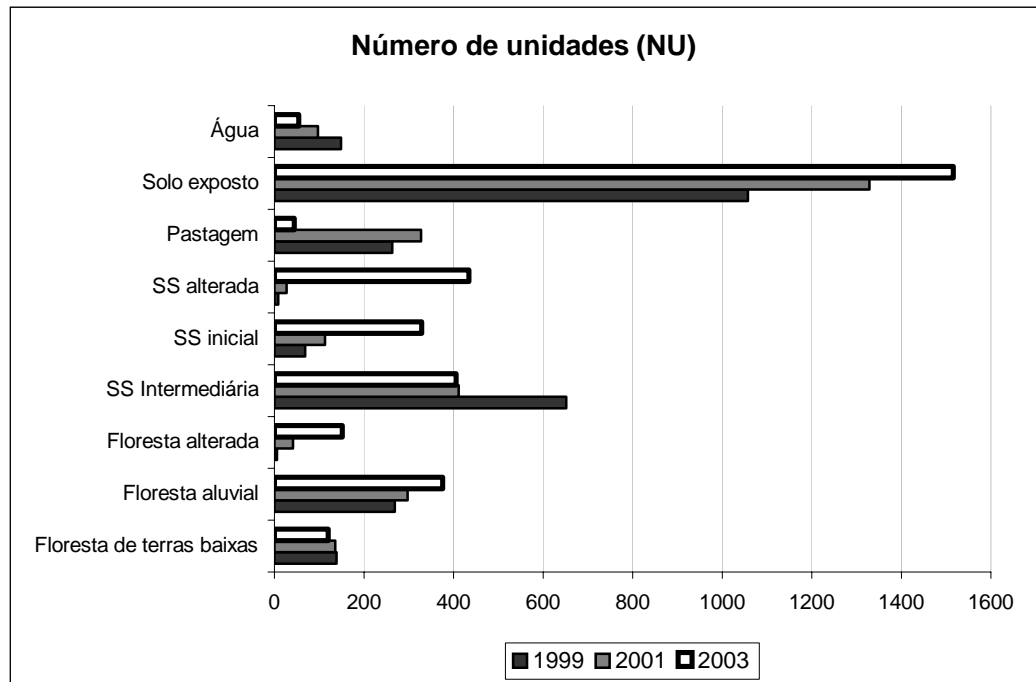
A análise da sucessão secundária tem sido foco de estudos por diferentes pesquisadores e usuários do sensoriamento remoto devido à sua importância no seqüestro e armazenamento de carbono. A quantificação destas áreas e sua biomassa podem ajudar na compreensão do ciclo do carbono e suas implicações relacionadas com as mudanças globais (FOODY et al., 1996). Neste caso, o sensoriamento desempenha um papel primordial na quantificação destas áreas. Os resultados aqui obtidos apontam para uma dinâmica de criação e reutilização de sucessão secundária e podem servir de ponto de partida para estudos das mudanças temporais nesta categoria, envolvendo determinação de um número maior de classes e determinação de biomassa.

O número de unidades de paisagem e a densidade por classe fornecem indicações sobre a configuração da paisagem, mesmo que não sejam medidas espaciais explícitas. O número de unidades da paisagem, ao nível de classe, é o número de unidades que compõem aquela classe. Estes índices são equivalentes, porém a densidade é fornecida em uma base de 100 hectares. O número de unidades de um tipo específico de habitat pode afetar uma variedade de processos ecológicos, dependendo do contexto da paisagem.

Observa-se na Figura 11 que a classe solo exposto apresenta o maior número de unidades de paisagem evidenciando os aspectos já apresentados anteriormente: agricultura familiar, construções rurais e colonizações novas por toda a área de estudo junto ao fato de que o período do ano em que as imagens foram tomadas é o de menor precipitação. Em seguida, a classe sucessão secundária intermediária com um número

menor de unidades de paisagem é a feição que naturalmente segue o solo exposto, pois se trata da regeneração natural em áreas abandonadas ou culturas perenes com frutíferas.

FIGURA 11 - NÚMERO DE UNIDADES DE PAISAGEM DAS CLASSES DE FLORESTA E SUCESSÃO SECUNDÁRIA



O índice *maior unidade de paisagem* é a área da maior unidade de paisagem de uma determinada classe, dividido pelo total da área da paisagem (m^2), multiplicado por 100. É a percentagem da paisagem compreendida pela maior unidade de paisagem. Este valor se aproxima de zero quando a maior unidade da paisagem diminui e é igual a 100 quando há uma única unidade de paisagem. Na Tabela 7 são apresentados os valores de densidade e da maior unidade de paisagem por classe de cobertura.

O aumento aparente de floresta aluvial pode ser explicado por diferenças na classificação. O fato de a imagem de 2003 ter sido tomada na estação chuvosa explica bem esta diferença, pois a elevação do nível dos rios em toda a extensão da área de estudo influenciou a resposta espectral das florestas vizinhas. Da mesma forma, a redução da área de maior tamanho de solo exposto pode ser explicada pela rápida

recuperação da vegetação após as primeiras chuvas no mês de novembro e da consolidação de culturas implantadas na mesma época.

TABELA 7 - DENSIDADE EM 100 ha POR CLASSE DE COBERTURA DO TERRENO

Índices	Densidade (NU/100 ha)			Unidade de maior tamanho		
	1999	2001	2003	1999	2001	2003
Floresta de terras baixas	0,03	0,03	0,02	84,19	54,31	71,14
Floresta aluvial	0,06	0,07	0,08	0,03	0,11	0,17
Floresta alterada	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,04
SS Intermediária	0,14	0,09	0,09	0,07	0,07	0,07
SS inicial	0,01	0,02	0,07	0,03	0,01	0,03
SS alterada	0,00	0,01	0,10	0,00	0,00	0,03
Pastagem	0,06	0,07	0,01	0,05	0,03	0,01
Solo exposto	0,23	0,29	0,34	1,43	1,90	1,52
Água	0,03	0,02	0,01	1,04	0,95	0,91

A redução da área de maior tamanho de pastagem mostra que essa prática está sendo abandonada no local. Atualmente, as pastagens encontram-se invadidas pela vegetação secundária ou estão sendo reformadas para cultivos agrícolas. As pastagens abandonadas que apresentam iguais proporções de solo exposto, sucessão secundária e gramíneas estão classificadas como sucessão alterada. Não existem na área pastagens em número e tamanho que indiquem a criação de fragmentos isolados e a substituição da cobertura florestal primária por pastagens, como ocorreu e ainda ocorre na Amazônia.

Os índices das classes de cobertura permitem uma melhor compreensão da estrutura da paisagem e das tendências em função das modificações ocorridas no tempo. Os índices analisados até aqui demonstram que a cobertura florestal vem diminuindo em extensão, porém a uma taxa reduzida. A fragmentação ocorre somente nos limites da floresta ombrófila densa de terras baixas ou aluvial, a partir das estradas e rios. A retomada do processo de colonização da área do Distrito Agropecuário (Ministério do Planejamento e Orçamento, 1996) pode ser verificada nos índices

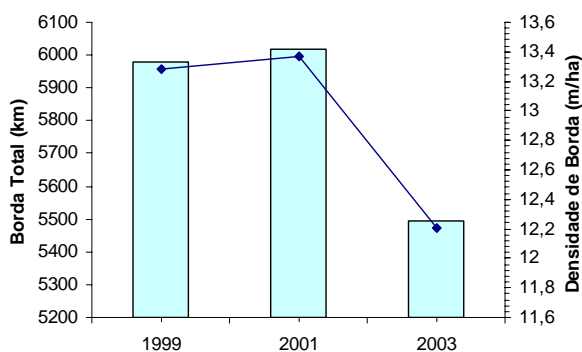
obtidos no ano de 2003. Por esta razão existe uma tendência na redução das grandes extensões florestais, aumento do número de unidade de paisagem do tipo solo exposto e sucessão secundária, comprometendo seriamente a conservação dos recursos florestais existentes no local.

5.2.2.2 Borda e forma por classe de cobertura

Os dados referentes à quantidade de borda e densidade são mostrados na seqüência para as classes de cobertura. Para entender o significado destes índices na fragmentação, sua interpretação deve ser realizada em conjunto com a percentagem de cobertura de cada classe (Tabela 6).

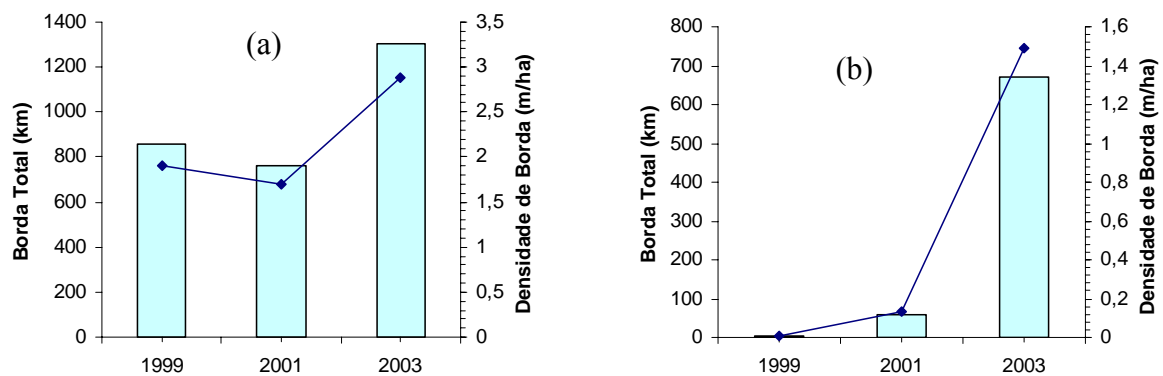
A redução do tamanho e densidade de bordas da floresta de terras baixas expressa mais claramente o que foi constatado pela observação do padrão de desflorestamento no local e nas imagens (Figura 12). Verifica-se que a fragmentação da cobertura florestal permanece a mesma. Em outras palavras, não ocorreu o isolamento de novas unidades de paisagem com floresta de forma a criar mais bordas e portanto, aumentar a densidade. Considerando que houve uma redução nestes índices, referentes à classe de cobertura floresta, ao mesmo tempo em que houve uma redução na percentagem de cobertura, fica evidente que o desflorestamento ocorre nos limites das unidades de paisagem destas florestas.

FIGURA 12 - QUANTIDADE E DENSIDADE DE BORDA DA FLORESTA DE TERRAS BAIXAS



As florestas aluviais e as florestas alteradas apresentam uma variação nos anos de 1999, 2001 e 2003 condizente com a evolução das áreas, explicada anteriormente (Figura 13). Espera-se que as áreas com floresta aluvial apresentem aumento na fragmentação pela posição que ocupam ao longo dos corredores fluviais. Isto pode ser verificado pelo aumento de densidade de bordas, ainda que o aumento da área tenha sido influenciado pela época de obtenção das imagens de 2003. De igual modo, a floresta com características alteradas se multiplicou, aumentando assim sua quantidade de borda dentro da paisagem.

FIGURA 13 - QUANTIDADE E DENSIDADE DE BORDA DA FLORESTA ALUVIAL (a) E FLORESTA ALTERADA (b)

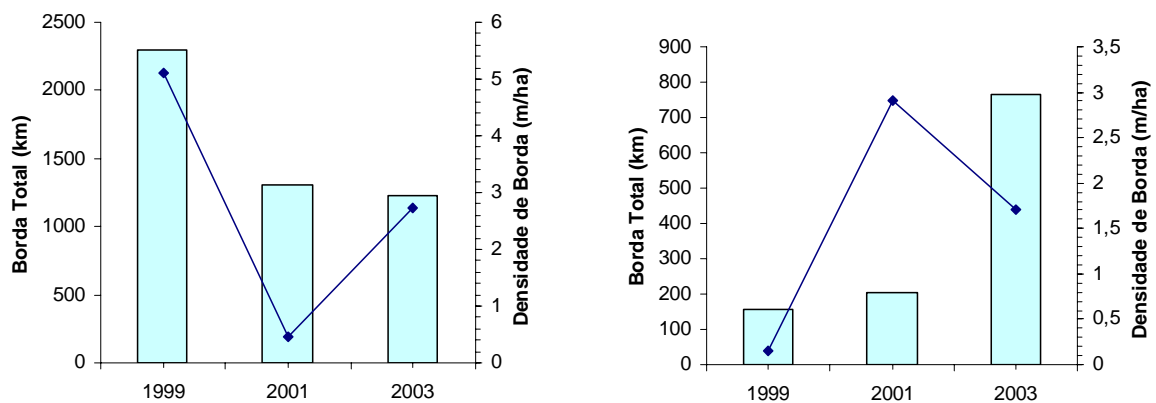


As classes de sucessão secundária apresentaram comportamento diversificado em relação à quantidade e densidade de bordas (Figuras 14 e 15). A classe de sucessão intermediária apresentou uma queda brusca no tamanho e densidade de bordas em 2001 para depois chegar a um valor intermediário em 2003. A sucessão inicial, por sua vez, apresentou um aumento em 2001 para diminuir em 2003. Houve um aumento evidente no tamanho das bordas da classe de sucessão secundária alterada em 2001 e em 2003.

Estes valores analisados à luz da percentagem de cobertura da paisagem mostram um padrão em que a sucessão secundária intermediária foi reduzida em tamanho e conseqüentemente em densidade de borda. O aumento das bordas em 2003,

sem uma variação mais expressiva no tamanho da área neste período, indica a fragmentação desta classe de cobertura. Este fato confirma que a área vem sendo usada para a implantação de cultivos devido à facilidade de abertura em relação à floresta nativa.

FIGURA 14 - QUANTIDADE E DENSIDADE DE BORDA DA SUCESSÃO SECUNDÁRIA INTERMEDIÁRIA (a) E INICIAL (b)

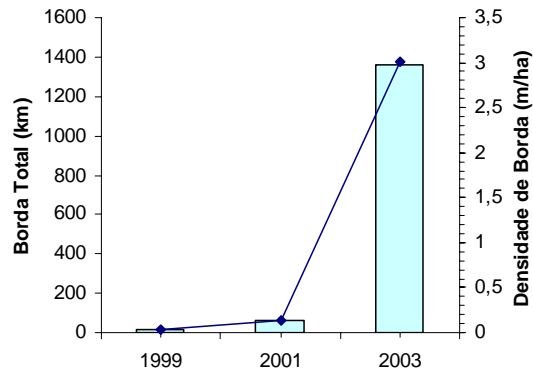


A sucessão inicial apresentou-se mais fragmentada em 2001 do que em 1999, como se pode inferir do aumento de bordas para um montante de área que permaneceu no mesmo patamar. Em 2003, ocorreu o aumento da percentagem de área e da quantidade de borda, mas verificou-se a redução da densidade de bordas. Conclui-se, portanto, que esta classe de cobertura está menos fragmentada. Isto implica em unidades de maior tamanho em decorrência de um uso mais intensivo do terreno, revelando uma tendência de abertura de áreas maiores do que aquelas comumente encontradas no local.

As áreas de sucessão consideradas alteradas aumentaram significativamente sua quantidade de borda (Figura 15). Este tipo de cobertura do solo se multiplicou em função do uso de áreas com sucessão secundária e abandono de pastagem ou cultivos anuais. Esta situação intermediária é comum na ausência de condições para uso do terreno disponível (somente parte dele é usado) ou quando o nível de degradação do

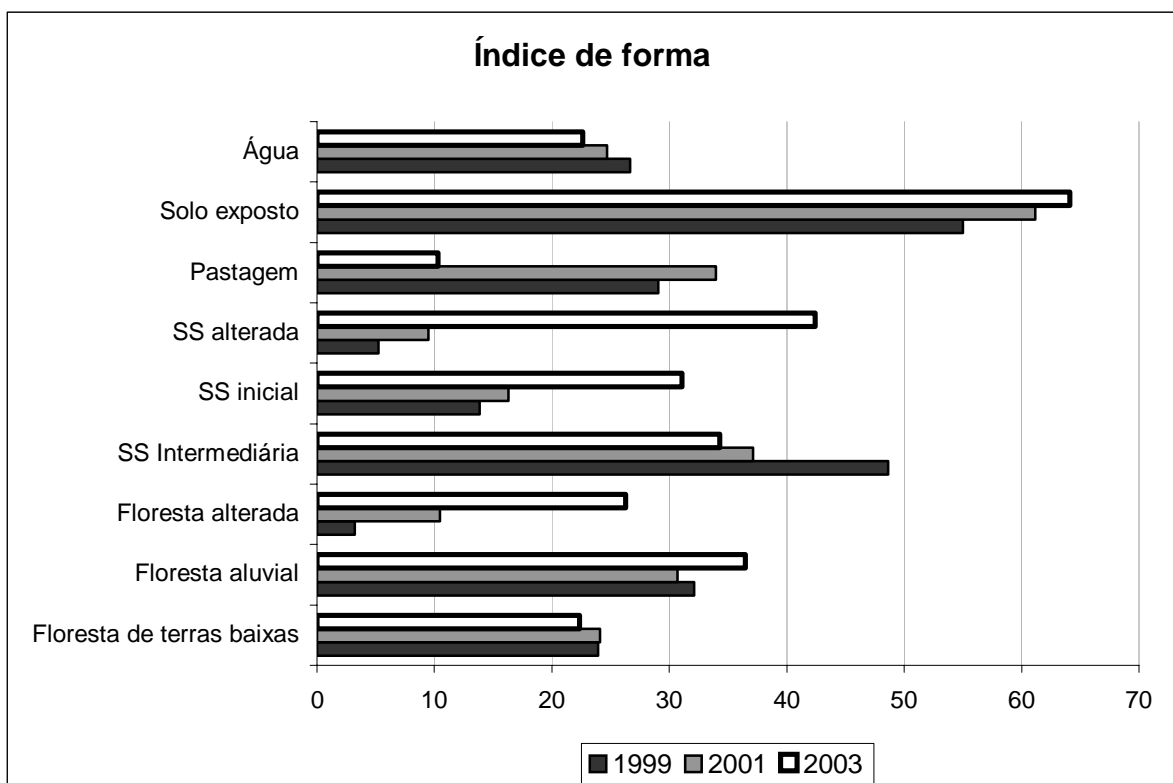
solo impede sua utilização e retarda a recomposição da cobertura, de modo uniforme, pela sucessão natural.

FIGURA 15 - QUANTIDADE DE BORDA E DENSIDADE DA SUCESSÃO SECUNDÁRIA ALTERADA



Os valores de *forma da paisagem* obtidos ao nível das classes de cobertura do terreno são apresentados nas Figuras 16-18. O conceito, significado e interpretação deste índice são os mesmo descritos para a paisagem, porém adaptados ao nível de classes.

FIGURA 16- ÍNDICE DE FORMA DAS CLASSES DE COBERTURA



Observa-se que as classes de floresta apresentaram resultados diferenciados na seqüência temporal estudada. A classe floresta de terras baixas não apresentou mudança no índice de forma. A floresta aluvial cresceu em pequena proporção, enquanto as florestas alteradas apresentaram um crescimento do índice de forma mais expressivo. O índice de forma médio segue este mesmo padrão, todavia o índice de forma ponderado pela área das unidades de paisagem reflete a influência do tamanho das unidades mostrando um padrão totalmente diferente dos anteriores.

A configuração da paisagem conforme demonstrada pela forma das classes de cobertura floresta ombrófila densa se revela na complexidade das formas que não variam com o tempo. Ou seja, a paisagem em estudo possui unidades com florestas ainda na sua forma natural. A ausência de mudanças na forma destas unidades mostra que a paisagem conserva este aspecto de complexidade das formas. Ainda que uma transformação esteja em andamento, o aspecto natural das bordas, com sua complexidade, está presente. A forma e o tamanho da unidade da paisagem são fundamentais na regulação de processos dentro do fragmento florestal (LAURANCE, 2002). Estes fatores têm conexão explícita com o efeito de borda.

O valor do *índice de forma* para a classe de sucessão secundária intermediária apresenta uma diminuição, enquanto esse valor aumenta para as classes de sucessão inicial e sucessão alterada. O *índice de forma médio* diminui para sucessão intermediária, varia para sucessão inicial e aumenta para a sucessão alterada. Por outro lado, o *índice de forma ponderado* é variável para as classes de sucessão intermediária e inicial e aumenta para a classe de sucessão alterada.

O padrão complexo de mudanças da forma de sucessão secundária pode ser explicado pelo abandono das áreas usadas no passado e a criação de novas frentes de colonização. Isso explica o aumento da complexidade das formas de um modo geral. A forma da classe de solo exposto indica que as formas destas áreas de ocupação são mais complexas, provavelmente devido ao contato direto com as florestas. Assim o contorno da área recém desflorestada sendo a própria floresta tende a ser mais

complexo. O sistema de cultivo, ao qual será submetido este solo, tende a gerar formas mais regulares do que a forma da área aberta originalmente.

FIGURA 17 - ÍNDICE DE FORMA MÉDIO DAS CLASSES DE COBERTURA

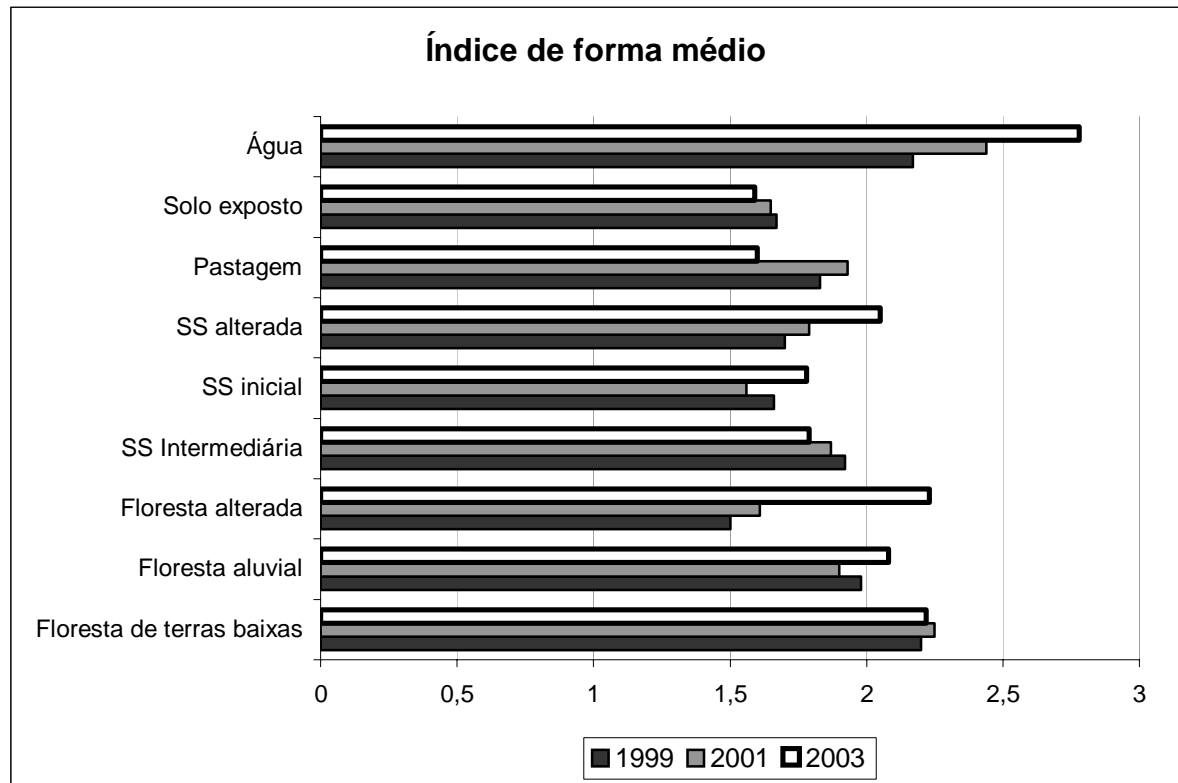
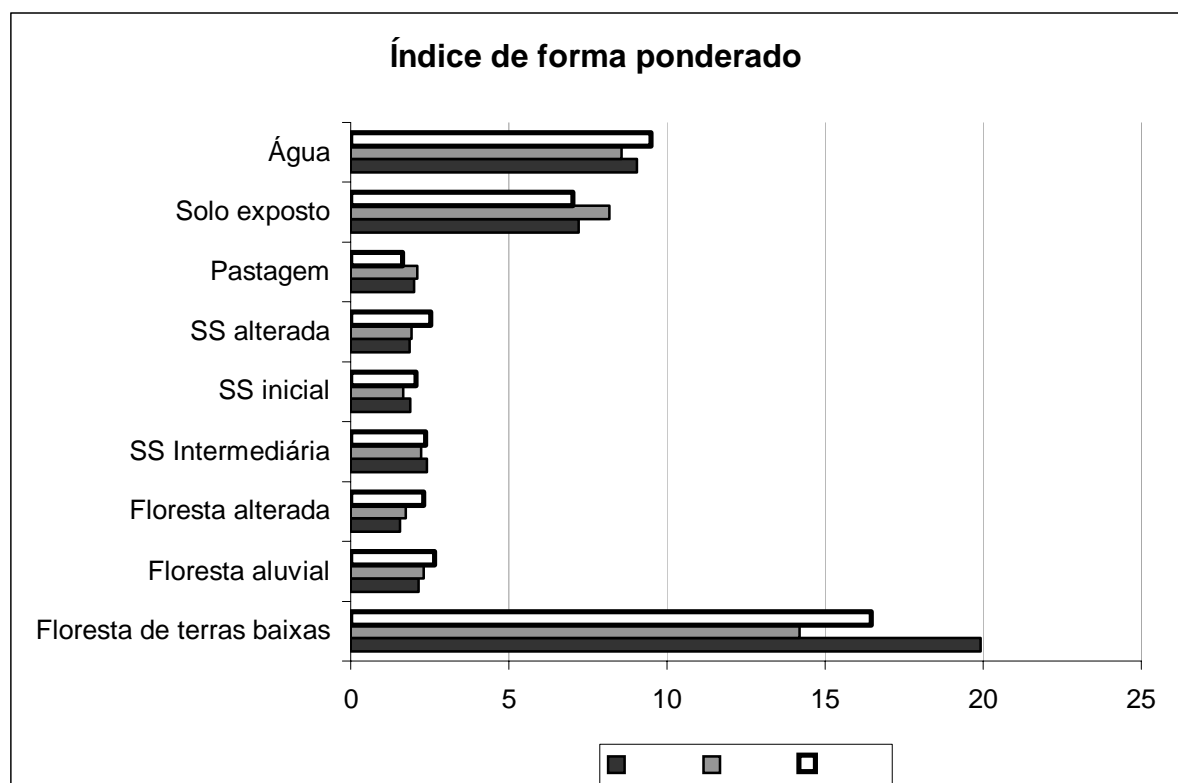


FIGURA 18 - ÍNDICE DE FORMA PONDERADO DAS CLASSES DE COBERTURA

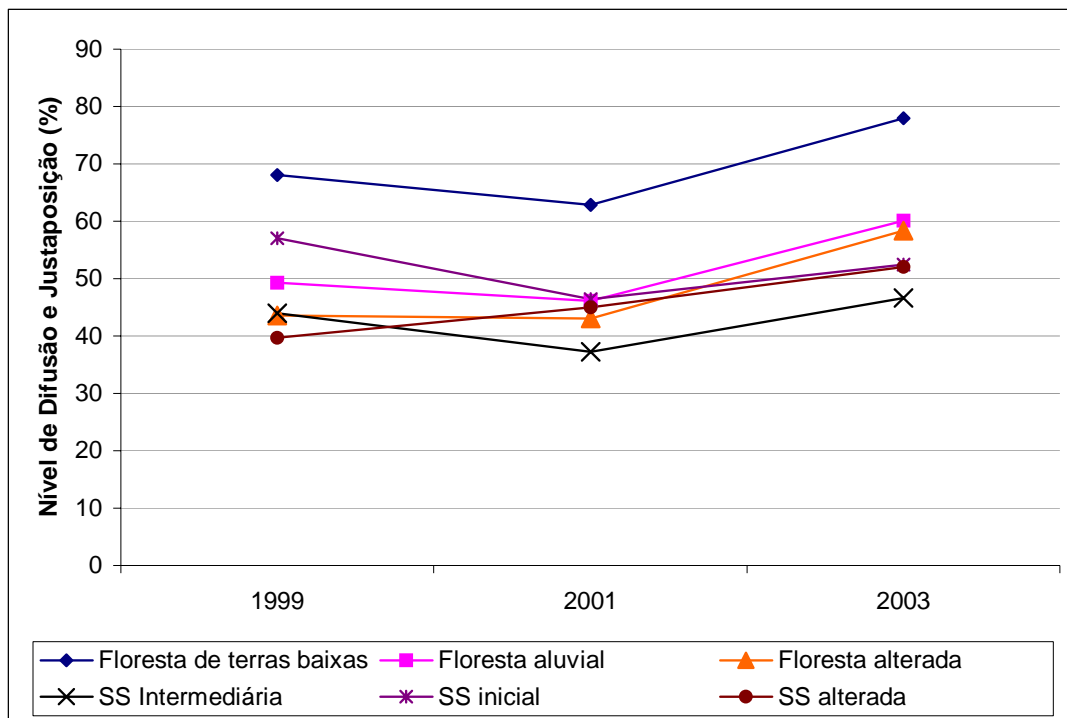


5.2.2.3 Nível de Difusão e Justaposição

O *nível de difusão e justaposição* (NDJ) não é influenciado diretamente pelo número, tamanho, contigüidade ou dispersão das unidades em si como o índice de contágio. Semelhantemente ao contágio, o índice de difusão é um índice relativo que representa o nível observado de difusão como uma porcentagem do máximo possível, dado o número total de classes. Ao nível de classe este índice mede o posicionamento de uma classe com todas as outras e não reflete o nível de difusão das outras classes.

A Figura 19 apresenta o NDJ para as classes de cobertura do terreno. Este índice é de grande importância na compreensão da configuração da paisagem. Observa-se que a variação em 2001 foi para menos para todas as classes. Isso mostra que neste período as classes estavam mais isoladas, sem contato mais amplo com as demais classes e sem estarem dispersas em toda área. Em 2003 esta situação chega um patamar superior ao de 1999. Deste modo, unidades de paisagem pertencentes a várias classes podem ser encontradas mais espalhadas por toda a área e em contato entre si de forma bem distribuída.

FIGURA 19 - ÍNDICE DE DIFUSÃO E JUSTAPOSIÇÃO POR CLASSE DE COBERTURA DO TERRENO



5.2.3 Dimensão Fractal

5.2.3.1 Dimensão fractal da paisagem

Devido à sua natureza particular, a dimensão fractal tem os seus resultados e discussão apresentados, mais detalhadamente, nesta secção. Na análise da paisagem a forma de unidades tem sido freqüentemente caracterizada pela dimensão fractal (FROHN et al., 1996; JORGE e GARCIA, 1997; SOARES FILHO, 1998; BATTISTELLA, 2001; YAMAJI, 2001). O interesse pela dimensão fractal é que esta pode ser aplicada às entidades espaciais em uma ampla variedade de escalas (MCGARIGAL e MARKS, 1995). A dimensão fractal obtida neste trabalho ao nível de paisagem total é apresentada na Tabela 8.

TABELA 8 - DIMENSÃO FRACTAL DA PAISAGEM TOTAL OBTIDA POR ANÁLISE DE REGRESSÃO E MÉDIA DAS UNIDADES DE PAISAGEM E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Índice	1999	2001	2003
<i>D</i> (análise de regressão)	1,51	1,48	1,50
<i>D médio</i> (média das unidades de paisagem)	1,11	1,09	1,09
<i>D médio</i> (ponderada pela área da unidade)	1,26	1,24	1,23
CV ⁽¹⁾ de <i>D médio</i>	4,50	4,60	5,01

(1) coeficiente de variação

A *dimensão fractal* obtida para toda a paisagem por análise de regressão não variou expressivamente de 1999 a 2001. A complexidade da forma revelada por este índice confirma o aspecto natural, relativamente pouco modificado da área de estudo. Normalmente, o contato das áreas desflorestadas com a floresta natural é grande, como foi verificado pelos dois índices analisados anteriormente. Isso leva ao fato de que a borda destas áreas é formada por florestas, corroborando assim os valores obtidos na Tabela 8 para *D*, via análise regressão. Portanto, estes valores são mais compatíveis com a realidade da área de estudo quando comparada com o *D* obtido a partir da *média das unidades de paisagem*. Por outro, lado a variação entre os anos estudados foi mínima.

A *dimensão fractal média* das unidades de paisagem é muito baixa se considerarmos que a área possui extensas áreas naturais e que mesmo as formações antrópicas não apresentam formas tão regulares. Sabe-se que a tendência é que as formas naturais apresentem um D maior do que 1 e formas regulares como quadrados, retângulos ou círculos encontrados nas plantações resultem em D próximo ou igual a 1 (DE COLA, 1989).

A dimensão fractal calculada utilizando-se a área das unidades de paisagem como fator de ponderação foi maior do que a média. Isto significa que as maiores unidades de paisagem são mais irregulares, no que diz respeito à forma, do que a média. A redução dos valores, ainda que mínima, nos dois últimos anos estudados pode ser resultante do aumento de áreas de formação antrópica ou resultante da recuperação das estradas vicinais que impõe limites mais suavizados nas bordas da floresta (MILLINGTON, VELEZ-LIENDO e BRADLEY, 2003). A delimitação acentuada das estradas pode ter contribuído para uma maior suavidade de bordas.

O aumento do coeficiente de variação implica que nos anos anteriores havia mais uniformidade em D referente à complexidade das formas. Este resultado atual sugere que formas mais simples (agricultura convencional) juntamente com formas mais complexas (fragmentos florestais) estão surgindo no local.

Mudanças na dimensão fractal podem implicar em mudanças nos processos geradores do desflorestamento (PERALTA, 1998; JORGE e GARCIA, 1997). Para um determinado mosaico da paisagem a compreensão do comportamento da dimensão fractal em escalas variadas pode ajudar na escolha do tamanho e espaçamento de amostras para pesquisas ecológicas subseqüentes (LAGRO JR., 1991). A análise fractal é aplicável em imagens com resoluções variadas, disponíveis no mercado, aumentando em muito as possibilidades de uso de dados em várias escalas temporal e espacial, o que não é possível realizar com os outros índices ou com apenas um único tipo de dado.

5.2.3.2 Dimensão fractal das classes de cobertura

Uma análise preliminar dos resultados obtidos para dimensão fractal (Tabela 9) revela uma alta complexidade das formas encontradas na paisagem delimitada por este estudo. Observam-se valores médios a altos para todas as classes de cobertura do terreno. Os valores não fornecidos (N/F) para algumas classes, resultam do número reduzido de pares perímetro/área das unidades correspondentes àquelas classes. O método de cálculo por análise de regressão requer um número suficiente de dados (>20) para gerar um valor confiável (MCGARIGAL e MARKS, 1995). A alternativa para este método é dimensão fractal média das unidades de paisagem que utiliza a relação perímetro/área para cada unidade de paisagem, gerando um D médio.

TABELA 9 - DIMENSÃO FRACTAL DAS CLASSES DE COBERTURA DO SOLO NOS ANOS DE 1999, 2001 E 2003.

Índices	Dimensão fractal		
	1999	2001	2003
Classes			
Floresta de terras baixas	1,48	1,46	1,41
Floresta aluvial	1,60	1,44	1,47
Floresta alterada	N/F	1,52	1,53
SS intermediária	1,51	1,47	1,46
SS inicial	1,58	1,42	1,47
SS alterada	N/F	1,85	1,67
Pastagem	1,51	1,49	1,34
Solo exposto	1,53	1,51	1,52
Água	1,60	1,58	1,59

N/F = não fornecido

Os valores de D são similares para todas as classes variando em torno de 1,50 em todos os anos de estudo. Um valor alto encontrado para área de sucessão secundária alterada reflete a complexidade destas áreas com solo exposto e árvores remanescentes. Constata-se que em 1999, esta feição não apresentou o número de unidades de paisagem suficientes para o cálculo de D por regressão. A proximidade

com florestas e outras unidades de sucessão explica a complexidade das bordas reveladas neste índice para sucessão secundária.

JORGE e GARCIA (1997) encontraram valores 1,30 a 1,33 para vegetação natural em São Paulo. FROHN et al. (1996) encontrou D pequeno em Rondônia e o atribui à dominância de floresta. Afirma que à medida que o ambiente sofria modificações D aumentava. É evidente que a delimitação feita pelas estradas de acesso suavizam as bordas das formações florestais levando aparentemente a uma forma mais simples de bordas. Com a crescente fragmentação da floresta e a criação de unidades de paisagem que têm a floresta como limite, aumenta o valor da dimensão fractal, confirmando a complexidade das formas naturais em comparação àquelas de formação antrópica e mecanizada.

As demais classes de cobertura analisadas como solo, pastagem e água, seguem tendências naturais, com destaque para o solo exposto que tem seu valor de forma elevado, refletindo a abertura de áreas contíguas as floresta e sucessão secundária.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A classificação orientada a objeto e a análise de paisagem para a avaliação do padrão e da dinâmica temporal de cobertura do terreno na região amazônica foram realizadas com êxito e se apresentaram adequadas no sentido de fornecer um produto de qualidade e pronto para análises posteriores. A segmentação multirresolução e a criação de uma base de conhecimentos com descritores baseados em lógica *fuzzy* são mais adequadas, uma vez que consideram os aspectos cognitivos humanos e a complexidade da natureza. A análise da paisagem realizada com as imagens classificadas permite uma compreensão do padrão de desflorestamento e da dinâmica temporal que não é possível ser obtida mediante os métodos tradicionais da classificação e de análise de mudanças com imagens de satélite.

As seguintes conclusões podem ser feitas com base nos resultados obtidos:

- a) A classificação orientada ao objeto de imagens Landsat para a região estudada apresenta resultados adequados, permitindo a manipulação da informação espectral e contextual de forma transparente e objetiva, para determinar, descrever e relacionar classes de cobertura a partir das feições encontradas no terreno.
- b) A segmentação multiescala é uma ferramenta interessante quando há necessidade de um resultado detalhado, isto é, várias classes e subclasses, o que torna seu uso com imagens de baixa resolução espacial limitado. Porém, o limite é a capacidade de abstração do usuário.
- c) Descritores de forma e contexto não contribuem significativamente quando a imagem é de baixa resolução espacial. As características peculiares da área de estudo podem demandar elaboração de descritores específicos.

- d) A análise da paisagem como ferramenta de descrição da estrutura e da dinâmica da cobertura do terreno permite uma visão ampla do processo de fragmentação tanto na dimensão espacial como temporal, expandindo assim as possibilidades de intervenção para manejo e conservação.
- e) A estrutura da paisagem apresenta a dominância de unidades de florestas de grande tamanho e unidades menores de várias classes de cobertura de formação antrópica, apresentando um padrão típico de desflorestamento ao longo das vias principais e secundárias que recortam a área e ao longo dos rios.
- f) A estrutura está em processo de modificação, seguindo o mesmo padrão: grandes unidades de floresta que estão sendo reduzidas gradativamente a partir das bordas e a multiplicação de unidades menores. A abertura e manutenção de estradas secundárias intensificaram estas mudanças.
- g) Os índices de paisagem são comparáveis somente para uma mesma escala e condição de trabalho, porém fornecem mais informações do que simples taxas de desflorestamento, conduzindo ao diagnóstico e às medidas necessárias para o manejo e conservação.
- h) Os índices de contágio e nível de difusão e justaposição em conjunto com índices de borda (forma e densidade) foram os que melhor descreveram a paisagem e suas mudanças no tempo e no espaço.

Para o contexto desta pesquisa a ferramenta e a escala de trabalho foram adequadas. Com a disponibilidade de imagens de novos sensores de alta resolução, aplicações específicas podem ser desenvolvidas em várias resoluções e escalas de trabalho. A inclusão de dados auxiliares e o uso de imagens pré-processadas devem ser

testadas na classificação orientada a objeto da cobertura do terreno nas regiões tropicais.

Este estudo engloba parte de duas grandes bacias, a Bacia do Rio Cuieras e a Bacia do Rio Puraquequara e ainda toda a Bacia do Rio Tarumã. Estudos localizados nestas bacias devem ser realizados para um diagnóstico mais aprofundado e avaliação do impacto causado pela fragmentação da vegetação natural nestas bacias.

Áreas degradadas passíveis de restauração podem ser identificadas se forem utilizados os critérios de vizinhança e contexto da classificação orientada a objeto e informações sobre conectividade e vizinhança de unidades de paisagem, não abordadas neste trabalho. Uma vez definida a base de conhecimentos (classes hierárquicas), ela pode ser aplicada em locais semelhantes ou ser adaptada, sem a necessidade de se criar uma nova base.

REFERÊNCIAS

- ABEYTA, A. A.; FRANKLIN, J. The accuracy of vegetation stand boundaries derived from image segmentation in a desert environment. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.64, n.1, p.59-66, jan. 1998.
- ACTON, S. T. On unsupervised segmentation of remotely sensed imagery using nonlinear regression. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p.1407-1415, jul. 1996.
- ALLEN, T. R.; WALSH, S. J. Spatial and compositional pattern of alpine treeline, Glacier National Park, Montana. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.62, n.11, p.1261- 1268, nov. 1996.
- ALMEIDA FILHO, R.; NASCIMENTO, P. S. R.; BATISTA, G. T. Avaliação de técnicas de segmentação e classificação automática de imagens Landsat-TM no mapeamento do uso do solo na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, n.1, p.41-54, jan. 1998.
- ALVES, D.S; MOREIRA, J.C.; KALIL, E.M.; SOARES, J.V.; FERNANDES, O.; ALMEIDA, S.; ORTIZ, J.D.; AMARAL, S. Mapeamento do uso da terra em Rondônia utilizando técnicas de segmentação e classificação de imagens TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE/SELPER, 1996. p.71-80, CD-ROM, Online.
- ANTUNES, A. F. B. **Classificação de Ambiente Ciliar Baseada em Orientação a Objeto em Imagens de Alta Resolução Espacial**. Curitiba, 2003. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- BATTISTELLA, M. **Landscape change and land-use/land-cover dynamics in Rondônia, brazilian Amazon**. Terre Haute, 2001. 356 f. Tese (Doutorado) - School of Public and Environment Affairs - Indiana University.
- BAUER, T.; STEINNOCHER, K. Per parcel classification in urban areas applying a rule-based technique. **GeoBIT/GIS** n.6, p.24-27, jun. 2001. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.de/documents/publications/GIS200106024.pdf>> Acesso em 2002.
- BÉNIÉ, G. B.; THOMSOM, K. P. B.; GOLDBERG, M. A comparison of four segmentation algorithms in the context of agricultural remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.44, n.1, p.1-13, jan. 1989.
- BLASCHKE T.; HAY, G. J. Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.34, part 4/W5, p. 22-29. 2002. Disponível em:< http://www.definiens-imaging.de/documents/publications/Blaschke_Hay_short_paper.pdf >
- BLASCHKE T.; STROBL, J. What's wrong with pixels: some recent developments interfacing remote sensing and GIS. **GeoBIT/GIS** n.6, p.12-17, jun. 2001. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.de/documents/publications/GIS200106024.pdf>> Acesso em: 2002.

- BLASCHKE, T.; LANG, S.; LORUP, E.; STROBL, J.; ZEIL, P. Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. In: Cremers, A.; Greve, K. (Ed.). **Environmental Information for Planning, Politics and the Public**. vol. 2. Marburg: Metropolis-Verlag, 2000. p.555-570.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML, guia do usuário**. Rio de Janeiro: Campus, 472p., 2000.
- BRONDÍZIO, E.; MORAN, E.; MAUSEL, P.; WU, Y. Land cover in the Amazon estuary: linking of the Thematic Mapper with botanical and historical data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.62, n. 8, p.921-929, ago. 1996.
- BURNET, C.; BLASCHKE, T. A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. **Ecological Modelling**, n.168, v.3, out. p.233-249, 2003.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986, 193 p.
- CAMPOS, M. A. A.; LINGNAU, C. Classificação orientada a objeto para mapeamento da paisagem na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 5-10 abr. 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE/SELPER, 2003. p. 2023- 2025. CD-ROM, Online.
- CEOS - COMMITTEE ON EARTH OBSERVATION SATELLITES - **CEOS ACTIVITY**. Disponível em: < <http://www.ceos.org/pages/act.html> >. Acesso em 2002.
- COCHRANE, M. A.; SOUZA Jr., C. M. Linear mixture model classification of burned forests in the eastern Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.17, p.3433-3440, nov. 1998.
- CONGALTON, R. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-46, jul.1991.
- CONWAY, J.; EVA, H.; D´SOUZA, G. Comparison of the detection of forested areas using ERS-1 ATSER and the NOAA-11 AVHRR with reference to ERS-1 SAR data: a case study in the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.17, p.3419-3440, dez. 1996.
- COUTINHO, A. C.; MIRANDA, E. E.; MIRANDA, J. R. Mapeamento da superfície terrestre através da utilização do método de segmentação por crescimento de regiões e classificação supervisionada de imagens de satélite. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/SELPER, 1996. p.71-80. CD-ROM, Online.
- DARWISH, A.; LEUKERT, K.; REINHARDT, W. Image segmentation for the purpose of object based classification.. In: Proceedings of IGARSS 2003 IEEE, Toulouse, julho de 2003. Disponível em: <http://definiens-imaging.com/documents/publications/FR07_1420.PDF>. Acesso em 2004.

DE COLA, L. Fractal analysis of a classified Landsat scene. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.55, n. 5, p.601-610, mai. 1989.

DEFINIENS. eCognition. User guide. Disponível em: < <http://www.definiens-imaging.com>>. Acesso em 2001.

ERDAS. ERDAS, Field Guide. Atlanta, GA, ERDAS, Inc. 686p.,1999.

FISCHER, M. M; SCHOLTEN, H.J.; UNWIN, D. **Geographic information systems, spatial data analysis and spatial modeling: an introduction**. In: FISCHER, M.M; SCHOLTEN, H.J.; UNWIN, D. (Ed.). Spatial Analytical perspectives on GIS. Bristol: Taylor and Francis, 1996. p.319.

FOODY, G. M. A fuzzy sets approach to the representation of vegetation continua from remotely sensed data: an example from lowland heath. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.58, n.2, p.221-225, fev. 1992.

FOODY, G. M. Fuzzy modelling of vegetation from remotely sensed imagery. **Ecological Modelling**, v.85, n.1, p.4-12, fev. 1996.

FOODY, G.M.; PALUBINSKAS, G. LUCAS, R.; CURRAN, J.P.; HONZAK, M. Identifying terrestrial carbon sinks: classificaton of sucessional stages in regenerating tropical forest from landast TM data. **Remote Sensing of Environment**, v.55, n.3, p.205-216, mar. 1996.

FORMAN, R. T. T. **Land Mosaics**. Cambridge: Cambridge University Press, 632p., 2001.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. New York: John Wiley and Sons, 619p., 1986.

FROHN, R.C.; MCGWIRE, K.C.; DALE, V.H.; ESTES, J.E. Using satellite remote sensing analysis to evaluate a socio-economic and ecological model of deforestation in Rondonia, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.16, p.3233-3255, nov. 1996.

GONZALEZ, R. F.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Edgard Blucher, 509p., 2000.

HARGIS, D.H.; BISSONETTE, J.A.; DAVID, J. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. **Landscape Ecology**, v.13, n.3 p.167-186, jun. 1998.

HILL, R. A.; FOODY, G. M. Separability of tropical rain-forest types in the Tambopata-Candamo Reserved Zone, Peru. **International Journal of Remote Sensing**. v.15, n.13, p.2687-2693, set. 1994.

HOFMANN, P. Detecting informal settlements from Ikonos image data using methods of object oriented image analysis – an exemple from Cape Town (South Africa). In: Jürgens, C. (ed.). **Remote Sensing of Urban Areas**. Regensburg Geographische Schriften, p.107-118, 2001.

HOFMANN, P. eCognition and GIS feature extraction from VHR image. **eCognition Application Notes**, v.1, n.1, jul.2000.

HUECK, K. **Los bosques de Sudamérica: ecología, composición e importancia económica**. Munique: GTZ, 476p., 1978.

HUTCHINSON, F. C. Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.1, p.123-130, jan. 1982.

IALE. Executive committee. IALE Mission Statement. Bulletin, International Association for **Landscape Ecology**, n.16, v.1, n.1. p.1-4, 1998.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Diagnóstico ambiental da Amazônia legal**. (CD ROM). Rio de Janeiro, 1997.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. (Manuais Técnicos em Geociências, nº. 1). Rio de Janeiro: IBGE. 92p., 1992.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. Projeto Prodes** Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em 2005.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Tutorial de Geoprocessamento**. Disponível em: 1996.
<<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>> Acesso em 2001.

IVITS, E.; KOCH, B. Object-Oriented remote sensing tools for biodiversity assessment: a european approach. In: Proceedings for the XXII EARSEL Symposium. Praga. Republica Tcheca, 4-6 de junho. Millpress Science Publishers, Rotterdam, Holanda. 2002.

IVITS, E.; KOCH, B.; BLASCHKE, T.; WASER, L. Landscape connectivity studies on segmentation based classification and manual interpretation of remote sensing data. eCognition User Meeting. out. 2002. Munique. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.de>>. Acesso em 2003.

JARDIM, F.C. S.; HOSOKAWA, R.T. Estrutura da floresta equatorial úmida da estação experimental de silvicultural tropical. **Acta Amazonica**, v.16/17, n. 1, p.411-508. 1987.

JARDIM-LIMA, D. Pastagens Abandonadas na Amazônia Central Quantificado com Imagens Landsat. Manaus, 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). Biologia Tropical e Recursos Naturais. Convênio Universidade Federal do Amazonas/Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

JENSEN, J.R. **Introductory Digital Image Processing: remote sensing perspective**. 2. ed. New Jersey: P. Hall, 318p., 1996.

- JONG, S. M.; BURROUGH, P. A. A fractal approach to the classification of Mediterranean vegetation types in remotely sensed images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61, n.8, p.1041-1053, ago. 1995.
- JORGE, L. A. B.; GARCIA, G. A study of habitat fragmentation in Southeastern Brazil using remote sensing and geographic information systems (GIS). **Forest Ecology and Management**, v.98, n.1, p.35-47, out. 1997.
- KALLURI, S. N. V. et al. High performance algorithms for land cover dynamics using remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.6, p.1513-1536, jun. 2000.
- LAGRO JR, J. Assessing patch shape in landscape mosaics. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.57, n.3, p.285-293, mar. 1991.
- LAM, N. S. Description and measurements of Landsat TM Images using fractals. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.56, n.2, p.285-293, fev. 1990.
- LAURANCE, W.F.; LOVEJOY, T.E.; VASCONCELOS, H.L.; BRUNA, E.M.; DIDHAM, R.K.; STOUFFER, P.C.; GASCON, C.; BIERREGAARD, R.O.; LAURANCE, S.G.; SAMPAIO, E. Ecosystem decay of Amazonian Forest Fragments: a 22_year investigation. **Conservation Biology**, v.16, n.3, p.605-618. jun. 2002.
- LBA – Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia. II Conferência Científica do LBA. Disponível em: < <http://lba.cptec.inpe.br/lba-conf-manaus02-en/results.html> > Acesso em 2002.
- LI, B-L. Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics. **Ecological Modelling**, v.132, n.1/2, p.33-50, jul. 2000.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. New York: J. Wiley. 750p., 1994.
- LOBO, A.; CHIC, O.; CASTERAD, A. Classification of mediterranean crops with multisensor data: per-pixel versus per-object statistics and image segmentation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n.12, p. 2385-2400, ago. 1996.
- MÄKELÄ, H; PEKKARINEN, A. Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.77, n.1, p.66-75, jul. 2001
- MANDELBROT, B. **The Fractal Geometry of the Nature**. New York: W.H. Freeman Company, 483p., 1983.
- MANTOVANI, D. M; SETZER, A.W. Deforestation detection in the Amazon with an AVHRR-based system. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.2, p.273-286, jan. 1997.
- MATHER P.M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images**. 2. ed. New York: J. Wiley, 292 p., 1999.

MCGARIGAL, K.; MARKS, B. **FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure**. Portland: Departamento de Agricultura do Serviço Florestal dos Estados Unidos, 1995. 122 p. Relatório Técnico.

MEDEIROS, J. S. **Bancos de Dados Geográficos e Redes Neurais Artificiais: Tecnologias de Apoio à Gestão de Território**. São Paulo, 1999. 221 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

MILLINGTON, A.C.; VELEZ-LIENDO, X.; BRADLEY, A.V. Scale dependence in multitemporal mapping of forest fragmentation in Bolivia: implications for explaining temporal trends in landscape ecology and application to biodiversity conservation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.57, n.4, p.289-299, fev. 2003.

MILNE, B. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER, M.; GARDNER, R. (Ed.). **Quantitative Methods of Landscape Ecology**. New York: Springer-Verlag, 1990. p.199-235.

MILNE, B. T. Measuring the fractal geometry of landscapes. **Applied Mathematics and Computation**, v.27, n.1, p.67-79, jul. 1988.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO - MPO. **Política da SUFRAMA para o setor agropecuário na Amazônia Ocidental**. Documento Final do Workshop. Manaus, 12-13 novembro de 1996.

MONTEIRO, A. L.; SOUZA Jr., C.M.; BARRETO, P. Detection of logging in Amazonian transition forests using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.1, p.151-159, jan. 2003.

NASCIMENTO, P. S. R.; ALMEIDA FILHO, R. Utilização da técnica de segmentação em imagens TM/Landsat visando otimizar a técnica de interpretação visual In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/SELPER, 1996. p.215-218. CD-ROM, Online.

NAVEH, Z; LIEBERMAN, A. **Landscape Ecology**. Theory and application. 2. ed. Nova York: Springer-Verlag, 360p., 1989.

NELSON, B. W.; OLIVEIRA, A. A. **Avaliação e Ações Prioritárias para a Conservação do Bioma floresta Amazônia.. Área Botânica**. Relatório temático elaborado para o Workshop Macapá-99. 82p., 1999.

NEPSTAD, D. C. et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging. **Nature**, v.398, n.8, p.505-508, abr. 1999.

NOVO, E. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.3, p.663-670, fev. 1997.

OLIVEIRA, A.A. MORI, S.A. A central Amazonian terra firma forest. I. High tree species on poor soils. **Biodiversity and Conservation**, v.8, n.9, p.1219-1244, set. 1999.

OLIVEIRA, J. C. **Índice para a avaliação de segmentação (IAVAS): uma aplicação em agricultura**. São José dos Campos, 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

OTTO, R.D. Na evaluation of forest landscape spatil pattern and wildlife community structure. **Forest Ecology and Management**, v. 89, n.1-3, p.139-147, dez. 1996.

PERALTA, P. **A Landscape Ecological Assesment of the Development of Extractive Reserves of Brazilian Amazonia by Integrating Remote Sensing and GIS Analisys**. Nothingham, 1996. 298 f. Tese (Doutorado) - Nothingham University, U.K.

PRANCE, G.T.; RODRIGUES, W.A.; SILVA, M.F. Inventário florístico de um hectare de mata de terra firme no km 30 da estrada Manaus-Itacoatiara. **Acta Amazonica**, v.6, n.1, p.9-35. 1976.

RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais. v. 1-18**. Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. 1978.

RAMOS, A.A. et al. Levantamento florestal do Distrito Agropecuário da Zona Franca de Manaus. **Revista Floresta**, v.4, n.1, p. 40-53. 1972

RANZANI, G. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. **Acta Amazonica**, v.10, n.1, p.7- 41, 1980.

RIBEIRO, M. N. G. Aspectos climatológicos de Manaus. **Acta Amazonica**, v.6, n.2, p.229-232, 1976.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital Image analysis: an introduction**. 3. ed. rev. and enl.; Berlin: Springer, 363p., 1999.

ROLIM, F. A. R. **Classificação Orientada a Objeto em Imagens de Alta Resolução para Auxílio ao Monitoramento Ambiental em uma Microbacia Hidrográfica**. Curitiba, 2003. 108 f. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ROSOT, N.C. **Integração de Imagens de Sensores de Microondas e Ópticos para fins de Mapeamento e Classificação de Reflorestamentos no Sul do Brasil**. Florianópolis, 2001. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina.

SCHIEFER, S. Combining HyMap data with a DEM in eCognition. **eCognition Application Note**, v.2, n.7, 2p. ago. 2001.

SCHIEWE, J. Segmentation of high-resolution remotely sensed data - Concepts, applications and problems. In: Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa, Canadá. 2002.

SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. **GeoBIT/GIS**, n.6, p.34-39, 2001.

SCHWARZ, M.; WASER, L. Using eCognition to detect storm losses in Swiss alpine forest areas from high resolution satellite data. **eCognition Application Note**, v.2, n.11, 2p. nov. 2001.

SHANDLEY, J.; FRANKLIN, J.; WHITE, T. Testing the Woodcock-Harward image segmentation algorithm in an area of southern California chaparral and woodland vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.5, p.983-1004, mai. 1996.

SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C.; DUARTE, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.3, p.535-541, fev. 1998.

SOARES-FILHO B.S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. São Paulo, 1998. 299 f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SOUZA, C.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in th amzon. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.1, p.173-179, jan. 2000.

TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C.O.; KALB, V. Characterization and classification of south american land cover types using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.8, p.1189-1207, ago. 1987.

TURNER, M.G. Landscape changes in nine rural counties in Georgia. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.56, n.3, p. 379-386, mar. 1990.

WANG, F. Fuzzy supervised classification of remote sensing images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.28, n. 2, p. 194-201, mar. 1990a.

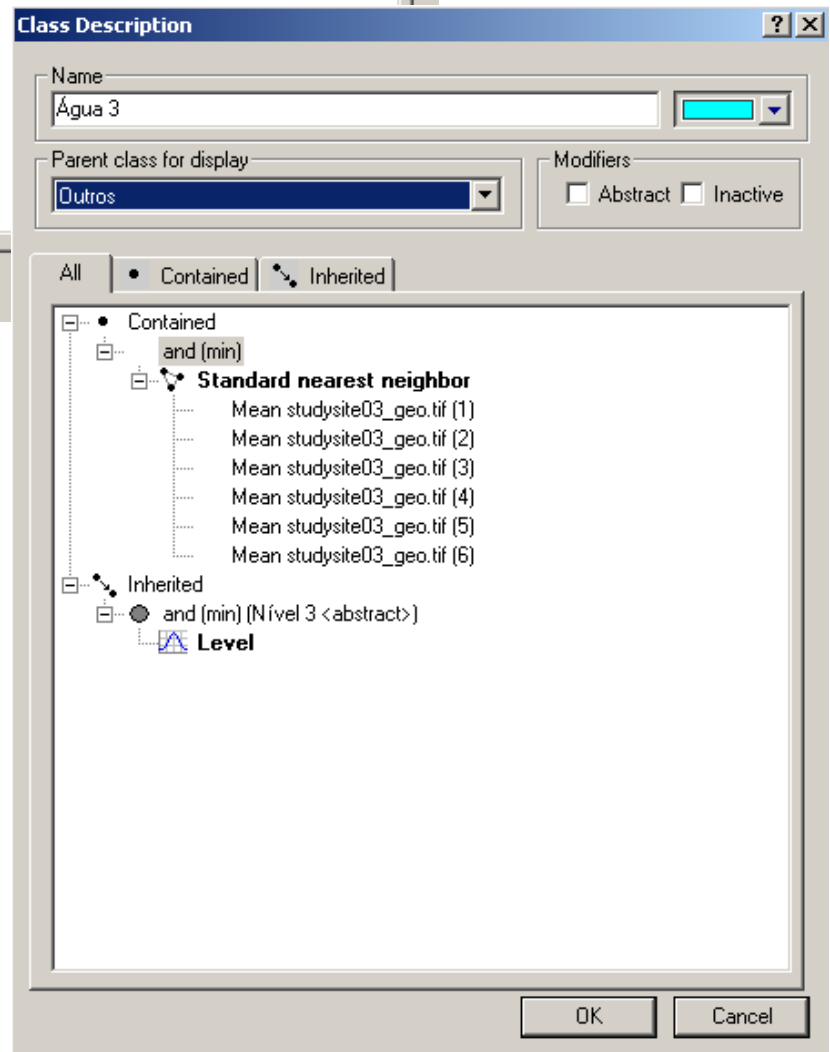
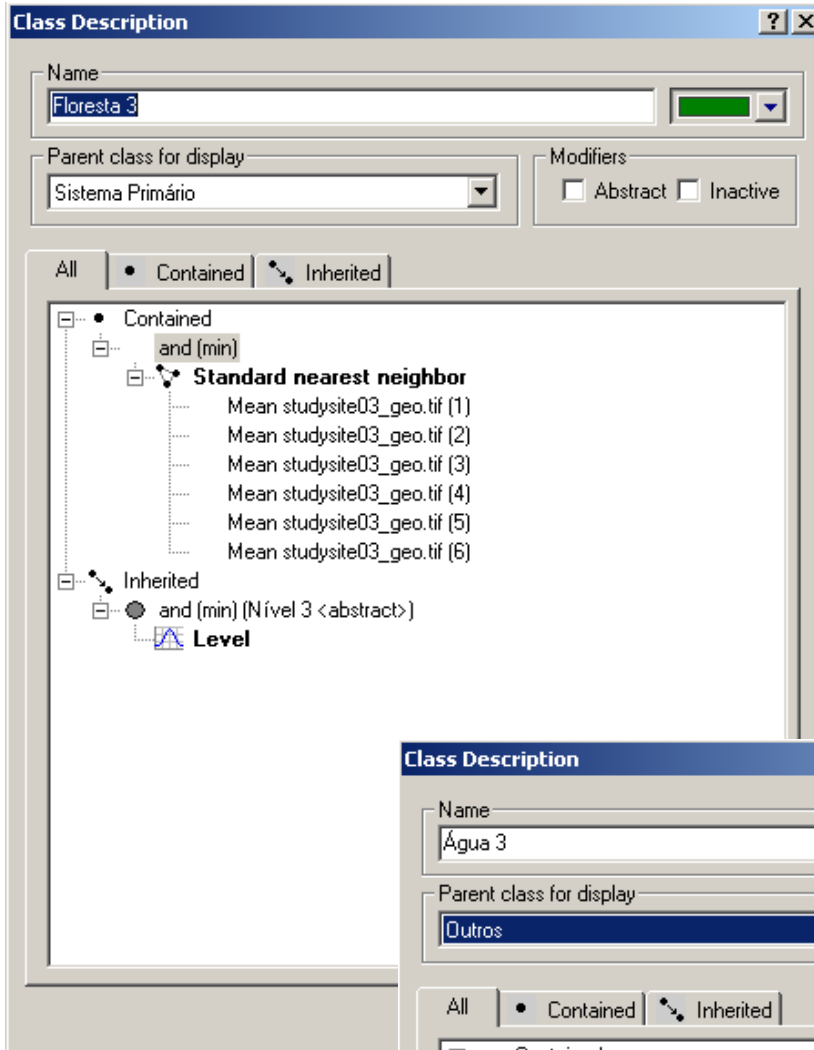
WANG, F. Improving remote sensing image analysis through fuzzy information representation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.56, n.8, p.1163-1169, ago. 1990b.

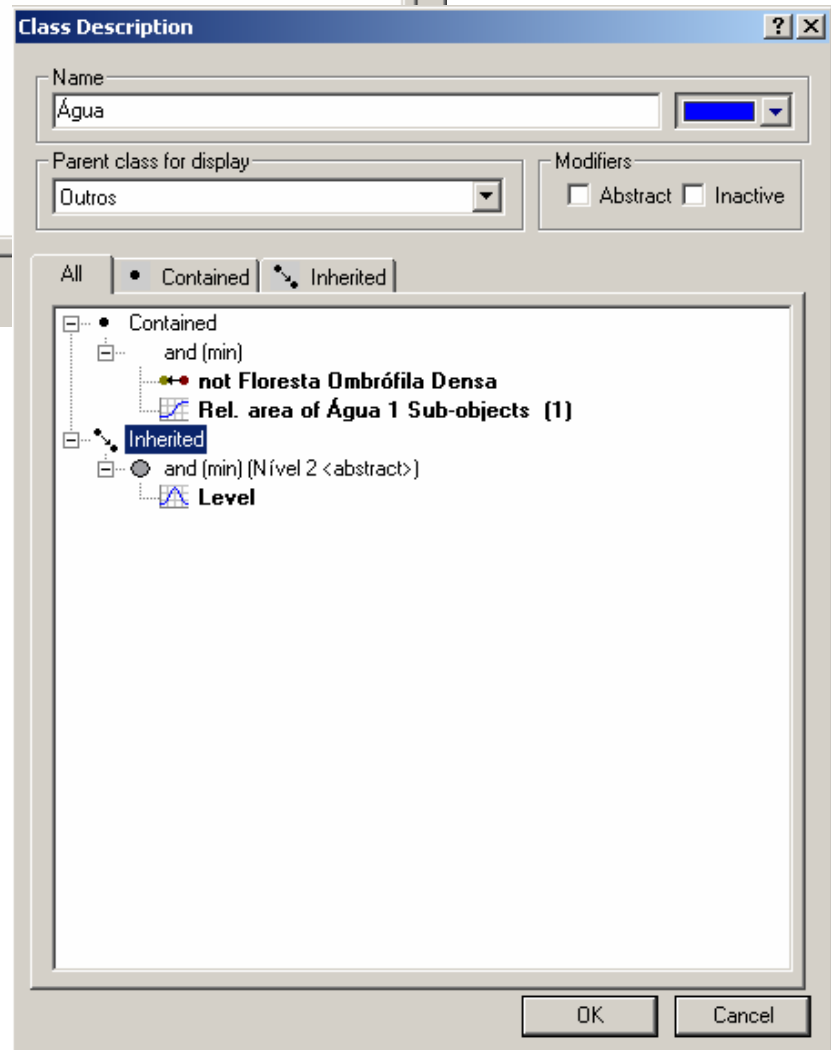
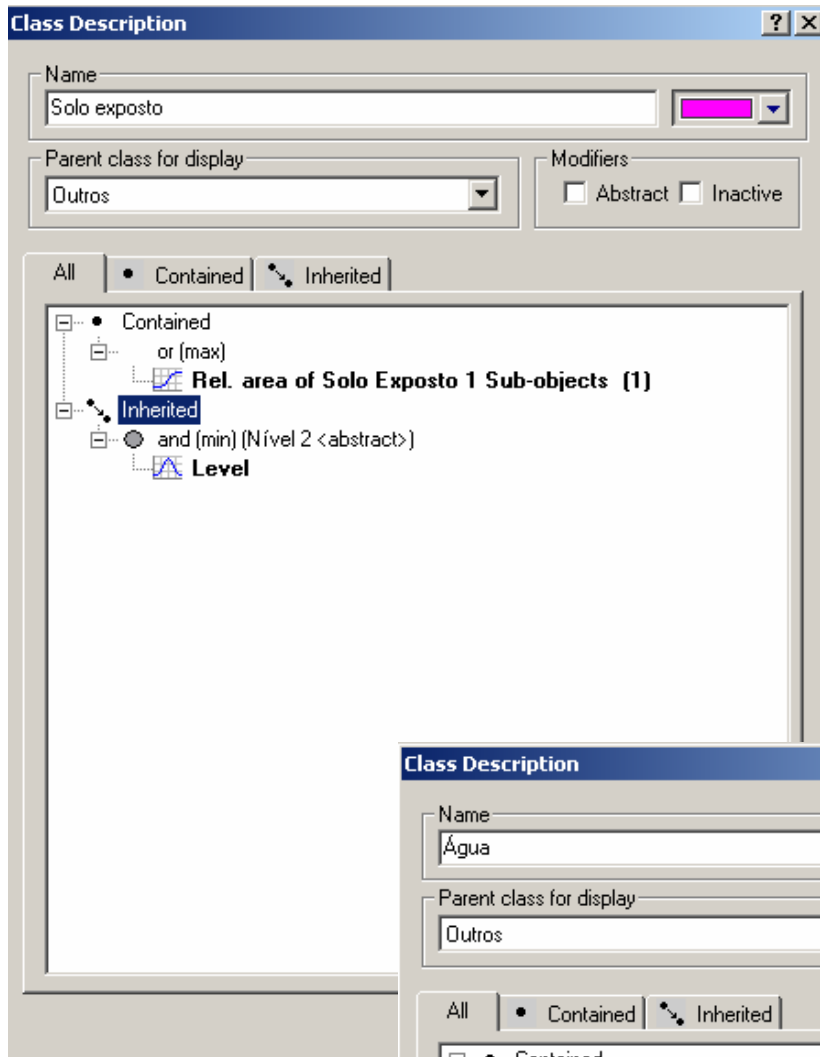
WILLHAUCK, G.; SCHNEIDER, T.; DE KOK, R.; AMMER, U. Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos. In: IAPRS, v. xxxiii, Amsterdam, 2000.

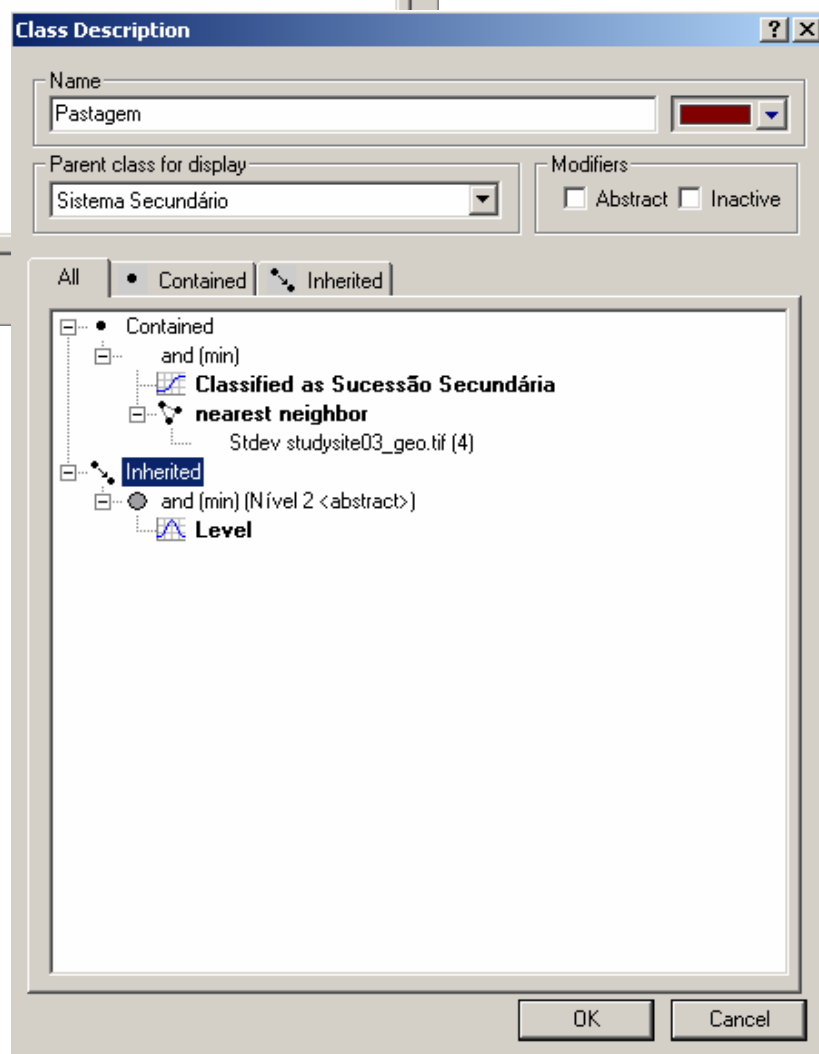
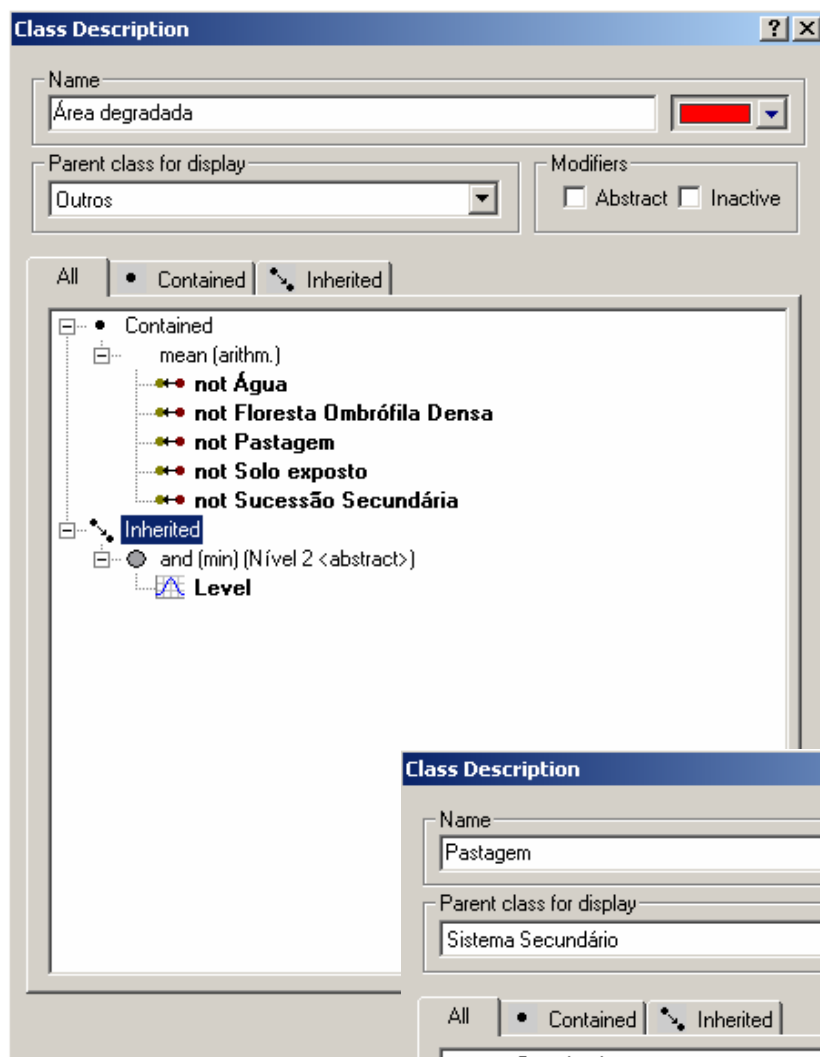
YAMAJI, F. M. **Análise fractal de uma floresta ombrófila mista através de imagens de satélite**. Curitiba, 2001. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ZERBINI, N. J.; ANGELO, H.; SANTOS, J. R. Relações entre parâmetros de fitomassa, dendrométricos, espectrais e altimétricos na Amazônia brasileira. **Revista Árvore**, v.19, n.2, p.171-186, abr./jun. 1995.

ANEXO 1 - DESCRITORES USADOS NA
CRIAÇÃO DO BANCO DE CONHECIMENTO

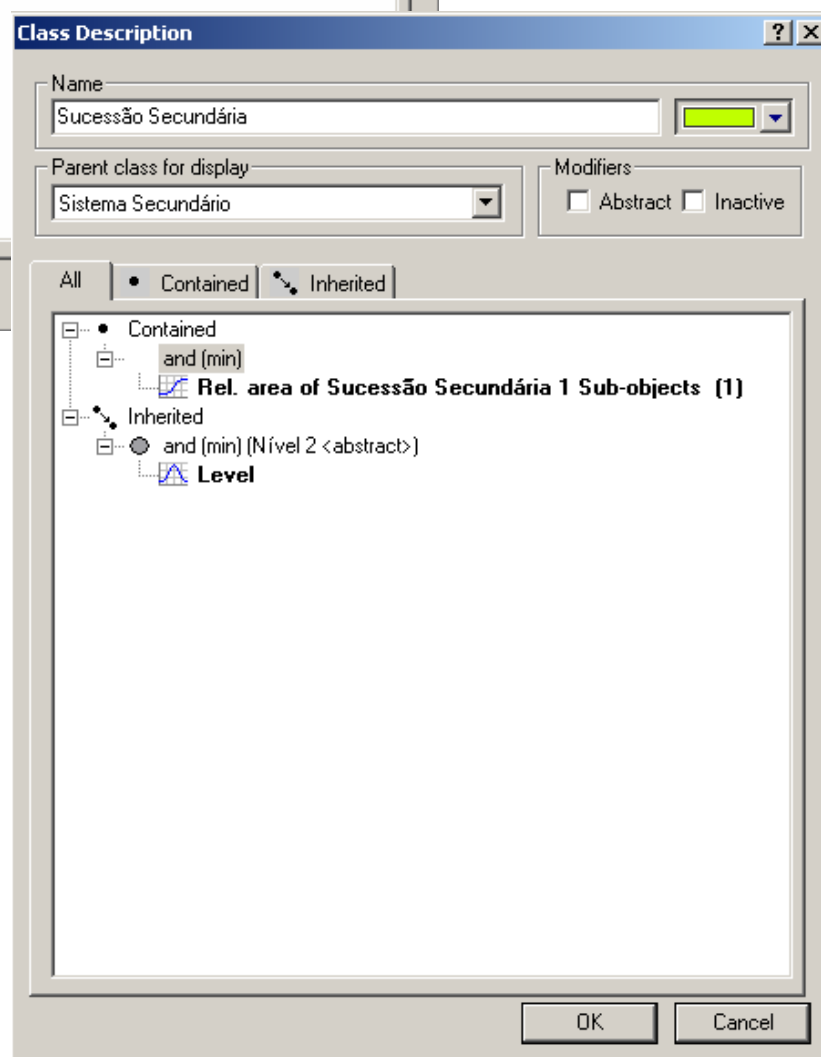
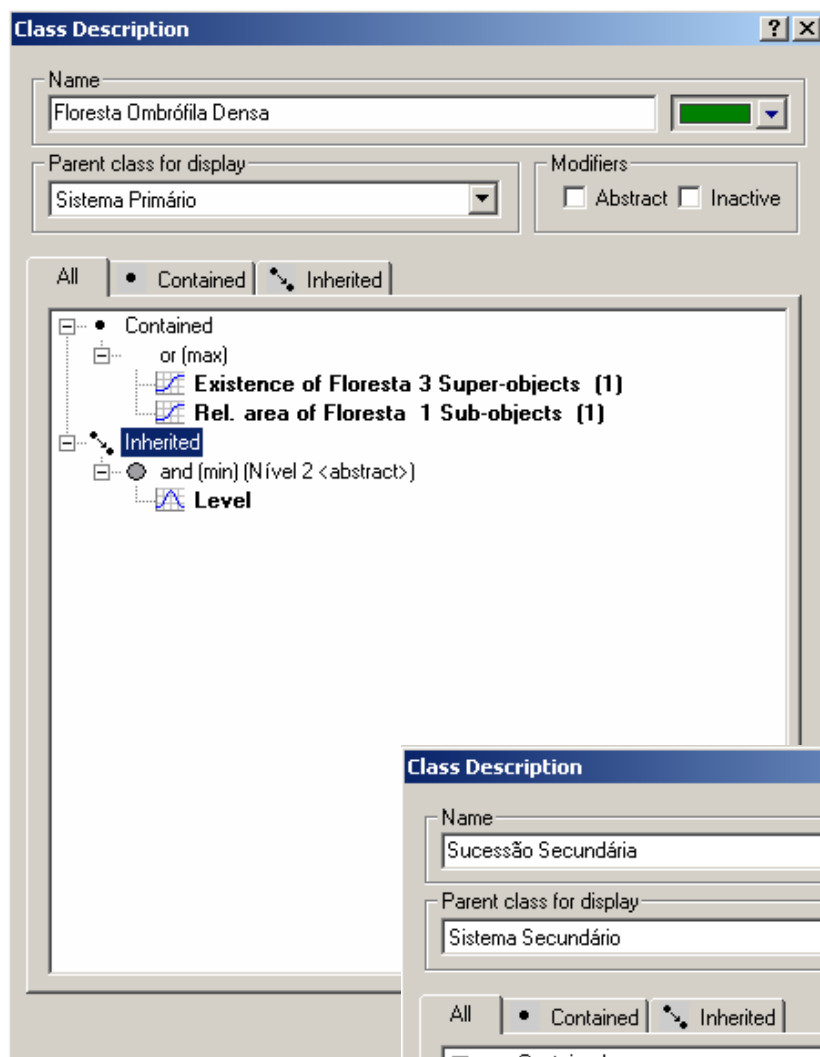


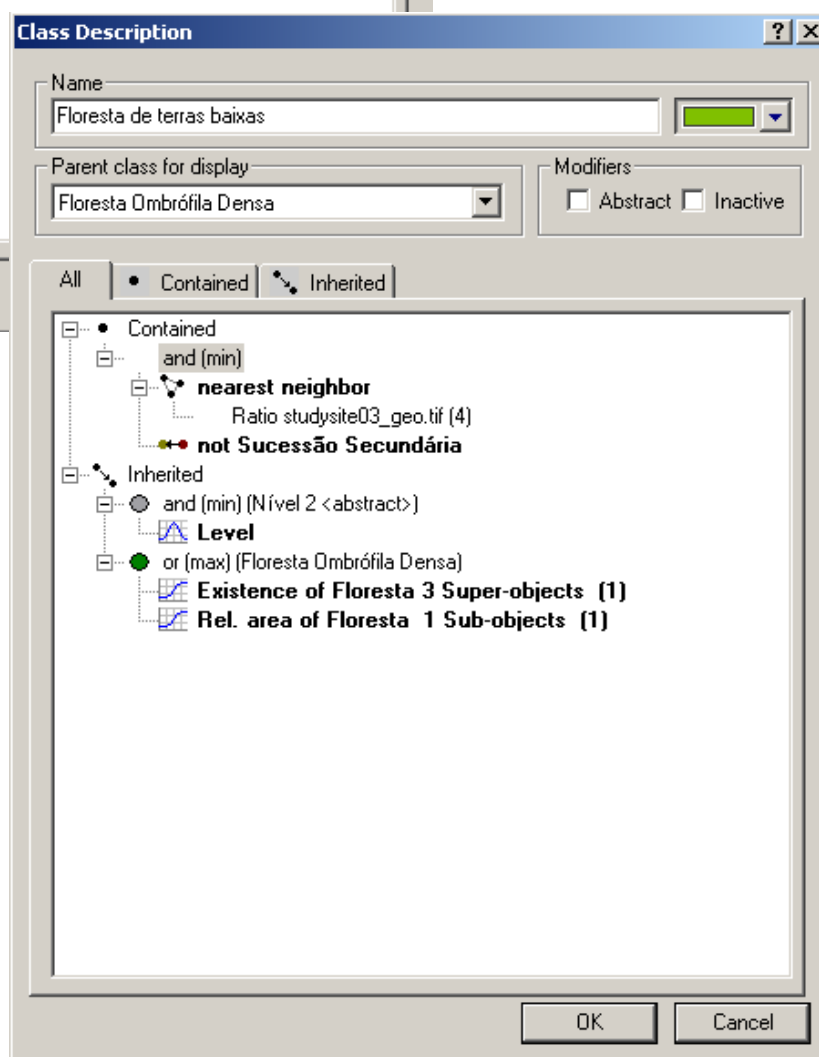
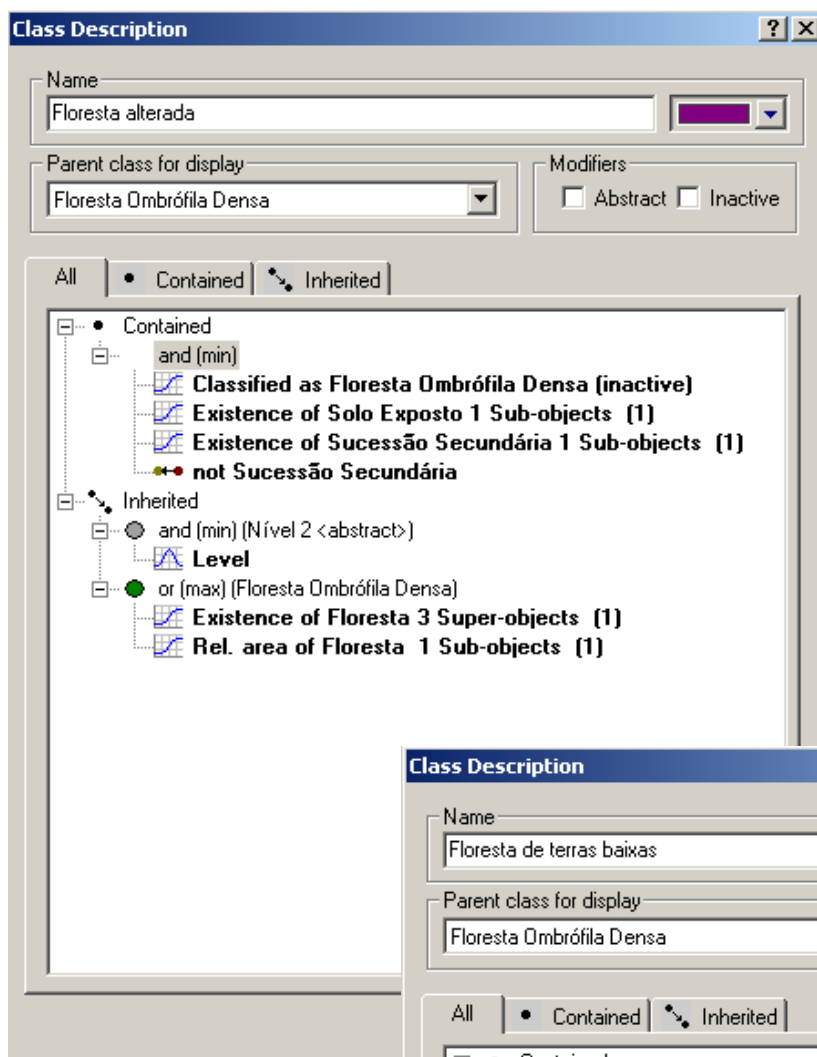


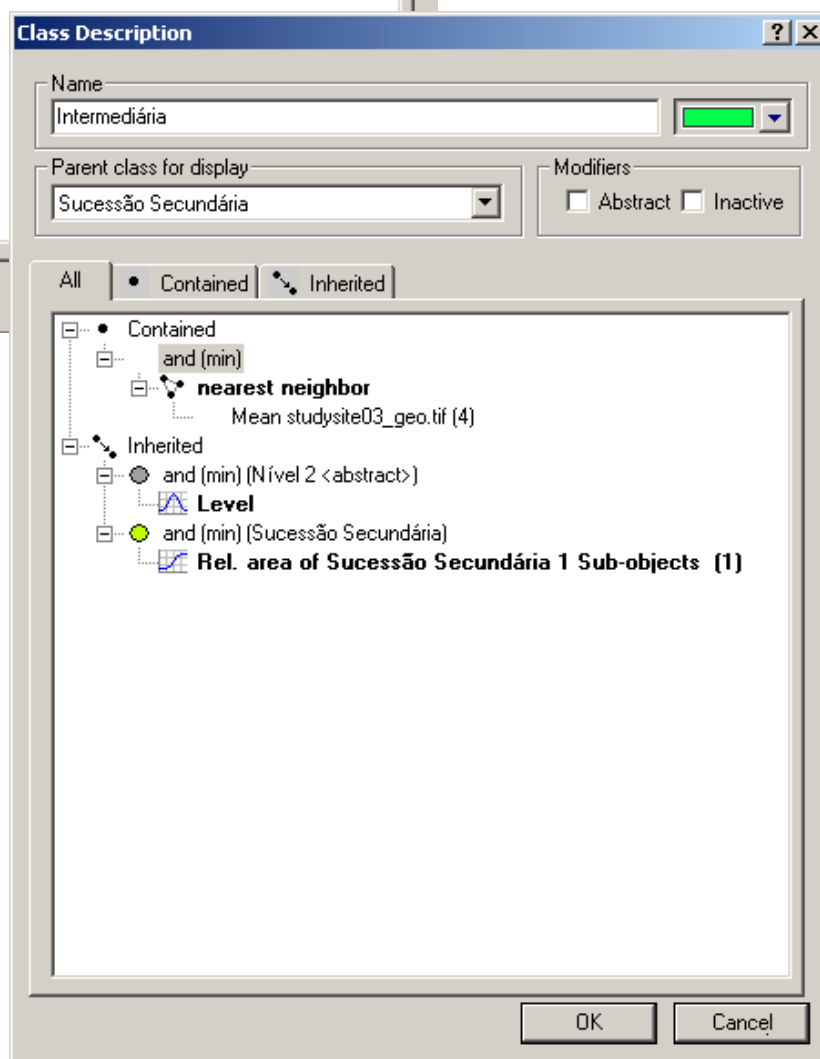
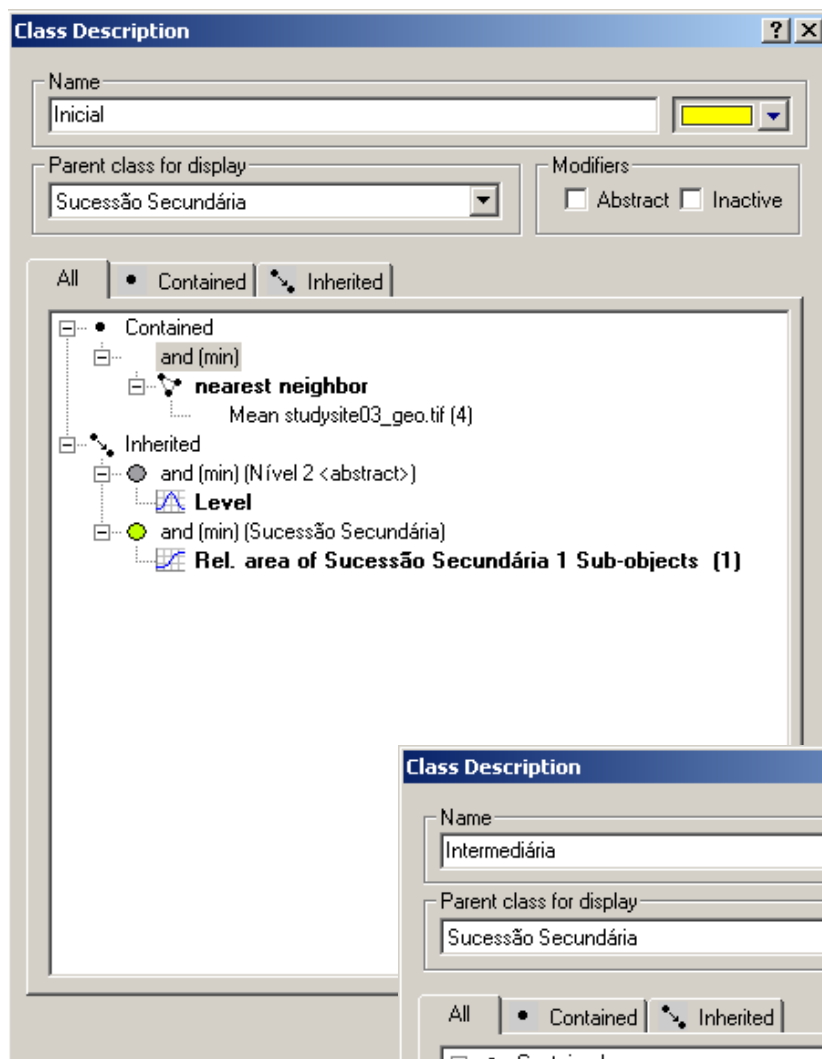


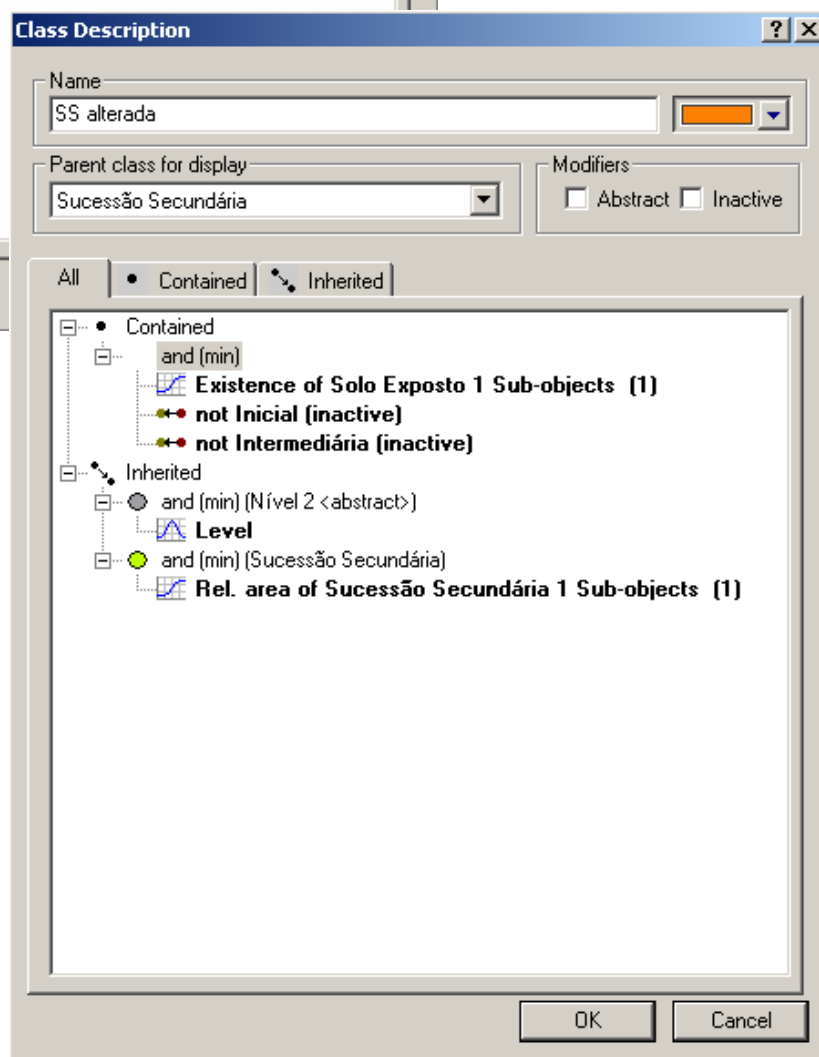
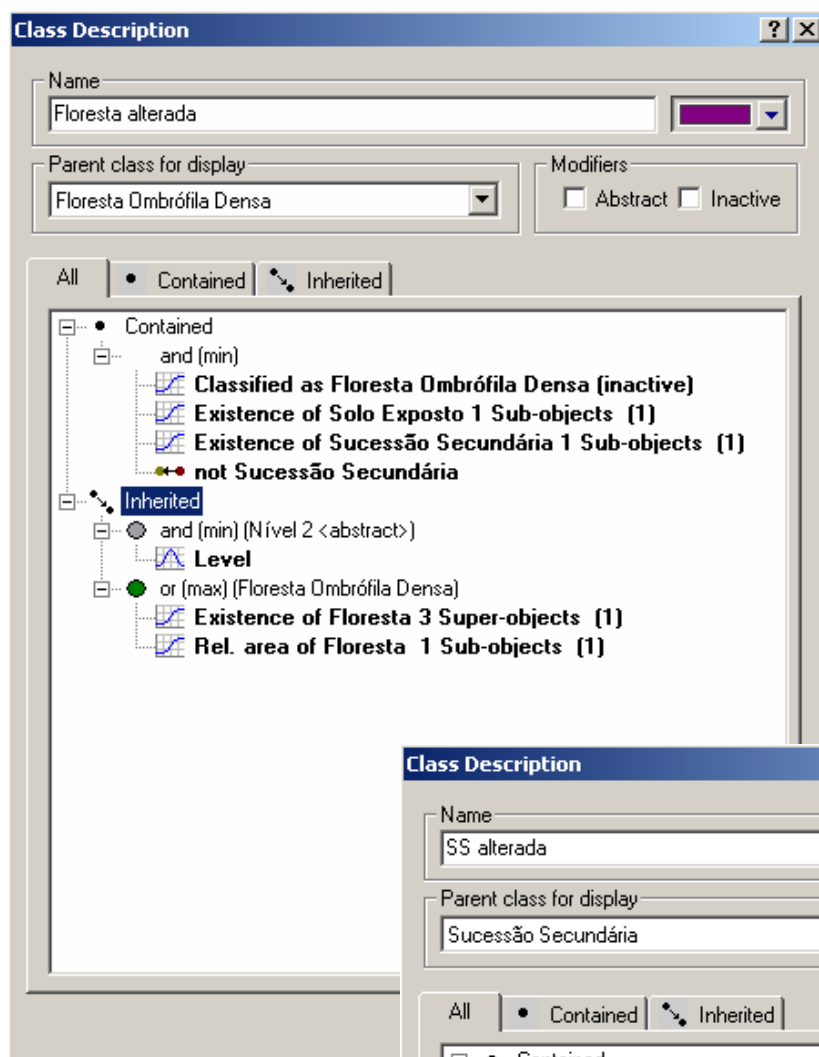
OK

Cancel



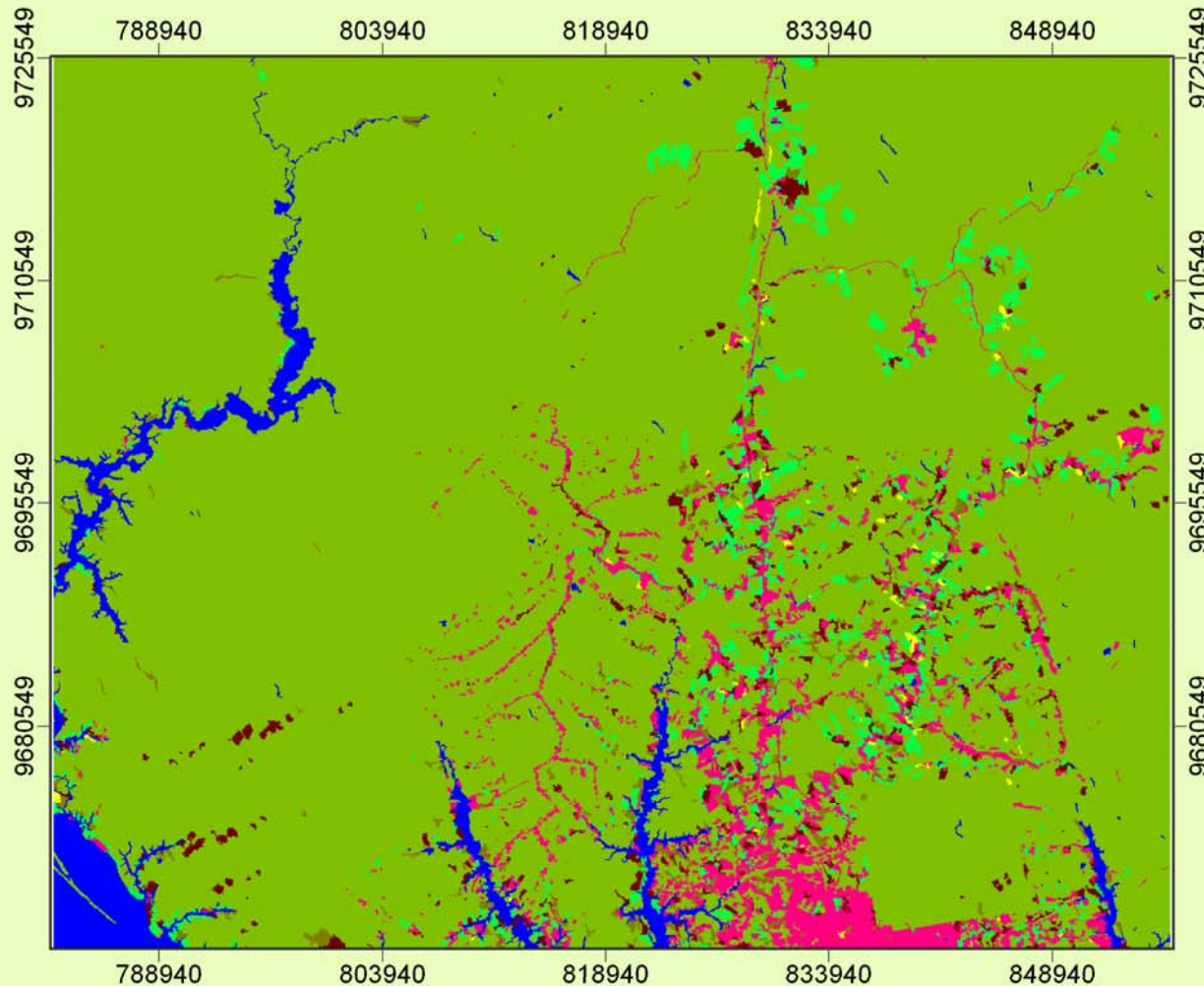






ANEXO 2 - CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO DAS IMAGENS LANDSAT

IMAGEM DA CLASSIFICAÇÃO (1999)



Legenda

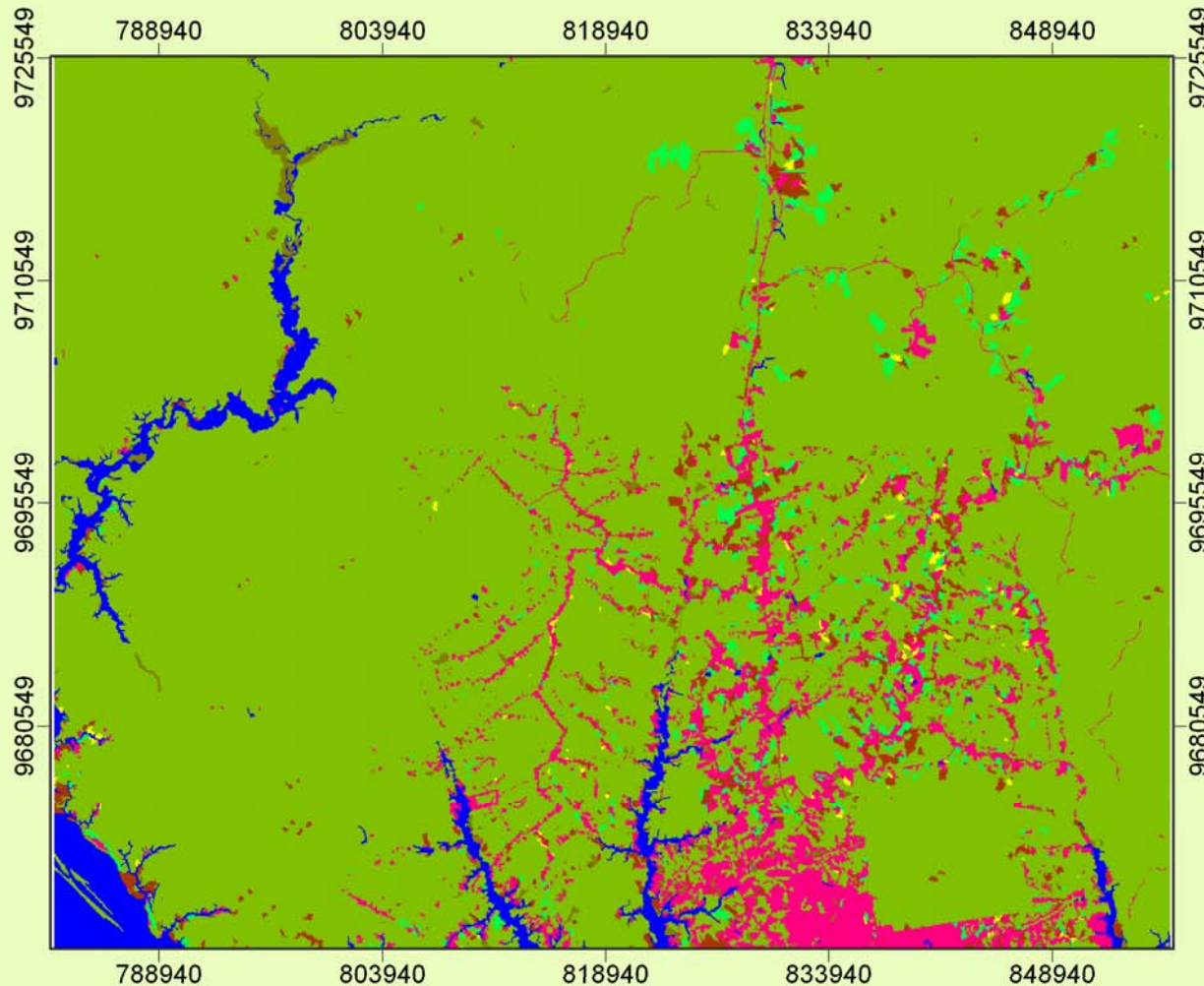
- Area degradada
- Floresta alterada
- Floresta aluvial
- Floresta de terras baixas
- Sucessão secundária inicial
- Suc. secundária intermediária
- Pastagem
- Solo exposto
- Sucessão secundária alterada
- Água

0 2,5 5 7,5 10 km



Dados: Classificação Orientada a Objeto
Imagem Landsat TM 1999

IMAGEM DA CLASSIFICAÇÃO (2001)



Legenda

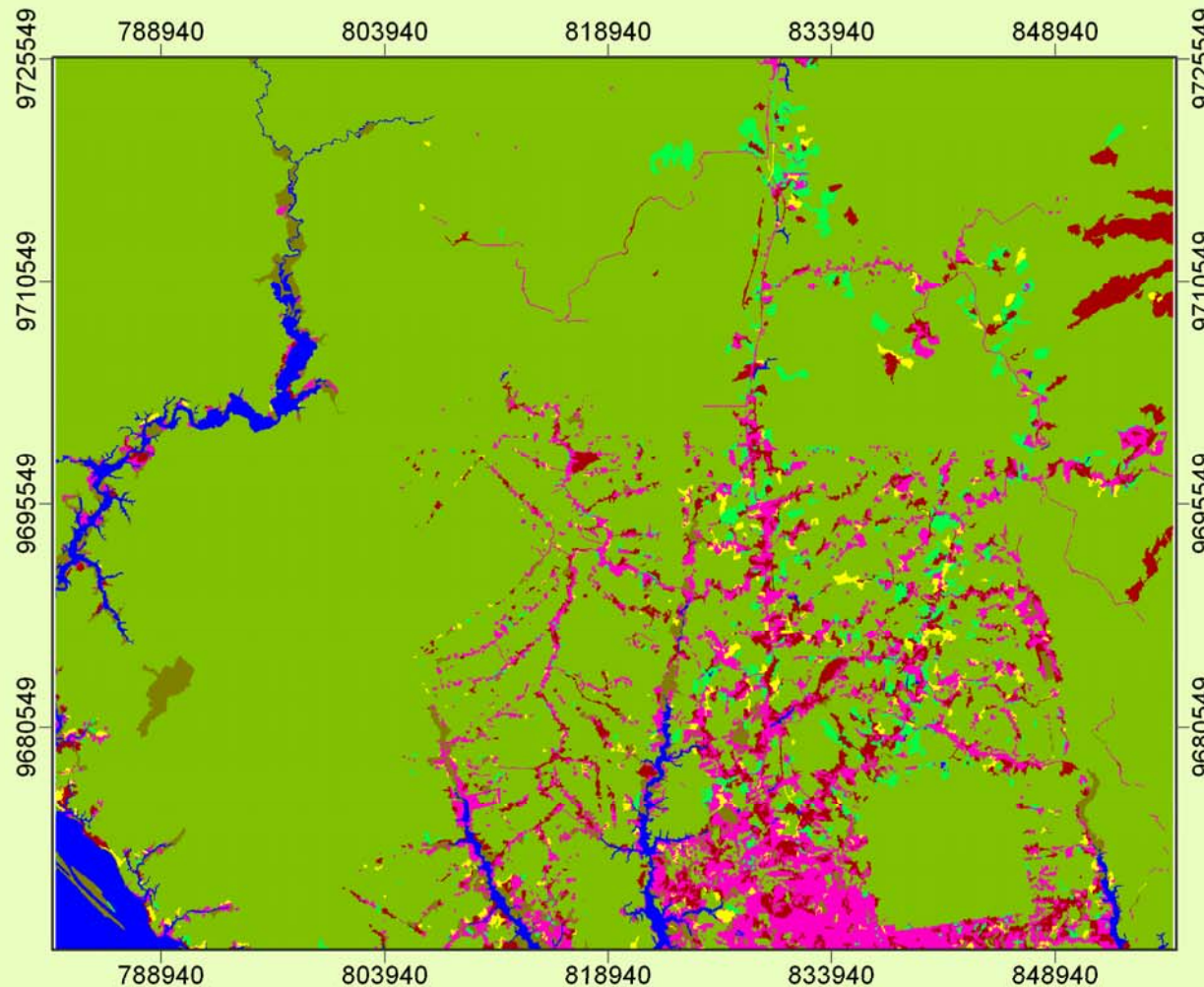
- Area degradada
- Floresta alterada
- Floresta Ciliar
- Floresta de terras baixas
- Floresta Ombrófila Densa
- Sucessão secundária inicial
- Suc. secundária intermediária
- Pastagem
- Solo exposto
- Sucessão secundária alterada
- Água

0 2,5 5 7,5 10 km



Dados: Classificação Orientada a Objeto
Imagem Landsat TM 2001

IMAGEM DA CLASSIFICAÇÃO (2003)



Legenda

- Area degradada
- Floresta alterada
- Floresta aluvial
- Floresta de terras baixas
- Sucessão secundária inicial
- Suc. secundária intermediária
- Pastagem
- Solo exposto
- Sucessão secundária alterada
- Água

0 2,5 5 7,5 10 km



Dados: Classificação Orientada a Objeto
Imagem Landsat TM 2003