

ADALBERTO KOITI MIURA

**IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE
FORMAÇÃO PIONEIRA DE INFLUÊNCIA FLUVIAL DO
LITORAL CENTRO-SUL PARANAENSE, POR MEIO DE
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau e do título de *Mestre em Ciências Florestais*.

Orientador: Prof.^o Dr.^o Yoshiko Saito Kuniyoshi

CURITIBA

1999



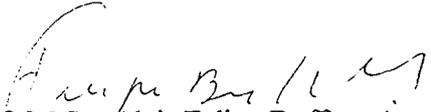
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

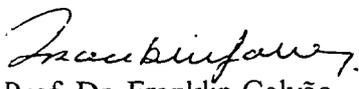
P A R E C E R

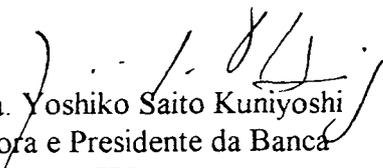
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **ADALBERTO KOITI MIURA**, sob o título "**IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE FORMAÇÃO PIONEIRA DE INFLUÊNCIA FLUVIAL DO LITORAL CENTRO-SUL PARANAENSE**", para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Florestais**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **CONSERVAÇÃO DA NATUREZA**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, com média final: (7,6), correspondente ao conceito: (**B**).

Curitiba, 06 de agosto de 1999


Prof. M.Sc. Alzir Felipe Buffara Antunes
Primeiro Examinador
UFPR


Prof. Dr. Franklin Galvão
Segundo Examinador
UFPR


Profª Dra. Yoshiko Saito Kuniyoshi
Orientadora e Presidente da Banca
UFPR



*“Como dois e dois são quatro
Sei que a vida vale a pena,
Embora o pão seja caro
E a liberdade pequena”
(Ferreira Gullar)*

*Este trabalho é dedicado à:
minha família e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À Universidade Federal do Paraná.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

À Prof. Dra. Yoshiko Saito Kuniyoshi, pela orientação e dedicação.

Aos Prof. Dr. Flávio Kirchner, Prof. Dra. Christel Lingnau e Prof. Dr. Franklin Galvão pela Coorientação, pelas correções e valiosas sugestões.

Ao Prof. Dr. Carlos Vellozo Roderjan pelas sugestões e pela agradável convivência.

Aos Engenheiros Florestais Augusto Cesar Svolenski e Gilberto Tieppolo, pela ajuda em campo e pela amizade.

Ao Prof. MSc. Angelo Evaristo Sirtoli pela ajuda, dicas e amizade.

Ao MSc. Augusto Cesar Fayet em nome da UNILIVRE, pelo apoio recebido.

À Gracie Abad Maximimiano em nome da SEMA (LISERP) pelas imagens LANDSAT, pelo empréstimo das fotos aéreas e pelos arquivos digitais.

Ao Arsênio Muratori, em nome do IPARDES, por viabilizar as imagens LANDSAT e temas de ArcView.

Ao Guga pela ajuda com os mapas no IBGE.

À Profa. Dra. Evelyn M.M. Novo, pela inspiração e dicas.

Ao MSc. Alzir Felipe Antunes em nome CIEG, pelo apoio recebido e pelas valiosas sugestões.

Ao MSc. Clóvis S. Borges em nome da SPVS, pelas imagens LANDSAT e pelo apoio recebido.

Ao futuro Geógrafo José Augusto Rocha, pela dedicação, ajuda (emergencial) com os dados digitais e pela amizade.

Prof. Dr. Milton Campos em nome do Laboratório GPS da UFPR, pela viabilização do GPS nas fases de campo e pelos ensinamentos.

Ao amigo Luís Flávio Garcia de Lima, em nome do Mater Natura, pelo apoio logístico, pela ajuda nas fases de campo e pela amizade.

À Engenheira Florestal Ana Maria Melo Peixoto, pelo auxílio na digitalização e pela amizade

À Engenheira Florestal Alexandra Bartoszeck, pelo auxílio e pela amizade sempre presente.

À aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho

Aos meus pais, por tudo.

A Jesus ...

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | vi |
| LISTA DE TABELAS | viii |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS..... | ix |
| RESUMO | xi |
| ABSTRACT..... | xii |
| | |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 3 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 6 |
| 2.1 ÁREAS ÚMIDAS | 6 |
| 2.2 VEGETAÇÃO DA PLANÍCIE LITORÂNEA PARANAENSE | 8 |
| 2.2.1 Formações Pioneiras..... | 9 |
| 2.2.2 Floresta Ombrófila Densa..... | 15 |
| 2.3 MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO..... | 17 |
| 2.3.1 Sensoriamento Remoto..... | 19 |
| 2.3.2 Características Espectrais da Vegetação. | 23 |
| 2.3.3 Aplicabilidade do Sensoriamento Remoto na Área Florestal..... | 25 |
| 2.4 Processamento digital de imagens..... | 26 |
| 2.4.1 Composição Colorida | 27 |
| 2.4.2 Realce de imagens | 28 |
| 2.4.3 Análise por Componentes Principais | 29 |
| 2.4.4 Índices de vegetação | 31 |
| 2.4.5 <i>Tasseled Cap</i> | 32 |
| 2.5 Classificação Digital de Imagens..... | 35 |
| 2.5.1 Classificação Não-Supervisionada | 35 |
| 2.5.2 Classificação Supervisionada | 36 |
| 2.5.3 Algoritmos de Classificação..... | 37 |
| 2.5.4 Acurácia da Classificação | 39 |

| | |
|---|-----|
| 2.6 Sistema de Posicionamento Global (GPS) | 41 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 43 |
| 3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO | 43 |
| 3.2 FONTE DE DADOS | 48 |
| 3.3 EQUIPAMENTOS | 50 |
| 3.4 PROCEDIMENTOS..... | 50 |
| 3.5 FASE DE CAMPO..... | 51 |
| 3.6 FASE DE LABORATÓRIO | 52 |
| 3.6.1 Uso de Fotos Aéreas e da Base Cartográfica..... | 52 |
| 3.6.2 Processamento Digital de Imagens..... | 53 |
| 3.6.3 Classificação Digital de Imagens | 60 |
| 3.6.4 Pós-Classificação | 62 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 66 |
| 4.1 ESTATÍSTICA DAS IMAGENS | 66 |
| 4.2 CORREÇÃO GEOMÉTRICA DA IMAGEM..... | 69 |
| 4.3 REALCE DAS IMAGENS E TRANSFORMAÇÕES ESPECIAIS | 70 |
| 4.4 COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA COR | 82 |
| 4.5 CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS..... | 91 |
| 4.6 FORMAÇÃO PIONEIRA DE INFLUÊNCIA FLUVIAL..... | 96 |
| 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 102 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |
| | |
| ANEXOS..... | 113 |
| ANEXO 01 MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS BANDAS | 114 |
| ANEXO 02 OIF DAS PRINCIPAIS COMPOSIÇÕES COLORIDAS..... | 115 |
| ANEXO 03 CLASSIFICAÇÃO NÃO-SUPERVISIONADA..... | 116 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 01 – Curva de reflectância espectral da vegetação | 24 |
| Figura 02 – Planos de variação em uma transformação <i>tasseled cap</i> | 34 |
| Figura 03 – Localização da área de estudo. | 44 |
| Figura 04 – Diagrama de fluxo apresentando as diferentes etapas do método utilizado. | 53 |
| Figura 05 – Diagrama de fluxo sobre as etapas da classificação..... | 61 |
| Figura 06 – Histogramas das bandas originais | 68 |
| Figura 07 – Análise por componentes principais. | 73 |
| Figura 08 – Análise por componentes principais, nas bandas do visível e do infravermelho. | 76 |
| Figura 09 – Índices vegetativos – RVI, DVI, NDVI, SAVI e MSAVI2..... | 78 |
| Figura 10 – Índices vegetativos – TVI, NDWI, R42 e EQ..... | 79 |
| Figura 11 – Transformação <i>tasseled cap</i> : bandas <i>brightness</i> , <i>greeness</i> e <i>wetness</i> e composição colorida B-G-W (RGB)..... | 84 |
| Figura 12 – Detalhe da imagem nas composições (RGB): a) 5-4-3, b) PCVI-PCIR-PC3, c) B-G-W, D) PC3-G-W | 87 |
| Figura 13 – Classificação supervisionada sobre os seguintes conjuntos de bandas: a) PCA1-PCA2-PCA3; b) PCVI-PCIR-PCA3..... | 89 |
| Figura 14 – Classificação supervisionada sobre os seguintes conjuntos de bandas: A) PCVI-PCIR-PCA2; B) 3-4-5. | 90 |
| Figura 15 – Classificação supervisionada sobre os seguintes conjuntos de bandas: a) B-G-W e b) B-G-W-PCA3.. | 91 |
| Figura 16 – Comportamento do Índice <i>Kappa</i> para as seis classificações de acordo com amostragem casualizada das diferentes classes envolvidas. | 92 |
| Figura 17 – Elipses de quatro diferentes assinaturas espectrais (ilustração simplificada)..... | 96 |
| Figura 18 – Sucessão ecológica em área de Formação Pioneira de Influência Fluvial, em direção à comunidade clímax..... | 97 |
| Figura 19 – Ocorrência de Formações Pioneiras De Influência Fluvial..... | 100 |
| Figura 20 – Principais classes de vegetação da planície litorânea centro-sul paranaense..... | 104 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 01 – Principais características e aplicações das bandas TM do satélite Landsat-5 | 22 |
| Tabela 02 – Índices de Acurácia..... | 64 |
| Tabela 03 – Estatística básica das bandas originais | 66 |
| Tabela 04 – Matriz de covariância..... | 67 |
| Tabela 05 – Matriz de correlação | 69 |
| Tabela 06 – Variância de cada componente (todas as bandas)..... | 71 |
| Tabela 07 – Matriz de autovetores | 73 |
| Tabela 08 – Variância de cada componente (bandas do visível)..... | 75 |
| Tabela 09 – Variância de cada componente (bandas do infravermelho)..... | 75 |
| Tabela 10 – Índices de Vegetação..... | 77 |
| Tabela 11 – Fator de índice ótimo para <i>triplets</i> de bandas originais..... | 83 |
| Tabela 12 – Composições coloridas selecionadas | 85 |
| Tabela 13 – Acurácia média, global e índice <i>kappa</i> das classificações Selecionadas (N=300) | 92 |
| Tabela 14 – Matriz de erros da classificação B-G-W-PCA3 (tamanho da amostra por classe, N=30)..... | 94 |
| Tabela 15 – Acurácia determinada para todas as classes | 94 |
| Tabela 16 – Áreas determinada para todas as classes, conforme classificação sobre o conjunto de bandas B-G-W-PCA3 | 97 |
| Tabela 17 – Áreas determinada para as classes..... | 99 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AER – Avaliação Ecológica Rápida

AFP – Áreas de Formação Pioneira.

CNAE – Comissão Nacional de Atividades Espaciais

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DEPRN – Departamento Estadual de Proteção aos Recursos Naturais.

DGPS – *Differential Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global Diferencial) ou posicionamento relativo.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronaves

ERTS – *Earth Resources Technology Satellite* (Satélite Tecnológico de Recursos Naturais)

FOD – Floresta Ombrófila Densa.

Gb – Gigabyte

GCP – *Ground Control Point* (Ponto de Controle no Terreno)

GIS – *Geographic Information System* (Sistema de Informações Geográficas)

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

ha – Hectare

IAP – Instituto Ambiental do Paraná.

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBDF – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal

IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social

ISODATA – *Iterative Self-Organizing Data*

km – Quilômetro

km² – Quilômetro quadrado

LANDSAT – *Land Remote Sensing Satellite* (Satélite de Sensoriamento Remoto da Terra)

LISERP – Laboratório Integrado de Sensoriamento Remoto do Paraná

m – Metro

m² – Metro Quadrado

MAI – *Microstation Advanced Imager*

Mb – Megabyte

MBI – *Microstation Base Imager*

MECB – Missão Espacial Completa Brasileira

MGE – *Microstation GIS Environment*

MME – Ministério das Minas e Energia

NASA – *National Aeronautics & Space Administration*

NC – Nível de Cinza

NMA – Núcleo de Monitoramento Ambiental

PCA – *Principal Component Analysis*

PDI – Processamento Digital de Imagem

RADAM /RADAMBRASIL – Radar da Amazônia

RADAR – *Radio Detecting and Ranging* (Radio Detecção e medição de distância)

RAM – *Random Access Memory* (Memória de Acesso Randômico)

RCSSMRS – *Regional Centre for Services in Surveying, Mapping and Remote Sensing* (Centro Regional de Serviços em Levantamentos, Mapeamentos e Sensoriamento Remoto) - país: Quênia

REA – *Rapid Ecological Assessment* (Avaliação Ecológica Rápida)

RGB – Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul)

RMS – *Root Mean Square Deviation* (Erro Médio Quadrático)

SIG – Sistema Geográfico de Informação, equivalente ao termo em inglês GIS

SITIM – Sistema de Tratamento de Imagens

SLAR – *Side Looking Airborne Radar* (Radar Aerotransportado de Visada Lateral)

SPOT – *Satellite pour l'Observation de la Terre* (Satélite para a Observação da Terra)

SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas

SPVS – Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental

TIFF – *Tagget Image File Format* (extensão *.tif)

TM – *Thematic Mapper* (Mapeador Temático)

UFPR – Universidade Federal do Paraná

WWF – Fundo Mundial para a Natureza (World Wildlife Fund)

RESUMO

Título: Identificação e quantificação de áreas de Formação Pioneira de Influência Fluvial do litoral centro-sul do Estado do Paraná, por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento das áreas de ocorrência da Formação Pioneira de Influência Fluvial, no litoral centro-sul do Estado do Paraná. Este tipo de ambiente é de grande importância para a conservação ambiental, uma vez que com as Formações Pioneiras de Influência Fluviomarina (manguezais) e parte da Marinha (restingas), integram as áreas úmidas do litoral paranaense, de grande importância ecológica e econômica. Neste trabalho foram utilizadas algumas técnicas de geoprocessamento, como o sensoriamento remoto, levantamentos de campo e SIG. O processamento digital de um conjunto de seis bandas reflexivas do LANDSAT 5 TM possibilitou a obtenção de bandas sintéticas, provenientes da análise por componentes principais, índices vegetativos e transformação *tasseled cap* que se revelaram muito úteis para a compreensão das características espectrais da cena e auxiliaram a interpretação visual dos dados orbitais. Os índices de vegetação como o NDVI e SAVI, comumente utilizados para trabalhos com vegetação, não foram úteis na discriminação unidades fitofisionômicas, porém destacaram muito bem o contraste entre áreas florestadas e desflorestadas. A transformação por *tasseled cap* e a análise por componentes principais produziram resultados muito interessantes, sendo aproveitados para a classificação digital. Os levantamentos de campo foram realizados com o auxílio de GPS (Global Position System) que possibilitou maior precisão na correção geométrica das imagens e apoiou a seleção das áreas de treinamento para a classificação digital. A combinação do algoritmo do paralelepípedo com o da máxima verossimilhança (Para-ML) foi aplicado em diferentes conjuntos de bandas, sendo a que melhor representou a realidade de campo, foi a que utilizou o terceiro componente principal e as bandas provenientes da transformação *tasseled cap*. Esta combinação permitiu obter uma imagem classificada com o melhor índice de exatidão (acurácia total de 85,33% e índice *Kappa* de 83,70%). O total das áreas de Formação Pioneira de Influência Fluvial obtido para o litoral centro-sul do Estado do Paraná foi de 19.975,741 ha, ou seja, 23,42%. Ao considerar as áreas úmidas, estas ocupam 40.587,13 ha ou seja, 35,82%. Os resultados sobre a localização da Formação Pioneira de Influência Fluvial foram disponibilizados sob a forma de mapas.

ABSTRACT

Title: Identification and quantification of areas of Pioneer Formation of Fluvial Influence in the center-south coast of the State of Paraná using some remote sensing techniques.

This work had the purpose to accomplish a survey of the occurrence areas of the Pioneer Formation of Fluvial Influence in the center-south coast of the State of Paraná. This environment type is very important for the environmental conservation, once that together with the Pioneer Formations of Fluviomarine Influence (mangroves) and Marine Influence (sandbanks), they integrate the coastal wetlands of the State of Paraná, that have great ecological and economic importance. For the execution of the works, some techniques of geoprocessing were used such as remote sensing, field survey and GIS. The digital processing of a group of six reflexive bands of LANDSAT 5 TM facilitated the acquisition of synthetic bands, deriving from the principal components analysis, vegetative indexes and tasseled cap transformation. They were very useful for the understanding of the spectral characteristics of the scene and aided the visual interpretation of the orbital data. Vegetation Indexes as NDVI and SAVI, commonly used for works with vegetation, were not useful in the phytophysiological units discrimination, but they highlighted very well the contrast between forested and deforested areas. The tasseled cap transformation and the principal component analysis produced very interesting results, being used for the digital classification. The field surveys were accomplished with the aid of GPS (Global Position System) that made possible larger precision in the geometric correction of the images and also supported the selection of the training areas for the digital classification. The combination of the parallelepiped algorithm with the maximum-likelihood one (Para-ML) was applied in different band combinations. The one that best represents the ground truth used the third principal component and the bands deriving from the tasseled cap transformation, which achieve the best accuracy index (overall accuracy was 85,33%, while the Kappa index was 83,70%). The total of the Pioneer Formation of Fluvial Influence areas obtained was of 19.975,74 ha., i.e. 23,42% of the total area of the center-south coast of the State of Paraná. When considering the wetlands, they occupy 40.587,13 ha, i.e. 35,82%. The results about the location of the Pioneer Formation of Fluvial Influence are also available by maps.

1 INTRODUÇÃO

As florestas tropicais úmidas continuam sendo destruídas em ritmo preocupante. Além disso, os impactos negativos desta destruição ou conversão das florestas em comunidades rurais, agricultura, madeira, pastagem e especulação imobiliária, têm sido sistematicamente ignorados em detrimento de questões como biodiversidade, solos, água e mudanças climáticas (SADER, STONE & JOYCE, 1990). Na América do Sul, o Brasil é o país onde ocorreram as maiores perdas de florestas, principalmente ao longo da costa, que tem sido explorada desde os tempos coloniais (STONE *et al.*, 1994).

O relevo da planície litorânea paranaense apresenta um litoral bastante entrecortado e com uma significativa malha hidrográfica, o que possibilita a existência de diferentes fisionomias florestais. Esta condição é favorável à ocorrência de formações pioneiras que, pela gradual substituição de suas diferentes fases sucessionais, tende a transformar-se em Floresta Ombrófila Densas das Terras Baixas. De uma forma geral esses ambientes são considerados como transições entre o meio terrestre e o meio fluvial ou marinho, sendo, na realidade, comunidades de primeira ocupação edáfica.

As áreas de formações pioneiras, como mangues, restingas e várzeas, têm sido destruídas sistematicamente sem a preocupação com a função ecológica destes ambientes. Como exemplo, cita-se a Formação Pioneira de Influência Fluvial do litoral do Paraná, abrigo do bicudinho-do-brejo, uma ave rara, endêmica destes ambientes, recentemente descoberta para a ciência, no litoral do estado (BORNSCHEIN, REINERT & TEIXEIRA, 1996).

A identificação e mapeamento destas feições de vegetação não significam necessariamente novidade, porém o emprego de imagens orbitais e técnicas de geoprocessamento correspondem a um avanço significativo a este processo.

O fato de existirem poucos trabalhos de mapeamento de vegetação, utilizando-se de técnicas de classificação digital de imagens multiespectrais para a vegetação do litoral do Estado do Paraná, contribui para uma noção imprecisa sobre a área total da planície litorânea paranaense. Esta condição tem estimulado o crescente interesse para o tema e o desenvolvimento de trabalhos recentes voltados ao estudo destas áreas, como os realizados por LEITE (1994), ANTUNES (1996) e SILVEIRA (1997).

Muitos autores (SADER, STONE & JOYCE, 1990; MUCHONEY, GROSSMAN & SOLOMON, 1991; CRISTOFANI, 1996) recomendam a utilização do sensoriamento remoto para o monitoramento das condições florestais e para subsidiar sistemas de informação geográfica (SIG) e avaliação ecológicas rápidas (AER) como instrumentos para conservação destas áreas.

As imagens da terra, provenientes de sensores orbitais, têm-se demonstrado como um importante instrumento para diagnósticos físico-ambientais rápidos para grande áreas. Com esta fonte de dados, aliada às modernas técnicas de geoprocessamento é possível investigar com bastante precisão as variáveis ambientais passíveis de mapeamento ou monitoramento.

O emprego de técnicas não convencionais de processamento digital de imagens é de grande utilidade na classificação de dados multiespectrais provenientes de sensores remotos. A análise por componentes principais e os índices vegetativos ainda não são amplamente empregados em geoprocessamento, apesar de sua utilização ser fortemente recomendada e os resultados de sua aplicação mostrarem-se bastante vantajosos, por exemplo, o inventário florestal do Estado de Minnesota nos EUA (BAUER *et al.*, 1994), na diferenciação entre sucessão secundária avançada e floresta não perturbada, a região de Altamira, Brasil (LI *et al.*, 1994), e o mapeamento da vegetação do pântano de Okefenokee, EUA (LO & WATSON, 1994).

Mesmo que voltado para o levantamento da Formação Pioneira de Influência Fluvial, este trabalho pode ser utilizado nas iniciativas de desenvolvimento da região e para o aproveitamento econômico da caxeta (espécie arbórea que ocorre neste tipo de ambiente), com subsídios para sua conservação, manejo e informações relevantes que podem fundamentar as necessidades de legislação e fiscalização da atividade extrativista. Por outro lado, contribui para um melhor conhecimento da distribuição da vegetação da planície litorânea do Paraná, além de estimular esforços na conservação desta região, indicando áreas para desenvolvimento regional e estudos de implantação de práticas econômicas mais indicadas.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Identificação e quantificação das áreas de ocorrência de Formação Pioneira de Influência Fluvial no litoral centro-sul do Estado do Paraná, mediante a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, em especial, a classificação digital de imagens.

Objetivos Específicos

- Identificar as principais unidades fitofisionômicas da planície litorânea do Paraná por meio de imagens de satélite;
- Identificar e quantificar as áreas úmidas nesta porção do Estado;
- Aplicar técnicas de análise de componentes principais e de índices vegetativos, em especial a transformação por *tasseled cap*, como subsídios para a classificação digital.
- Contribuir para a conservação destes ambientes, como fonte de informações, para projetos ou estudos científicos e ambientais relativos à vegetação da planície litorânea.

1.2 JUSTIFICATIVA

A importância ecológica e o valor paisagístico da Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica) e das Formações Pioneiras da planície litorânea do Estado é indiscutível. O Estado do Paraná ainda possui algumas áreas representativas destes ecossistemas, apesar do avanço dos antropismos.

A política de desenvolvimento do Estado e os esforços conservacionistas pouparam as formações vegetais do litoral paranaense do mesmo destino da Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária) e da Floresta Estacional Semidecidual, que se restringem atualmente à alguns resquícios do que já foram um dia. A perda deste patrimônio é inestimável, justificando plenamente os esforços de conservação da Floresta Atlântica.

As atuais pressões para o desenvolvimento do litoral paranaense colocam em risco a integridade destes ambientes. As atividades agrossilvopastoris estão substituindo as florestas em algumas áreas, a especulação imobiliária, principalmente sobre as áreas de restinga, várzea e de floresta de planície costeira estão avançando em ritmo acelerado e

pressões decorrentes do turismo nesta região também contribui negativamente para a conservação de áreas.

O sensoriamento remoto e outras técnicas de geoprocessamento, têm sido valiosas ferramentas para os pesquisadores e órgãos de governo, principalmente para planejamento estratégico e para monitoramento ambiental. Foi somente por meio da utilização de sensores remotos, que a comunidade científica e ambientalista paranaense comprovou o alarmante ritmo de redução das florestas no Estado. Atualmente o sensoriamento remoto constitui-se em um dos principais instrumentos para o monitoramento de áreas naturais, permitindo o acompanhamento do avanço do desmatamento e da recuperação de áreas.

O conhecimento da distribuição das Formações Pioneiras de Influência Fluvial no litoral do Estado e estimativas de suas áreas contribuem para o processo de conservação e planejamento ambiental nesta região do Estado, permitindo o monitoramento de áreas, fiscalização e principalmente, localizando regiões importantes para a pesquisa e conservação.

O Brasil é signatário da Convenção de Ramsar, desde 1992, quando firmou o compromisso de buscar a conservação de áreas úmidas (*wetlands*) e promover o seu “bom” uso. Porém, a proteção e manejo de recursos ocorre apenas em unidades de conservação.

As formações pioneiras encontradas na planície litorânea do Paraná estão incluídas no conceito de áreas úmidas, portanto, o compromisso assumido pelo Brasil ao assinar esta convenção é estendido a estes ambientes. Apesar dos antecedentes e da legislação para a conservação destas áreas, o que se nota é uma perigosa tendência de ocupação e uso antrópico destes ambientes, principalmente pelo desconhecimento de seus limites atuais. Assim a localização das formações pioneiras, em particular a de influência fluvial, representa um importante passo para a conservação destes ambientes.

Estes ecossistemas úmidos podem abrigar algumas comunidades peculiares, como a de *Tabebuia cassinoides*, que chegam a formar agrupamentos homogêneos denominados caxetais. Esta espécie teve grande importância econômica para litoral paranaense no passado. Sua madeira é reconhecida como a melhor para a confecção de lápis de qualidade, superada apenas por *Libocedrus decurrens*, o que a coloca em risco, devido à exploração predatória que reduziu drasticamente o estoque deste recurso

florestal. Atualmente um conjunto de dispositivos legais impedem a sua exploração no Estado, o que tem contribuído para a recuperação de alguns caxetais.

Devido à supressão da atividade, as indústrias tem buscado alternativas de matéria-prima, implicando em perda de mercado para a caxeta. A recuperação de algumas áreas, estimularam os antigos produtores e alguns pesquisadores a tentarem retomar o mercado da caxeta. Estas pressões para a liberação da atividade extrativa exigem que estudos sejam realizados para subsidiar a regulamentação de seu corte, sem que haja risco para espécie. Deste modo, pesquisas sobre os locais de ocorrência da Formação Pioneira de Influência Fluvial, no litoral (onde esta espécie se desenvolve), podem auxiliar os órgãos ambientais do Estado para um maior controle e eficácia na fiscalização da caxeta, garantindo que as atividades de exploração sejam desenvolvidas de forma sustentável.

Os resultados deste trabalho também podem subsidiar os órgãos de gestão ambiental para a ampliação de unidades de conservação no litoral do Estado, fornecendo indicativos de áreas contínuas e em bom estado de preservação, contribuindo com a conservação das áreas úmidas do litoral e da Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ÁREAS ÚMIDAS

O termo áreas úmidas deriva do equivalente em inglês *wetland*, que apesar das imprecisões ecológicas ou fitogeográficas é amplamente empregada no jargão conservacionista e ambientalista por diferentes instituições como WWF, IUCN e UNESCO, para referir-se aos ecossistemas cuja formação é dominada pela água e que os processos e características são fortemente controlados por este elemento. Por esta razão, termos como áreas alagáveis, encharcadas, inundadas, pantanosas, dentre outras, apesar de muitas vezes transmitirem melhor a condição ambiental, falham por serem desconhecidas no jargão conservacionista e científico.

Segundo WWF (1996), as áreas úmidas constituem o ponto onde água e terra se encontram e constituem um dos ambientes mais antigos do planeta, abrigando áreas ricas em biodiversidade. Estes locais podem ser encontrados em qualquer lugar do mundo, dos trópicos às planícies geladas.

São áreas de pântanos, charcos, brejos, turfeiras e corpos d'água, naturais ou artificiais, permanente ou temporários, com água estagnada ou corrente, doce salobra ou salgada, incluindo estuários, planícies costeiras inundáveis, ilhas e áreas marinhas costeiras, com menos de seis metros de profundidade na maré baixa, sendo a água o principal fator de controle de ambiente e de associação planta e vida animal. (THE RAMSAR CONVENTION BUREAU, 1998).

São locais inundados ou saturados por águas superficiais ou subterrâneas, na frequência e tempo suficientes para promover condições de saturação de solo responsáveis pelo desenvolvimento de vegetação e outros organismos adaptados a esta situação (MALTBY, 1986). Para JUNK (1993) estas áreas são inundadas devido à deficiência de drenagem do terreno ou por excesso de chuvas ou pelo transbordamento das águas de rio ou ainda pelo conjunto destes fatores. De acordo com estas definições, as áreas úmidas encontradas no litoral paranaense se enquadram no sistema de

classificação proposto pelo IBGE (1992) como Formação Pioneira de Influência Fluvial e Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha.

DIEGUES (1994), divide as áreas úmidas naturais em continentais e costeiras. A primeira, engloba as várzeas, planícies de inundação, pântanos, brejos, lameiros e lagoas superficiais. As áreas úmidas costeiras são sistemas de interface entre terra e mar, periodicamente banhados por águas salgadas ou salobras. Nesta classificação incluem-se os estuários, deltas, manguezais, lagoas costeiras, restingas e praias. De acordo com esta abordagem, pode-se incluir também as Formações Pioneiras de Influência Marinha (IBGE, 1992) no conceito de áreas úmidas.

Estas áreas são responsáveis por diferentes funções, como controle de inundações, retenção de nutrientes, sedimentos e contaminantes, suporte a cadeia alimentar, estabilização da linha de costa e controle da erosão, proteção contra tempestades e estabilização das condições climáticas locais, particularmente pluviosidade e temperatura (MALTBY, 1986; DIEGUES, 1994; WWF, 1996).

Dentre os principais produtos gerados pelas áreas úmidas, e aproveitados pelas populações humanas, destacam-se: alimentação, florestas para madeira e combustível, áreas férteis para agricultura, pesca, ambiente para reprodução e crescimento de vida selvagem e de recursos pesqueiros, controle de enchentes, fornecimento d'água, forragem para o gado, dentre outras finalidades (MALTBY, 1986; THE RAMSAR CONVENTION BUREAU, 1998).

Apesar da sua importância, as áreas úmidas continuam sendo um dos mais ameaçados ecossistemas do mundo, sendo submetidos à drenagens, conversão de suas áreas para atividades agropastoris e para a expansão urbana, extrativismo predatório e poluição (JUNK, 1993; DIEGUES, 1994).

As áreas úmidas são um clássico exemplo de sucessão vegetal, onde a comunidade de plantas alteram as condições ambientais, tornando o hábitat desfavorável para sua própria sobrevivência, porém mais favorável à instalação de uma comunidade diferente (MALTBY, 1986).

2.2 VEGETAÇÃO DA PLANÍCIE LITORÂNEA PARANAENSE

A região da planície costeira paranaense apresenta-se com uma relativa diversidade geomorfológica, com algumas paisagens bem definidas, como por exemplo, as áreas estuarinas, as ilhas, praias, os cordões litorâneos, pequenas enseadas, lagoas, dentre outros. Segundo ARAÚJO (1987) esta diversidade permite a instalação de comunidades vegetais muito variadas, que a literatura, em especial os textos menos recentes (anteriores a 1992), a enquadram na categoria geral de vegetação de restinga.

A vegetação que reveste a planície quaternária do litoral do Estado tem sido reportada, no âmbito da fitogeografia, de diferentes formas, o que ocasionou problemas de padronização e de enquadramento de floras. Em muitos trabalhos, principalmente aqueles do início do século, a vegetação foi descrita de forma bastante genérica e não refletiram a diversidade florística, fisionômica e estrutural que estes ambientes apresentam. No entanto, à medida em que o conjunto dos conhecimentos científicos foram se ampliando, a florística sendo melhor compreendida, os trabalhos sobre o enquadramento fitogeográfico da vegetação também foram se modificando.

A primeira proposta de classificação fitogeográfica do Brasil foi a de Martius, em 1824, utilizando-se da mitologia grega para caracterizar o que considerou como províncias fitogeográficas (SILVA, 1987; VELOSO, 1991). Nesta classificação, a região costeira do Paraná foi enquadrada na província botânica denominada Dryades, sem fazer distinções entre as diversas zonações vegetais ocorrentes na região (SILVA, 1990).

CAMPOS (1912) refere-se à vegetação que ocupa a planície litorânea do Estado como Vegetação Costeira. Sob esta denominação, estão reunidas as formações pioneiras e as florestas de planícies.

O sistema de classificação proposto por Sampaio em 1940 enquadra a vegetação da planície costeira na Zona Marítima, dentro da Flora Geral ou Extra Amazônica. Mais recentemente, Rizzini (1963) tomando por base as categorias de territórios regionais de Braun-Blanquet, incluiu as formações vegetais das planícies litorâneas como pertencente à Província Atlântica, Sub-Província Austro-Oriental, Setor Litorâneo (SILVA, 1987; VELOSO, 1991).

Em 1950, Maack apresenta o mapa fitogeográfico do Estado, onde enquadra a vegetação da planície quaternária do litoral nas seguintes regiões: a) Região Litorânea

(Vegetação da Praia, Formação de Mangrove e Formação de Restinga); b) Regiões Pantanosas (Pântanos do Litoral); c) Região das Matas (Mata Pluvial Tropical do Litoral) MAACK (1950; 1981).

O sistema de Andrade-Lima de 1966, considerou a vegetação brasileira em duas grandes categorias: Formações Florestais e Formações não Florestais ou Campestres (SILVA, 1997). Aplicando-se este sistema de classificação na planície costeira paranaense, têm-se: Floresta Costeira (florestas costeiras brasileiras), Floresta Esclerófila Litorânea (restingas) e Mangue.

O Sistema Internacional de Classificação da Vegetação adaptada para o RADAMBRASIL por VELOSO & GÓES-FILHO (1982), baseados em critérios fisionômico-ecológicos, incluíram a vegetação, das planícies costeiras como Floresta Ombrófila Densa das Terra Baixas, Floresta Ombrófila Densa Aluvial e Formação Pioneira com Influência Marinha, Fluviomarina e Fluvial. RODERJAN & KUNYOSHI (1988) e IPARDES (1989; 1990) utilizaram-na, para os trabalhos de Macrozoneamento Florístico da APA de Guaraqueçaba e para o zoneamento do litoral paranaense.

A classificação proposta por VELOSO & GÓES-FILHO (1982) foi adotado pelo IBGE (1992), passando a ser o padrão oficial brasileiro de enquadramento fitogeográfico, o que auxiliou muito na unificação e sistematização dos conhecimentos sobre a flora e vegetação brasileiras e a sua inserção em um contexto universal.

Segundo os critérios de classificação fitogeográfica propostos pelo IBGE (1992), na planície litorânea paranaense, encontram-se as seguintes formações:

- Formações Pioneiras com influência Marinha
- Formações Pioneiras com Influência Fluviomarina
- Formações Pioneiras com Influência Fluvial
- Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas
- Floresta Ombrófila Densa Aluvial (ao longo dos rios da planície)
- Floresta Ombrófila Densa Submontana (nas proximidades das montanhas e nos morros isolados da planície)

2.2.1 Formações Pioneiras

Compreendem os locais de terrenos instáveis, alagadiços ou não formados pela deposição de sedimentos. São terrenos rejuvenescidos pelas seguidas deposições de areias marinhas nas praias e restingas, por aluviões fluviomarinhos nas desembocaduras

de rios e pelos solos ribeirinhos aluviais e lacustres. A comunidade vegetal que ocupa estas áreas são consideradas formações pioneiras em constante sucessão.

O termo formação pioneira ou comunidade pioneira é usado para denominar o tipo de cobertura vegetal formado por espécies colonizadoras de ambientes novos, áreas subtraídas naturalmente de outros ecossistemas ou surgidas em função da atuação recente ou atual dos agentes morfodinâmicos e pedogênicos (LEITE, 1994). A formulação de seu conceito está baseado nos processos de sucessão vegetal, onde uma comunidade pioneira se instala em ambientes (substratos) novos, com ecossistemas dependentes de fatores ecológicos instáveis, que tendem, com o passar do tempo, culminar num ecossistema estabilizado, denominado comunidade clímax.

HERTEL (1969) distingue duas grandes linhas para a gênese das formações florestais, levando-se em conta a natureza do meio inicial, uma que se dá em terra firme, denominada xerossere e outra, cuja evolução é iniciada na água, ou pelo menos em um substrato temporariamente inundado, que constitui a hidrossere, com dois segmentos importantes: a) limnossere, que se processa na dependência de água doce; b) halossere, que se realiza na dependência da água salgada.

A Formação Pioneira trata-se de vegetação que pertence ao complexo vegetacional de primeira ocupação de caráter edáfico. São exemplos: as vegetações de orla marítima e de pântanos, ambas semelhantes entre si, em qualquer longitude do país, sempre adaptados a parâmetros ecológicos do ambiente pioneiro. Em textos antigos, estas formações pioneiras foram enquadradas sob a forma genérica de restinga (IBGE, 1992).

De acordo com a classificação proposta pelo IBGE (1992), as comunidades pioneiras estão assim subdivididas:

Formação Pioneira de Influência Marinha (restingas)

O termo restinga é muito utilizado na literatura sobre o litoral brasileiro, porém, pode ser utilizado em diferentes contextos, em cada qual com um sentido específico. SUGUIO & MARTIN (1990) e SILVA (1990) relatam diferentes significados do termo, em diferentes utilizações, como na geomorfologia, náutica, fitogeografia, botânica e ecologia.

Nestas formações existem uma grande variedade de ambientes integrados, dentre os quais merecem destaque, pela maior importância fisionômica: a faixa de praia, as dunas

instáveis, as dunas fixas, as restingas e os costões rochosos (FERRI, 1980; RODERJAN, 1996).

A faixa de praia é uma região que sofre influência direta das marés, além de apresentar solos com alto índice de salinidade, por estas razões encontram-se poucas espécies vegetais, em geral, psamófilas halófilas rasteiras tais como: *Ipomea pescapre* (salsa-da-praia), *Canavalia rosea*, além de *Paspalum* sp, *Spartina* sp. e *Hidrocotyle* sp. (IBGE, 1992; LEITE, 1994).

As dunas instáveis, irregularmente dispersas, ocupam posições estratégicas na restinga, logo atrás da linha de praia. São áreas assoladas pelos ventos, com mobilização de areia e vegetação escassa. Dentre as espécies mais comuns, encontram-se: *Spartina* spp., *Panicum reptans* (capim-das-dunas), *Sophora tormentosa* (feijão-da-praia), *Scaevola plumieri* (mangue-da-praia), *Gaylussacia brasiliensis* (camarinha). Por outro lado, as dunas fixas distribuem-se de maneira ampla e regular sobre a planície litorânea, onde a ação eólica não se faz tão intensa. Pode-se observar nestes locais uma transformação na estrutura dos sedimentos, mais compactos e com maior retenção de água. Neste ambiente são observadas espécies arbustivas e arbóreas constituindo capões que desempenham importante função como estabilizador de dunas e retentor aquífero na planície. As espécies de maior importância são: *Schinus terebinthifolius* (aroeira-vermelha), *Myrcia rostrata* (guamirim-chorão), *Eugenia umbelliflora* (biguaçu), *Lithraea brasiliensis* (pau-de-bugre), *Rapanea parvifolia* (capororoca-da-praia), *Guapira opposita* (maria-mole) (LEITE & KLEIN, 1990; LEITE, 1994).

As restingas são cordões litorâneos e dunas que são formados pela constante deposição de areias que pela localização sofrem influência direta da ação do mar. Podem ser encontradas comunidades herbáceas, arbustivas e arbóreas. Os terrenos arenosos pobres, de deposição marinha recente, exibem um mosaico vegetal diferente, onde alternam-se ambientes hidrófilos e xerófilos, com suas comunidades vegetais típicas, refletindo, neste caso, uma situação de tensão ecológica, entre os agentes do mar e de áreas continentais montanhosas. Apesar da baixa fertilidade do solo, há uma significativa deposição de serapilheira.

Entre os cordões arenosos e dunas e no contato das restingas com as formações florestais das terras baixas encontram-se superfícies aplainadas e plano-deprimidas, sujeitas às inundações ou encharcamento, onde ocorrem brejos dominadas por

vegetação herbácea por vezes com inúmeras lagoas formadas em função da hidromorfia do solo sendo alimentadas por rios ou pelas chuvas. À medida em que se afasta da orla marinha e os solos tornam-se menos salgados, *Tabebuia cassinoides* (caxeta) começa a ser encontrada, podendo estar acompanhada pelo *Callophyllum brasiliense* (Guanandi). Nos locais mais elevados e secos se desenvolve aglomerações arbóreas e arbustivas onde predominam: *Allophylus edulis* (vacunzeiro), *Ocotea pulchella* (canela-do-brejo), *Alchornea triplinervia* (tapiá-guaçu) e *Myrcia multiflora* (cambuí) (LEITE, 1994; JASTER, 1995).

Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha (mangues)

Entende-se como maguezal, a comunidade vegetal que se desenvolve em ambiente salobro, próximo à desembocadura dos rios e margens de lagoas e baías, ocupando solos denominados manguitos (solos indiscriminados de mangue). De origem sedimentar fluviomarinha, esses solos são alagados e possuem elevado teor de salinidade e matéria orgânica, baixa oxigenação e textura lodosa, refletindo em uma flora provida de pneumatóforos e raízes escoras. O movimento da maré, represando e liberando por períodos alternados o escoamento dos rios, cria nas baías zonas de águas salobras periodicamente calmas, possibilitando deposições sucessivas de sedimentos finos, criando ambientes particulares de pequenas dimensões, onde instalam-se formas de vida vegetal e animal muito especiais (LEITE, 1994).

Segundo FERNANDES & BEZERRA (1990), a mistura deste sistema líquido - água doce/salgada - provoca a floculação de partículas de argila e de matérias orgânicas em suspensão nas águas dos rios, cujas margens, cada vez que a maré sobe, são por elas transbordadas, determinando rapidamente sua sedimentação com conseqüente formação de um solo limo-pantanososo. Este ambiente, por ser inóspito ao homem e não agricultável, tem se mantido preservado na maior parte de sua distribuição (IPARDES, 1989).

Os manguezais do sul do Brasil, são dominados por três espécies arbóreas: *Rizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia schaueriana*. A disposição em faixas dessas espécies, comumente mencionada na literatura, não é claramente visível na região da baía de Paranaguá (JASTER, 1995). Sendo a *Avicennia schaueriana* espécie dominante nas baías de Paranaguá e Guaratuba (KLEIN, 1984). A *Spartina alterniflora* e

S. densiflora (capim-praturá) presente na faixa de águas um pouco mais profundas, desempenha um papel relevante no acúmulo e sedimentação do lodo, nos locais onde formam densos cinturões (KLEIN, 1984; LEITE, 1994).

Por entre os aglomerados arbustivos do mangue-branco (*Laguncularia racemosa*), onde há o acúmulo de areia e os solos tornam-se mais enxutos encontram-se as espécies *Dalbergia hecastophylla* (marmeleiro-da-praia), *Annona glabra* (corticeira) e *Hybiscus pernambucensis* (algodão-do-brejo) que é espécie cosmopolita pantropical (LEITE, 1994).

Formação Pioneira de Influência Fluvial

VELOSO (1991) descreve as áreas de Formação Pioneira de Influência Fluvial, como de comunidades vegetais das planícies aluvionais que refletem os efeitos das cheias dos rios nas épocas chuvosas, ou então, das depressões alagáveis todos os anos.

São formações herbáceas ou arbóreas que ocorrem em regiões de planícies aluviais, bem como sobre as fluviolacustres. Estas regiões, com origem no Quaternário recente, são formadas pela deposição de material carregado pelas cheias dos rios. Esses terrenos, em geral, são considerados férteis, porém com amplas áreas deprimidas e permanentemente alagadas (RODERJAN & KUNIYOSHI, 1988; LEITE & KLEIN, 1990; LEITE, 1994).

Estes terrenos possuem características pedológicas peculiares, onde a água em excesso é elemento inibidor e seletivo para o desenvolvimento de uma comunidade vegetal exuberante e diversificada. A saturação hídrica nos solos provoca de imediato uma rápida queda dos níveis de oxigênio disponível, atingindo em poucas horas uma condição de anoxia. Esta modificação induz não apenas mudanças químicas, mas também mudanças microbiológicas, com a completa substituição da microfauna e microflora do solo (JOLY, 1986). Apesar de algumas condições desfavoráveis, REITZ (1961) comenta que a helosere (Formações Pioneiras de Influência Fluvial) são muito mais interessantes e apresentam maior diversidade de espécies vegetais que as sucessões que ocorrem em ambiente salobro ou salgado.

WAECHTER (1990), ao descrever as comunidades vegetais de restinga (sentido geológico), enquadra as formações Pioneiras de Influência Fluvial nas seguintes categorias: Comunidades Arbóreas (Matas Brejosas ou Turfosas) e Comunidades

Herbáceas (Brejos Costeiros e Lagoas Costeiras).

MAACK (1981) descreve estas formações de influência fluvial como áreas pantanosas da região litorânea, que dão um cunho característico à natureza. Em virtude de suas extensas áreas abertas, não podem ser incluídas nem na região de florestas nem nos campos secos, pois apresentam uma flora típica.

JASTER (1995) comenta que nas faixas entre os cordões litorâneos existem depressões com abundância de água, onde desenvolvem-se áreas de formação pioneira de influência fluvial. À medida em que se afasta da influência marinha e começa a ocorrer depressões com solos hidromórficos, são encontrados os caxetais, intercalados com a vegetação de restinga, que ocupa as porções mais elevadas, de solos não hidromórficos (seqüência de cordões).

De maneira geral, identificam-se com facilidade dois tipos fisionômicos de formações fluviais, determinados pelo grau de inundação o qual estão submetidos: arbustivos e herbáceos, em ambos casos são dominados por ciperáceas e poáceas (LEITE, 1984).

As comunidades herbáceas normalmente estão sujeitas à variação do nível das águas de rios e lagos e, por vezes, às variações de velocidade das águas.

O grau de desenvolvimento do substrato também pode determinar o tipo fisionômico das comunidades vegetais. Os solos orgânicos, na fase inicial, favorecem o estabelecimento de comunidades de hábito herbáceo, sendo caracterizadas por *Typha domingensis* (taboa), *Hedychium coronarium* (lírios-do-brejo), em uma fase intermediária de desenvolvimento do solo, podem ocorrer comunidades arbóreas com o predomínio *T. cassinoides*, podendo ainda ocorrer *Mimosa bimucronata* (maricá) e ou *Cytherexylum* sp. (jacataúva) nas margens, indicando solos aluviais. À medida que a comunidade vegetal evolui aparecem *Callophyllum brasiliense* e *Annona glabra* (corticeira-do-brejo) associadas à *T. cassinoides*. Se o solo for mais desenvolvido e apresentar lençol freático pouco mais profundo, a caxeta pode apresentar porte mais elevado e estar associado à *Clusia* sp. (mangue-do-mato), *Jacaranda* sp. (caroba) (RODERJAN & KUNIYOSHI, 1988; LEITE, 1994; RODERJAN, 1996).

Uma das adaptações a estes ambientes são, por exemplo, as raízes respiratórias geniculadas da caxeta que são utilizadas comercialmente na fabricação de bóias e salva-vidas (KUNIYOSHI, 1993).

As Formações Pioneiras de Influência Fluvial desenvolvem-se comumente sobre

solos hidromórficos, em especial os orgânicos, relacionados a depósitos paludais ou turfáceos e solos Gleis (WAECHTER, 1990). Segundo CURCIO & RACHWAL (1994), os solos orgânicos são constituídos por resíduos orgânicos, em vários estágios de decomposição, depositados sob condições anaeróbicas em locais abaciados. Possuem horizontes hísticos, com teores de carbono maior ou igual a 8% e espessura mínima de 40 cm. Os solos Gleis são solos minerais, hidromórficos, derivados de sedimentos alúvio-coluvionares que ocorrem em relevos côncavos e apresentam hidromorfia intensa, expressa por horizonte glei (cinza) dentro dos 50 cm superficiais, formado por redução de ferro, a textura pode ser argilosa ou média, com fertilidade variável, encontrando-se tanto sob florestas ciliares como em locais mais interiorizados, no plano aluvial.

2.2.2 Floresta Ombrófila Densa

A Floresta Ombrófila Densa caracteriza-se como floresta das encostas da Serra do Mar e planícies litorâneas. Formação característica de áreas tropicais úmidas (período anual seco variando de 0 a 60 dias, com chuvas bem distribuídas), distinguindo-se pela presença de fanerófitos perenifoliados, com brotos foliares geralmente desprotegidas contra seca e/ou frio intenso. Os elementos arbóreos desta formação possuem grande força vegetativa e acentuada concorrência pela ocupação do espaço, cujo caráter heliófilo reflete a busca pelos estratos superiores da floresta (KLEIN & LEITE, 1990; IBGE, 1992; LEITE, 1994).

Tomando-se como referência parâmetros altimétricos, ocorrem as seguintes subformações: Aluvial, das Terras Baixas, Submontana, Montana e Altomontana.

Se nas formações pioneiras são encontrados bons exemplos de prisere, a região da Floresta Ombrófila Densa apresenta áreas de subsere, devido ao avanço dos antropismos sobre esta formação. KLEIN (1979) denomina como vegetação secundária, as associações vegetais que surgem espontaneamente, após a completa derrubada da floresta ou aquelas densas aglomerações de ervas e arbustos que invadem os terrenos de cultivo abandonados.

IBGE (1992) reconhece cinco fases de sucessão natural secundária: a primeira, é caracterizada por plantas herbáceas pioneiras; a segunda fase é dominada por vegetais gramíneo-lenhosos de baixo porte, sendo denominados popularmente como capoeirinhas; a terceira fase, pouco expressiva, apresenta-se como uma transição entre

uma fisionomia herbácea dominante e outra de características lenhosas; a quarta fase é a capoeira propriamente dita, onde a cobertura lenhosa é dominante; a quinta fase é dominado por estratos arbóreos, porém sem plantas emergentes, sendo popularmente reconhecido como capoeirão, sendo de difícil discriminação com a floresta primária, quando observado através de sensores remotos em escalas regionais.

Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas.

A Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas ocupa a planície e terraços de sedimentos arenosos. Trata-se de formação florestal em solos geralmente mal drenados, situados desde o nível do mar até poucos metros de altitude (de 5 a 30 metros), nas latitudes compreendidas entre 24° e 32° S. Os solos, na maior parte são de origem fluviomarinha (KLEIN, 1990).

Esta floresta é, em geral, pouco exuberante e apresenta porte médio (15 - 20 m), estrutura e fisionomia uniformes, repetindo quase sempre o mesmo padrão florístico e estrutural, monotonamente por toda sua extensão. As nuances locais devem-se, quase sempre, à variações do nível do lençol freático (LEITE, 1994).

A vegetação é tipicamente tropical, possuindo muitas espécies de rápido crescimento. São comuns os gêneros: *Ficus*, *Alchornea*, *Callophyllum* e *Tabebuia*. Essas florestas apresentam variações em sua composição e estrutura, essencialmente por fatores pedogenéticos. Os estratos superiores são ocupados por elementos dominantes que podem atingir de 12 a 15 m de altura. Destacam-se: *Tapirira guianensis* (cupiúva), *Alchornea triplinervia* (tapiá), *Ocotea* spp. (canelas), *Nectandra* spp. (canelas), *Ficus* spp. (figueiras) e *Myrcia glabra* (guamirim) (KLEIN, 1984; RODERJAN & KUNIYOSHI, 1988).

Neste tipo de formação é comum a presença de epífitas e lianas, principalmente representantes das Bromeliaceae, Orchidaceae e Araceae. Outro componente característico desta fisionomia é a presença de Arecaceae, como: *Syagrus romanzoffiana* (jerivá), *Bactris* sp. (tucum), *Attalea dubia* (indaiá), e *Euterpe edulis* (palmito-juçara).

Segundo KLEIN (1990), a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixa ocorrem no litoral paranaense em duas situações distintas: a) em solos hidromórficos muito úmidos e de drenagem difícil, b) em solos não hidromórficos, arenosos, úmidos de boa drenagem.

2.3 MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo o Dicionário Aurélio, vegetação é o conjunto de plantas que cobre uma região. Pode ser definida também, como o mosaico de comunidades de plantas em uma paisagem (NOVA FRONTEIRA, 1996). Para HERTEL (1969), vegetação é o conjunto de espécies que associadas ocorrem em certos e determinados ambientes (floresta, campo, etc.). Vegetação sempre pressupõe conjunto de espécies que sob condições idênticas terão composição semelhante. ACIESP (1987) define vegetação como o conjunto de plantas que são dependentes de seu ambiente e se influenciam, inclusive modificando o seu próprio ambiente.

HERTEL (1969) e KLEIN (1979), alertam sobre a importância de não confundir o termo vegetação com flora. Esta, relaciona-se com o coletivo das espécies vegetais de uma dada região, compreendendo na sua enumeração e descrição, não preocupando-se com a fisionomia.

Estas definições implicam que a vegetação consiste em várias unidades mais ou menos distintas “mapeavelmente”. Deste modo, em um mapa de vegetação é possível examinar a representação gráfica da vegetação de uma determinada área.

Os mapas de vegetação não possuem um marco histórico, como a invenção da lâmpada elétrica ou do avião, mas são fruto da evolução lenta e gradual do conhecimento humano, que, a partir de acontecimentos pontuais e historicamente distantes, como o surgimento das primeiras câmaras fotográficas e a sua utilização em balões com finalidade topográfica e bélica, tiveram um grande impulso após a segunda metade do século XX.

Pode-se dizer que somente quando os mapas tiveram um uso mais generalizado, durante os séculos XV e XVI, é que a vegetação foi freqüentemente representada neles. Inicialmente, o propósito dos mapas eram geográficos, isto é, apresentavam a localização de áreas, distritos administrativos, rios, montanhas, etc. A informação sobre vegetação era incidental (KÜCHLER, 1967).

A cartografia desenvolveu-se especialmente na forma de detalhamento de feições topográficas de grande acurácia e confiabilidade, incluindo também a vegetação. O primeiro sucesso real no sentido moderno de mapa topográfico é o famoso mapa da França na escala de 1:80.000, elaborado por CASSINI no final do século XVIII. Nestas

cartas, podem ser distinguidas facilmente as florestas de folhosas decíduas e de coníferas aciculadas sempre verdes e, em algumas cartas bem detalhadas, a precisão chega em nível de espécies arbóreas (KÜCHLER, 1967).

Distingue-se, praticamente, dois grandes períodos do sensoriamento remoto e, conseqüentemente, do mapeamento temático de vegetação. No primeiro, anterior a 1960, somente a fotografia era utilizada para fins de sensoriamento remoto. O período posterior é marcado pela corrida espacial promovida entre as grandes potências da época, o que acelerou o passo rumo ao desenvolvimento de tecnologias de sistemas sensores e a quantidade e qualidade de dados digitais obtidos por sensoriamento remoto aumentou.

No Brasil, o sensoriamento remoto é caracterizado por duas fases. A primeira pouco significativa, refere-se ao período anterior a 1967, quando os principais trabalhos eram desenvolvidos no campo da geofísica, topografia e prospecção mineral, utilizando-se de equipamento aerofotográfico (BARBOSA, 1998). MAACK (1981) comenta que os primeiros aerolevantamentos tiveram início durante a II Guerra Mundial, ainda efetuados com pilotos americanos, e continuaram em 1952 por meio da secção de aerofotogrametria da Cruzeiro do Sul.

A segunda fase iniciou-se a partir de 1967, por iniciativas da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE), atual Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que dentre de várias importantes atividades, destaca-se a participação, em 1970, no Projeto RADAM (Radar da Amazônia), cujo objetivo foi o de levantar recursos naturais em toda a Amazônia Legal. Em 1975, o projeto foi estendido para todo o território nacional sob o nome Projeto RADAMBRASIL. Outras importantes contribuições desta fase foram as atividades em conjunto com outros centros de pesquisa internacionais como a NASA, participação no desenvolvimento do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) e o desenvolvimento de um software de processamento digital de imagens e sistema geográfico de informação, o SPRING (BARBOSA, 1998).

No Paraná, o marco do mapeamento de vegetação foi a 1ª cobertura aerofotogramétrica do Estado na escala 1:25.000, realizado em 1953, pelo Serviço Aerofotogramétrico Cruzeiro do Sul, que resultou em mapas confiáveis do Estado, na escala de 1:60.000 (ANDRADE & MACHADO, 1996).

Em 1964, esta mesma empresa realizou um segundo aerolevantamento para o

mapeamento estadual, cujas fotografias subsidiaram o inventário do pinheiro-do-Paraná, realizado pela equipe da Escola de Florestas da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em 1966. Este trabalho indicou o total de 32% de cobertura florestal nativa no Estado.

ANDRADE & MACHADO (1996) citam que durante a década de 70, a Escola de Florestas da UFPR realizou um levantamento florestal do Parque Nacional do Iguaçu. Entre 1973 e 1974, foram interpretados os primeiros conjuntos de imagens de satélite ERTS, com fins de mapeamento da cobertura florestal do Estado do Paraná, onde constatou-se a redução da cobertura florestal original do Estado para apenas 11,8%.

2.3.1 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto pode ser definido como a técnica de obtenção de dados sobre determinado objeto ou fenômeno, sem estar em contato direto com o mesmo. Especificamente para os estudos da terra (*latu sensu*), o sensoriamento remoto é a utilização de aparelhos sensores em aeronaves ou satélites artificiais com o intuito de observar e coletar dados de objetos ou fenômenos da superfície da terra (American Society of Photogrammetry, 1983¹ *apud* HOWARD, 1991; NOVO, 1992).

A tecnologia de sensoriamento remoto traz algumas possibilidades vantajosas na pesquisa e no monitoramento ambiental, como observação de grandes áreas, estudos de locais de difícil acesso e principalmente em pesquisas de aspectos dinâmicos como uso do solo ou cobertura vegetal, onde é possível obter informações multitemporais a um custo relativamente baixo e com rapidez (HOWARD, 1991; RICHARDS, 1993; WATRIN, 1994; RCSSMRS, 1995).

A principal vantagem do sensoriamento remoto provenientes de satélites artificiais² como o LANDSAT TM e o SPOT sobre os métodos tradicionais, é a possibilidade da rápida aquisição de informações em meio digital e o seu posterior processamento computadorizado (RCSSMRS, 1995).

¹ AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY (1983) **The Manual of Remote Sensing** Washington: ASP. (Ed. R.N.COLWELL).

² Sensores espectrais em geral, inclusive os aerotransportados.

A tecnologia da aplicação de sensores orbitais tem sido utilizada para um grande número de finalidades, como monitoramento de queimadas e desmatamentos, controle de poluição, planejamento do uso da terra, mapeamento de vegetação, monitoramento de safras agrícolas, planejamento urbano, dentre outras aplicações. O sensoriamento remoto constitui-se em uma das mais importantes fontes de dados georeferenciados, isto é, dados ou variáveis que são definidos em função de sua localização geográfica.

As informações georeferenciadas revelam-se fundamentais nos processos de tomada de decisão, principalmente quando armazenadas em ambientes apropriados, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG)³. VALENZUELA (1990) define SIG como um conjunto de ferramentas destinadas à aquisição, armazenamento, manipulação e apresentação de informações “especializadas”. O sensoriamento remoto em conjunto ou não com o SIG constitui base para metodologias como a Avaliação Ecológica Rápida (AER)⁴, que vem sendo utilizada para diagnósticos ambientais, planos para conservação e identificação de sítios para conservação (MUCHONEY; GROSSMAN & SOLOMON, 1991).

Com os avanços tecnológicos e o lançamento de novos satélites, com sensores mais modernos, já em 1999, como CBERS (cooperação Brasil – China), LANDSAT-7 e o IKONOS estão permitindo sua aplicação em estudos geoambientais, incluindo áreas urbanas antes não contempladas devido à restrição de resolução espacial e radiométrica dos antigos sensores.

Sistema Landsat

De acordo com NOVO (1992), o sistema LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*) compõe-se, até o momento, de uma série de cinco satélites lançados a intervalos médios de 3 a 4 anos. A série iniciou-se em 1972 com o lançamento do satélite ERTS-1, porém, com o fracasso do lançamento do LANDSAT-6 em 1993, atualmente, o único satélite da série ainda em funcionamento é o LANDSAT-5, operacional desde

³ Equivalente ao termo inglês, *Geographic Information System* (GIS).

⁴ Equivalente ao termo inglês, *Rapid Ecological Assessment* (REA).

1984, muito além do seu tempo previsto de vida útil e com problemas na qualidade das imagens geradas, que estão cada vez mais degradadas (NMA, 1997). O principal objetivo do LANDSAT-5 é o mapeamento multiespectral em alta resolução da superfície da Terra.

O satélite LANDSAT-5 executa uma órbita polar heliossíncrona e está posicionado a uma altura de 705 km, em relação à superfície terrestre e seus sensores varrem uma faixa de 185 km, sendo esta recoberta a cada dezesseis (16) dias (NOVO, 1992; INPE, 1997a; NMA, 1997).

Os dois principais instrumentos imageadores deste satélite são: *Multispectral Scanner* (MSS) e *Thematic Mapper* (TM) (NMA, 1997). Segundo NOVO (1992), o sensor TM proporciona uma melhor discriminação espectral entre objetos da superfície terrestre. Este sensor possui 7 bandas, cada uma representando uma faixa do espectro eletromagnético. As bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 possuem 30 m de resolução geométrica, isto é, cada pixel da imagem representa uma área de 0,09 ha de terreno, enquanto a banda 6, possui resolução de 120 m, cada pixel representa 1,4 ha (INPE, 1997a; NMA, 1997).

Uma imagem inteira do sensor TM do satélite LANDSAT-5 representa no solo uma área de abrangência de 185 x 185 km. Para o quadrante - um quarto da imagem - a abrangência é de 92 x 92 km. A antena do INPE, em Cuiabá, recebe de forma contínua imagens de todo o território nacional, desde os anos setenta, constituindo-se em um enorme e único acervo de dados sobre o país.

O mapeamento temático a partir de cada uma dessas bandas depende ainda das características da área em estudo (região plana ou acidentada); época do ano (inverno ou verão); ou de variações regionais (Nordeste, Sudeste, Sul, Amazônia, Pantanal). Os trabalhos de interpretação das imagens tornam-se mais fáceis quando o fotointérprete tem conhecimento de campo (INPE, 1997a).

Dentre as principais aplicações deste sensor estão: acompanhamento do uso agrícola das terras; apoio ao monitoramento de áreas de preservação; cartografia e atualização de mapas; detecção de invasões em áreas indígenas; monitoramento da cobertura vegetal, de queimadas, desmatamentos; atividades energético-mineradoras; sedimentos em suspensão nos rios e estuários; dinâmica de urbanização; estimativas de fitomassa; secas e inundações (NMA, 1997). Este sensor tem sido utilizado no Brasil para estudar a

regeneração em áreas queimadas (SADER; STONE & JOYCE, 1990). O INPE freqüentemente usa imagens obtidas pelo sensor TM para monitorar desmatamentos e também criar um fotomosaico da porção brasileira da bacia amazônica. As aplicações mais comuns, para cada banda, podem ser encontradas na Tabela 01.

Tabela 01 - Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT-5

| | Banda | Intervalo espectral (μm) | Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT-5 |
|------------------------|-------|---------------------------------------|---|
| Espectro Visível | 1 | (0,45 - 0,52) | Apresenta-se com grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera. |
| | 2 | (0,52 - 0,60) | Apresenta-se com grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água. |
| | 3 | (0,63 - 0,69) | A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da venação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da floresta de galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas. |
| Espectro infravermelho | 4 | (0,76 - 0,90) | Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas. |
| | 5 | (1,55 - 1,75) | Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite. |
| | 6 | (10,4 - 12,5) | Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água. |
| | 7 | (2,08 - 2,35) | Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal. |

Fonte: INPE (1997a) com modificações.

O satélite LANDSAT-7 foi lançado em abril de 1999, sendo a continuação do programa LANDSAT financiado pelo governo dos EUA. Este novo satélite entrou em órbita com um sensor diferente do seu antecessor, denominado *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e apresenta outras novidades, como: a adição de uma banda pancromática com resolução espacial de 15m; banda de infra-vermelho termal com alto e baixo ganho e resolução de 60m; melhoramento no sistema de calibração do satélite e na geometria de imageamento, possibilitando uma precisão em imagens corrigidas apenas a partir de dados de efemérides de satélite e GPS, muito próxima da precisão obtida com imagens georreferenciadas com pontos de controle cartográficos.

2.3.2 Características Espectrais da Vegetação

A grande maioria dos sensores remotos são sistemas passivos, isto é, detectam os comprimentos de ondas refletidos por objetos (ou alvos) que foram gerados pela energia eletromagnética do sol ou, em alguns casos, captam as emissões de energia termal (HOWARD, 1991). BIRD (1990) observa que os objetos são identificados de acordo com a extensão que refletem a radiação incidente ou emitem a sua própria radiação. Sensores detectam a radiância de um objeto e esta pode estar relacionada, tanto com reflectância, como por emissividade.

Em média, menos de 10% do total de radiação solar incidente sobre a terra é refletida diretamente sobre um sensor remoto e possivelmente cerca de 10% do total de energia captada por um sensor é refletida por florestas fechadas (HOWARD, 1991).

São vários os fatores que influenciam a reflectância espectral sobre uma dada superfície vegetada, dentre eles destacam-se: morfologia, fisiologia da planta, tipo de solo, ângulo solar e condições climáticas (BARRET & CURTIS, 1992; MCCLOY⁵, 1995 *apud* ANTUNES, 1996).

As células das folhas das plantas são dispersoras muito eficientes da luz, devido ao alto contraste no índice de refração entre as células ricas em água e o ar do espaço intercelular (RAY, 1994).

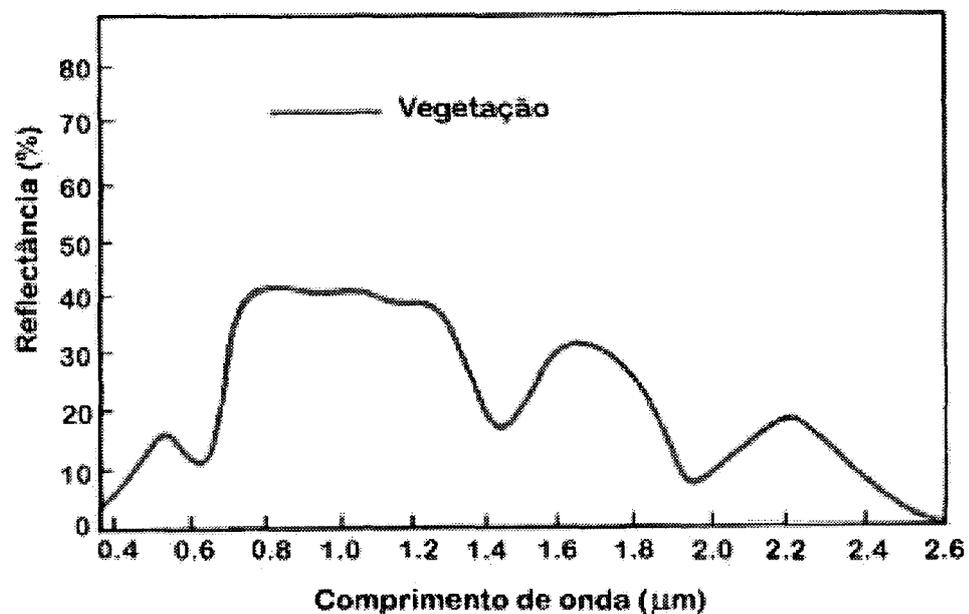
A vegetação é muito escura no espectro visível (0,4 a 0,75 μm), devido à alta absorção

⁵ MACCLOY, K. (1995) **Resource management information system: process and practice**. United Kingdom: Taylor & Francis

desta faixa de comprimento de onda pelos pigmentos da folha (clorofila, xantofila, carotenos, etc.). Há pequeno aumento na reflexividade por volta dos 0,55 μm (cor verde), uma vez que os pigmentos praticamente não absorvem esta cor. A amplitude espectral de 0,75 a 1,35 μm (infravermelho próximo) é caracterizada por uma alta reflexão e uma baixa absorção, causada pela estrutura celular da planta. A faixa de 1,35 a 2,5 μm (infravermelho médio) é mais clara que a porção visível do espectro, porém mais escura que o infravermelho próximo. Esta característica deve-se à absorção provocada pelas concentrações de água na folha, pela celulose, lignina e outros componentes da célula vegetal (NOVO, 1992; RICHARDS, 1993; RAY, 1994).

O comportamento espectral de uma folha isolada em ensaios laboratoriais (Figura 01) pode não ser exatamente o mesmo daquele observado pelas comunidades vegetais em campo. Em condições naturais, a resposta espectral da cobertura vegetal corresponde a uma soma de fatores, como o solo, estágio sucessional, umidade, quantidade de biomassa, aspectos fisiológicos-nutricionais, fitopatológicos, relações fitossociológicas, dentre outros, o que nem sempre podem ser simulados em laboratório. Além destes, outros fatores também podem influenciar a reflectância da vegetação, como densidade de folhas, forma, pilosidade, cera, dentre outros (BELWARD, 1990).

Figura 01 - Curva de reflectância espectral da vegetação



Fonte: BELWARD (1990).

2.3.3 Aplicabilidade do Sensoriamento Remoto na Área Florestal

Historicamente, a Engenharia Florestal esteve concentrada principalmente na avaliação dos recursos florestais, em seu manejo, utilização e produção de madeiras para fins industriais. Nessa mentalidade, a madeira era encarada apenas como matéria-prima ou como fonte de energia (HOWARD, 1991). Atualmente, a globalização dos problemas ambientais tem modificado esta visão, o que permitiu o emprego de novas tecnologias no monitoramento de áreas florestais e também no levantamento destes recursos.

Até alguns anos atrás, a principal fonte de dados para mapeamentos florestais no Brasil era a fotografia aérea. O projeto RADAMBRASIL pode ser considerado um marco na utilização de outros sensores com esta finalidade, subsidiando trabalhos de caracterização fitoecológica da vegetação brasileira.

O projeto RADAMBRASIL, durante um esforço de 15 anos, a partir de 1970, mapeou grande parte do território brasileiro, principalmente a região amazônica que nessa ocasião era deficiente em informações mapeáveis. O levantamento de recursos naturais foi realizado por equipes multidisciplinares que analisaram as imagens de radar obtidas pelo projeto. Um dos principais produtos obtidos foi o mapa temático sobre a vegetação brasileira na escala 1:1.000.000.

Grande parte do conhecimento temático do território brasileiro é fruto da interpretação dos dados deste radar. Outra contribuição muito importante deste projeto foi o desenvolvimento de um sistema de classificação fisionômica-ecológica da vegetação brasileira por VELOSO & GÓES-FILHO (1982), que atualmente é adotado como padrão oficial para os levantamentos de vegetação realizados no Brasil.

Segundo SANTOS *et al.* (1981), o inventário florestal também se beneficia do uso do sensoriamento remoto, tanto para a identificação de espécies de importância comercial, como para estimativa de volume. Atualmente, além das fotografias aéreas, são utilizados sensores espectrais aerotransportados e orbitais para esta finalidade.

No manejo florestal as técnicas de sensoriamento remoto apresentam diversas aplicações, destacando-se o controle de desbastes, prevenção e monitoramento de incêndios e controle de pragas (SANTOS *et al.*, 1981). Além disso, permitem a obtenção de informações sobre a distribuição da vegetação, registrando ainda as transformações ecológicas na vegetação, resultantes de práticas de uso da terra e efeitos climáticos

sazonais (EDWARDS, 1972⁶ *apud* PINTO *et al.*, 1979).

A classificação de vegetação e o monitoramento de eventos dinâmicos são facilitados pela utilização de imagens multiespectrais, principalmente se registradas em diferentes épocas. Se as datas são bem selecionadas, a diferença fenológica entre as várias classes de floresta pode aumentar a precisão do delineamento destas e otimizar significativamente sua identificação (KALENSKY, 1976).

Apesar da grande variedade de florestas tropicais, muitos trabalhos de sensoriamento remoto limitam-se apenas à discriminação entre áreas florestadas e desflorestadas, com pouca discriminação entre classes de florestas. O emprego desta tecnologia para o mapeamento de ecossistemas em grandes áreas é de grande ajuda para o planejamento, conservação e uso racional de recursos das florestas tropicais (FOODY & HILL, 1996).

Os avanços tecnológicos no processamento digital de imagens ocorridos nesta década, provocaram uma sensível melhora na qualidade dos resultados de trabalhos com sensoriamento remoto. Anteriormente, apenas a interpretação visual fornecia subsídios para análise de cobertura vegetal. Atualmente, somado a este método tradicional, tem-se as metodologias de manipulação digital das imagens e a análise assistida por computador, o que contribui para resultados mais rápidos e precisos.

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

A partir de alvos (ou cenas) e sistemas sensores apropriados, obtém-se a imagem ou dado digital. Esse processo de digitalização corresponde à uma discretização da cena em observação, pela superposição de uma malha hipotética e uma atribuição de valores inteiros (os níveis de cinza), a cada ponto desta malha (processo chamado de quantização). O sistema sensor capta a energia radiante que chega a esse sistema e o converte num sinal elétrico que é transformado de analógico para digital. Essa imagem ou dado digital é transmitido codificado para um dispositivo de recepção e armazenado na forma de imagens ou gráficos.

As imagens são representações bidimensionais de objetos do mesmo modo que uma

⁶ EDWARDS, D. **Remote sensing in the evaluation of natural vegetation resources of South Africa.** In Symposium on Remote Sensing, Pretoria, 1972. Proceedings. p. 99-102.

fotografia usual. Também, como na fotografia, as imagens são compostas de unidades discretas, pequenas e indivisíveis denominadas *pixels*, que representam áreas relativamente pequenas dentro de uma cena e assumem diferentes níveis de cinza (SCHOWENGERDT, 1983). O termo pixel é uma redução da expressão inglesa *picture element* e representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície da terra (CROSTA, 1993). No caso das bandas TM do satélite LANDSAT-5, cada pixel corresponde a 900 m² do terreno (exceto a banda termal).

O processamento de imagens digitais pode ser entendido como o conjunto de procedimentos relativos à manipulação e análise de imagens através do computador. Este processo compreende, a entrada de dados digitais, o realce (ou manipulação do contraste), a análise estatística e a geração de saídas de imagens que podem ser em tons de cinza ou coloridas.

Para SCHOWENGERDT (1983), o processamento digital de imagens é a manipulação numérica de imagens digitais e incluem técnicas de pré-processamento, realce e classificação. Para CRACKNELL & HAYES (1991), o processamento digital de imagens tem como objetivo extrair informações, enfatizar certos aspectos de informação contidos na imagem e realizar análises estatísticas para extrair informações não visuais (*non-image information*). CROSTA (1993) destaca que a função primordial do processamento digital de imagens é facilitar a identificação e extração de informação contidas nas imagens para posterior classificação. Para QUINTANILHA (1990), o principal uso das técnicas de processamento de imagens digitais é melhorar o aspecto dessas imagens para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos.

2.4.1 Composição colorida

A grande maioria dos *softwares* de processamento digital de imagens trabalha com composições coloridas de 24-bits. Devido ao fato de que a totalidade dos sistemas de PDI adotam o RGB (*Red, Green e Blue*) para a composição de cores, quando da visualização das imagens no monitor. O sensor TM do LANDSAT-5 possui uma resolução radiométrica de 8-bits, o que confere a cada banda 256 níveis de cinza. Deste modo ao se utilizar um *triplet* de bandas, uma em cada canal RGB, resultará em uma

composição colorida de 24-bits.

A composição colorida é a forma mais utilizada para se combinar 3 bandas e é o tipo de imagem de satélite que o leigo normalmente conhece. É utilizada para diversas finalidades, dentre as quais destaca-se a interpretação visual da cena.

As bandas de sensores multiespectrais apresentam uma correlação muito grande de informações, o que nem sempre é interessante para uma análise visual ou digital. A utilização de composições coloridas de bandas muito correlacionadas, provoca uma sobreposição de informação, resultando imagens com pouca informação a ser revelada.

Considerando-se as seis bandas (excluindo-se o canal termal) do LANDSAT TM, é possível formar 20 combinações de bandas. Com a utilização do OIF, pode-se selecionar aquelas com um índice mais favorável. O uso de composições de melhor resultado OIF é uma alternativa adicional ao uso de composições coloridas tradicionais, como no caso da 5-4-3 (utilizada para discriminação de vegetação).

2.4.2 Realce de imagens

Eventualmente, a imagem original mostrada na tela não possui contraste suficiente para a identificação dos elementos imageados, exigindo a aplicação de métodos de realce. Isto se deve à má iluminação solar da cena, problemas atmosféricos, deficiência do sensor e, principalmente, às características radiométricas do sensor (CROSTA, 1993).

Devido à resolução radiométrica do sensor LANDSAT TM ser de 8-bits, uma imagem teria um bom contraste se os valores de brilho se distribuíssem ao longo de 256 níveis de cinza, porém, o que ocorre é uma concentração em uma pequena faixa. O principal motivo disso é que os sistemas sensores são concebidos para registrar toda gama possível de valores de reflectância, de diferentes origens e sob diversas condições de iluminação, para que os objetos cinza escuros não apareçam totalmente pretos e os claros não desapareçam, devido à saturação do sensor (CROSTA, 1993).

Para JENSEN (1986), o principal objetivo dos algoritmos de realce é melhorar a aparência da imagem para análise visual humana ou para análise assistida por computador. Os principais tipos de realce são os relacionados ao aumento de contraste, filtros, análise por componentes principais e índice vegetativos.

Aumento de contraste

O aumento de contraste se caracteriza pela modificação dos níveis de cinza na imagem, melhorando a qualidade visual das informações, em uma operação que consiste em expandir os valores de brilho de entrada, utilizando toda amplitude disponível no dispositivo de saída, no caso, 256 níveis de cinza.

As formas mais comuns de contrastes são:

- a) Contraste Linear (p.ex. Mínimo-máximo, Contraste percentual e *Piecewise*)
- b) Contraste não linear (p.ex. Equalização do histograma)

2.4.3 Análise por Componentes Principais

Um dos grandes problemas na interpretação e classificação visual e digital de imagens produzidas por sensores remotos é a alta correlação (similaridade visual e numérica) entre bandas multiespectrais que compõem o conjunto de imagens de um mesmo objeto (SHOWENGERDT, 1983; FUNG & LEDREW, 1987; VETTORAZZI, 1992; CROSTA, 1993).

De acordo com FUNG & LEDREW (1987), ao se tomar as bandas LANDSAT-5 TM (*Thematic Mapper*) como exemplo, nota-se que as bandas 1, 2 e 3 possuem uma alta correlação, devido à baixa reflectância da vegetação, enquanto que as bandas 4, 5 e 7 também possuem uma alta correlação, mas devido à alta reflectância da vegetação. Para minimizar os efeitos indesejáveis da correlação, pode-se aplicar a análise por componentes principais (PCA - *principal components analysis*).

A análise por componentes principais (PCA), também chamada de Transformação por Componentes Principais ou Análise de Karhunen-Loeve, possui uma significativa utilidade na análise e manipulação dos dados digitais obtidos por sensoriamento remoto (JENSEN, 1986). Ao mesmo tempo, esta transformação é uma das técnicas menos compreendida e, conseqüentemente, pouco utilizada no processamento digital de imagens (CROSTA, 1993).

A principal função da aplicação da análise por componentes principais em sensoriamento remoto é determinar a extensão da correlação existente entre bandas multiespectrais e, através de uma transformação matemática apropriada, removê-la, reduzindo o grau de redundância entre os dados (FUNG & LEDREW, 1987; CROSTA,

1993). Além disso, relações entre diferentes grupos de pixels, representando diferentes tipos de cobertura da terra, podem tornar-se mais claros se estes forem vistos através de componentes principais do que pelas bandas espectrais originais (PAUL, 1994).

Dentre os objetivos da análise por componentes principais constam os seguintes (BALLESTER,1995):

- a) redução da dimensionalidade dos dados;
- b) determinação de combinações lineares de variáveis;
- c) seleção de características: a escolha das variáveis mais úteis;
- d) visualização de dados multidimensionais;
- e) identificação de variáveis significativas;
- f) identificação de grupo de objetos.

A compressão de dados pode ser uma propriedade muito útil, se existe mais de três bandas espectrais. Um conjunto de N imagens de entrada, quando processadas pela PCA, vai produzir um outro conjunto de N imagens de saída, sem correlação (CROSTA, 1993). Melhores resultados são obtidos quando os dados originais estão altamente correlacionados (MANLY,1994).

Segundo SHOWENGERDT (1983), as principais fontes de correlação são:

- a) sombreamento topográfico e relevo;
- b) correlação espectral natural;
- c) sobreposição da sensibilidade espectral.

Para CHAVEZ JUNIOR (1989), a PCA constitui-se de transformações matemáticas que irão gerar novas imagens chamadas de componentes ou eixos, que são combinações lineares das imagens originais. Esta análise gera um novo grupo de eixos rotativos ortogonais entre si, sendo que as novas imagens não terão correlação alguma.

De acordo com CROSTA (1993), a PCA trabalha da seguinte forma:

- N imagens brutas (sem qualquer outro tipo de processamento) de entrada com correlação produzem N novas imagens sem correlação entre si;
- o primeiro componente principal (PC1) irá conter a informação que é comum à todas as N bandas originais; o 2º PC irá conter a feição espectral mais significativa e assim sucessivamente. Os PCs de ordem mais alta irão conter feições espectrais cada vez menos significantes, até o último PC, que concentrará então a informação que sobrar;
- 1º PC irá sempre conter o albedo mais sombreamento topográfico de uma cena de satélite (semelhante à uma vista “pancromática” da cena). Todos os demais

PCs são completamente desprovidos de informação topográfica, devido à ausência de sombreamento;

- o ruído irá sempre ser extraído do conjunto de bandas multiespectrais pela PCA e concentrado nos últimos PCs.

Segundo CHAVEZ JUNIOR (1989), a variância total é apresentada no primeiro componente, diminuindo gradativamente nas demais, sendo a soma das variâncias de todos os componentes igual ao total das variâncias das bandas originais. Usualmente, o 1º PC contém algo em torno de 90% da variância total do conjunto, enquanto o 2º PC responde por cerca de 5% do total.

O objetivo da PCA é conseguir um novo conjunto de imagens, cuja matriz de covariância seja diagonal, isto é, todos os elementos não são iguais a zero, pela criação de um novo sistema de referência. A matriz de correlação pode ser utilizada para atribuir peso igual a todas as bandas (CARRILHO, 1996⁷ *apud* SIRTOLI, 1998). A transformação preserva o valor total da variância, a soma dos elementos da diagonal da matriz de covariância é igual à soma de autovalores em dados de variância. As variâncias associadas a cada um dos componentes principais são denominadas de autovalores, raízes características, raízes latentes ou valores próprios (AFIFI & CLARK, 1990).

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

2.4.4 Índices de vegetação

Operações matemáticas como adição, multiplicação, subtração e divisão são usadas no processamento digital de imagens de sensoriamento remoto para análise de dados multiespectrais. Estas operações são feitas pixel a pixel, com os seus respectivos valores de brilho, com o objetivo de formar uma nova imagem. Os índices vegetativos são considerados como as mais importantes aplicações das operações aritméticas em

⁷ CARRILHO, J.M.Z F. **Detecção de mudanças do terreno em uma região do cerrado**. São José dos Campos, 1996. Dissertação, Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

imagens, por auxiliarem no realce de variáveis, principalmente de vegetação (CROSTA, 1993; RICHARDS, 1993).

Um índice de vegetação é um resultado numérico que é gerado por algumas combinações algébricas de bandas espectrais de sensoriamento remoto e que podem trazer informações úteis sobre vegetação em uma imagem. Entretanto, estes índices de vegetação estão geralmente baseados em evidências empíricas, ao invés de biologia, química ou física (RAY, 1994). No entanto, algumas pesquisas na área de fisiologia vegetal tentam percorrer o caminho inverso (BLACKBURN, 1996).

Os índices de vegetação têm sido utilizados com o objetivo de reduzir o número de bandas a um único valor digital por pixel que avalie características como biomassa, produtividade, índice foliar e percentual de cobertura florestal de vegetação no solo (JENSEN, 1986).

Para se obter um índice de vegetação, a escolha das bandas deve ser criteriosa. BOYD & RIPPLE (1997) afirmam que os índices de vegetação que combinem bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, são mais eficientes em trabalhos relacionados com cobertura vegetal.

Os índices de vegetação mais empregados são RVI (razão entre o infravermelho-próximo com o vermelho e o NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada). O RVI tem sido muito utilizado em trabalhos cartográficos e no controle da vegetação, enquanto o NDVI é utilizado principalmente na análise de mudanças globais de vegetação (CHUVIECO, 1990).

2.4.5 Tasseled Cap

Um dos mais importantes índices de vegetação é o *tasseled cap*, desenvolvido por KAUTH & THOMAS (1976)⁸, citado por JENSEN (1986) e por CHUVIECO (1990), para a análise do desenvolvimento agrícola e previsão de safras. Originalmente concebido para o LANDSAT MSS, produz uma transformação ortogonal do espaço de dados, para as quatro bandas originais deste sensor, em um novo espaço de quatro dimensões. Estes

⁸ KAUTH, R.J. & THOMAS, G.S. The tasseled Cap – a graphic description of the spectral-temporal development to agricultural crops as seen by Landsat. **Proceedings of the Simposium in Machine Processing of Remotely Sensed Data**. Purdue University, West Lafayette, Indiana. 1976. pp 4b41-4b51.

novos canais são denominados: *brightness*, *greenness*, *yellow-stuff* e *non-such*.

O propósito destas transformações é obter um indicador para a vegetação independente dos efeitos de fundo do solo e poder ser usado para o monitoramento da produção de biomassa na agricultura (THOMPSON & WEHMANEN, 1979). Pode-se obter bons resultados com a aplicação da técnica para estudos de vegetação, uso da terra, geologia e planejamento urbano (CRIST & KAUTH, 1986).

A base fundamental da transformação *tasseled cap* envolve a busca de estruturas de dados inerentes ao sensor e ao conjunto de classes da cena, ajustando sua perspectiva de visão para poderem ser mais facilmente observadas, reduzindo a quantidade dos dados e aumentando da capacidade de interpretação (CRIST & CICONE, 1984; CRIST & KAUTH, 1986).

CRIST & CICONE (*op cit.*) adaptaram a transformação *tasseled cap*, para o conjunto de dados do LANDSAT TM, verificando que as bandas refletidas deste sensor estão dispersas em um espaço tridimensional, definido por dois planos perpendiculares e uma “zona de transição”. Dados de pontos totalmente vegetados compõe o “plano de vegetação,” enquanto pontos de solos expostos definem o “plano de solos”. Entre estes dois, existem pontos parcialmente vegetados, onde o solo e a vegetação são detectados, constituindo uma “zona de transição” (Figura 02).

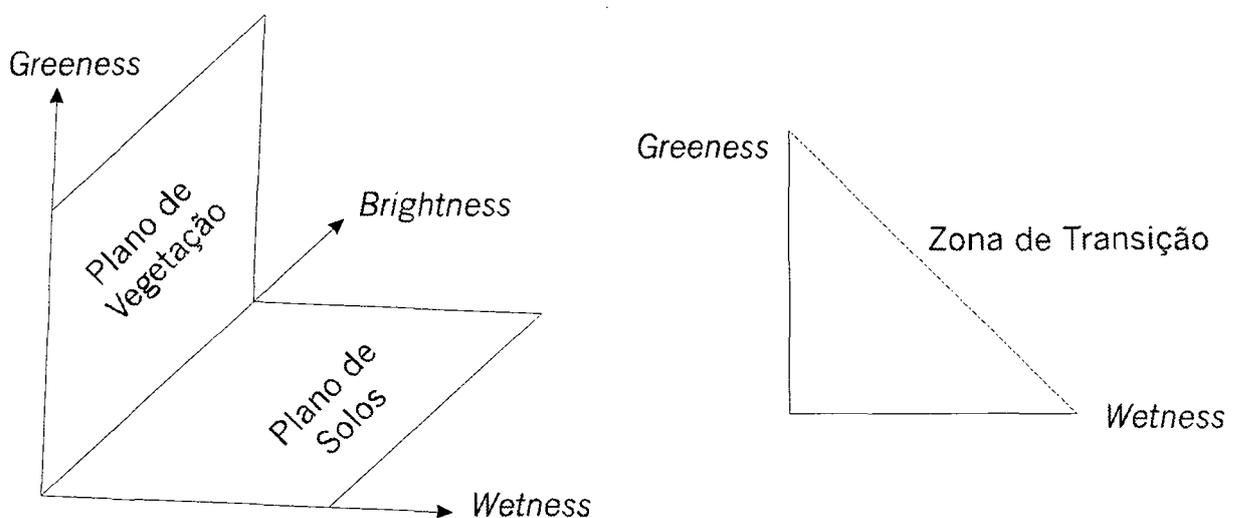
Os softwares de processamento digital de imagens modernos, incorporam ferramentas para a realização da transformação *tasseled cap*, pela utilização de coeficientes propostos por CRIST & CICONE (*op cit.*). Realizada a transformação, são obtidos três novos canais, um, relativo ao brilho (*brightness*), outro, à quantidade de verde (*greenness*) e o último, à umidade (*wetness*). De acordo com CRIST & CICONE (1984) são assim caracterizados:

- *Brightness* – é a soma ponderada das seis bandas reflexivas do Landsat TM e contém respostas relativas às mudanças na refletividade total e aos processos físicos que possam afetá-la. As diferenças nas características dos solos, são claramente expressas no componente brilho, enquanto aumentos na densidade da vegetação irão causar mudanças menos significativas neste canal. Isto é devido a baixa reflectância da vegetação, no espectro visível e à alta resposta no infravermelho próximo;
- *Greenness* – o contraste entre o infravermelho próximo e as bandas do visível, com

- as bandas do infravermelho médio, cancelando uma a outra, é detectado por este canal. Isto ocorre devido à estrutura celular das plantas (em virtude dos pigmentos, particularmente a clorofila), não sendo detectado variações em relação ao solo. Os canais *greenness* e *brightness* compõem o “plano de vegetação”, no espaço da transformação *tasseled cap*;
- *Wetness* – este componente contrasta a reflectância do infravermelho médio com as bandas do visível e do infravermelho próximo, mostrando o grau de sensibilidade à umidade. Isto ocorre porque o infravermelho médio é mais susceptível ao teor de água no solo, portanto as mudanças na quantidade de umidade afetam estas bandas de maneira mais acentuada que na região do visível e do infravermelho médio, destacando características da cena relativas à umidade. Os componentes brilho e umidade definem o “plano de solos” no espaço da transformação *tasseled cap*.

Uma das vantagens desta transformação sobre a análise por componentes principais, diz respeito a facilidade de interpretação dos componentes gerados, devido ao significado mais preciso, independente das condições da cena (CHUVIECO, 1990). Além de distinguir vários planos de variação a partir da combinação dos eixos destas componentes, gerando informações de grande interesse para o estudo de solos e vegetação (CRIST & CICONI, 1984).

Figura 02 – Planos de variação em uma transformação tasseled cap.



Fonte: CRIST & CICONI (1984).

2.5 CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

As imagens digitais são formadas por pixels que apresentam valores de brilho diferentes, variando conforme a resposta espectral dos alvos. Partindo-se do princípio que os alvos apresentam comportamento espectral fixo (ou um valor médio padrão), a classificação digital pode ser entendida como o processo de enquadrar pixels de uma imagem de multiespectral em categorias ou classes, aproximando os pixels semelhantes.

Em termos gerais, pode-se classificar uma imagem de duas formas:

- a) sem conhecimento prévio da área abrangida pela imagem, utilizando apenas técnicas de agrupamentos de pixels para definição de classes (classificação não-supervisionada);
- b) classificar a imagem, atribuindo aos grupos de pixels, classes de feições fisionômicas do terreno, baseado nas interpretações e trabalhos do pesquisador, de acordo com a realidade de campo (classificação supervisionada).

Em uma imagem classificada, cada classe é identificada por um valor e uma cor, assim sendo, uma imagem classificada é representada por um mosaico de agrupamentos uniformes. As aplicações da classificação são traduzidas em mapas temáticos de uso do solo, análise de qualidade da água, monitoramento de feições, mapas florestais, mapas geológicos, atualizações de mapas, etc.

2.5.1 Classificação não-supervisionada

A classificação não-supervisionada utiliza algoritmos computacionais que localizam concentrações de características espectrais que possam ocorrer na imagem, para delimitar as amostras de pixels de classes diferentes. Segundo CROSTA (1993), este tipo de classificação está baseado no princípio de que o computador é capaz de identificar classes dentro de um conjunto de dados.

É viável utilizar a classificação não-supervisionada quando:

- pouco se conhece sobre os dados a serem classificados;
- muitas classes são necessárias;
- é difícil encontrar amostras;
- áreas homogêneas são numerosas, pequenas e possuem grande diversidade espectral;

- é necessário ter uma maior precisão na definição de áreas de treinamento da classificação supervisionada.

O princípio para esta forma de classificação é bastante simples, através de abordagens estatísticas, o aplicativo agrupa pixels com valores de brilho semelhantes ou próximos, sem a interferência do pesquisador e sem a preocupação com a realidade do terreno.

O método estatístico ISODATA é uma das técnicas mais utilizadas para o agrupamento de classes. Este algoritmo, a partir de um número inicial de classes e interações fornecido pelo usuário, permite calcular a média das classes distribuídas nos dados espaciais e reordenando-os em *clusters*. A cada interação, os pixels remanescentes são recalculados utilizando-se do algoritmo da mínima distância, reclassificando os pixels de acordo com as novas médias e são interativamente atribuídos ao conjunto mais próximo. Agrupamentos com grandes discrepâncias são fendidos e aqueles com semelhança são fundidos. Este processo continua até que o número de pixels em cada mudança de classe seja menor que o limite de mudança pré-estabelecido ou que o número máximo de interações seja atingido (JENSEN, 1986; RICHARDS, 1993; ENVI, 1998). Definidos os *cluster*, estes podem ser posteriormente associados à informações de classes, como tipos de cobertura de solo.

2.5.2 Classificação supervisionada

É a classificação controlada pelo usuário, o qual seleciona os pixels que representam os padrões previamente conhecidos. Para identificar os padrões, é necessário a coleta de amostras, visando a identificação de pixels de características similares. Neste sentido, CROSTA (1993) afirma que é necessário que o usuário tenha um conhecimento prévio sobre a área a ser classificada antes do processo, para que as áreas de treinamento (amostra de pixels) tenham fundamento.

As áreas de treinamento (*training areas*) são amostras de conjunto de pixels que representam feições, tipologias ou classes, que serão utilizadas para que os algoritmos de classificação possam “treinar a classificação”, isto é, possam testar o melhor agrupamento de classes, de acordo com o algoritmo escolhido (JENSEN, 1986).

A classificação supervisionada é viável quando:

- as amostras são facilmente reconhecidas;
- ocorrem classes relativamente distintas;
- há uma quantidade mínima de pixels de classes diferentes misturados entre si;

- outras fontes de dados são disponíveis, como mapas, fotografias aéreas, etc.;
- as classes desejadas são *a priori* conhecidas;

2.5.3 Algoritmos de Classificação

Os algoritmos de classificação, também conhecidos por regras de decisão, são métodos de comparação de pixels desconhecidos com o conjunto de pixels de treinamento. Os algoritmos mais comuns são: Paralelepípedo, Mínima Distância, Distância de Mahalanobis e Máxima Verossimilhança. O critério de classificação de um pixel é estabelecido pela regra de decisão (algoritmo) aplicada.

Paralelepípedo

Neste classificador, os valores do pixel candidato são comparados a um determinado intervalo. Os limites deste intervalo podem ser: os valores mínimo e máximo dos valores de cada banda; a média de cada banda, mais ou menos o desvio padrão; qualquer limite que o usuário especificar, baseado no conhecimento dos dados e assinatura.

Este método baseia-se na inspeção dos histogramas dos componentes espectrais individuais dos dados de treinamento disponíveis, identificando os limites superior e inferior dos histogramas para descrever a amplitude de brilho dos componentes de cada banda para determinada classe (RICHARDS, 1993). A amplitude de valores de brilho em todas as bandas limitam-se em caixas multidimensionais ou paralelepípedos, daí a origem do nome.

Vantagens do método: classificador simples e de rápidos resultados. Desvantagem: podem ocorrer espaços entre os paralelepípedos nos quais os pixels não serão classificados.

Mínima Distância

O algoritmo calcula a distância espectral entre o vetor de medida para o pixel candidato e a média de cada assinatura. Quando a distância espectral é calculada para os valores possíveis de classes, o pixel candidato é assinalado à classe com a menor distância.

Vantagem do método: não há pixels desclassificados, visto que cada pixel, de

qualquer forma irá pertencer à uma classe ou outra; esta regra de decisão é a mais rápida depois do paralelepípedo. Desvantagens: pixels que não deveriam ser classificados, isto é, aqueles que espectralmente não pertencem à nenhuma amostra nos limites estabelecidos pelo usuário serão classificados; não leva em consideração a variabilidade das classes. Por exemplo, uma área urbana é composta por pixels com alta variância. Esses pixels podem tender a cair em outras classes que tiverem uma média mais próxima de seu valor.

Distância de Mahalanobis

O algoritmo assume que os histogramas de cada banda têm distribuição normal. Porém se esse não for o caso, podemos obter melhores resultados com a Mínima Distância ou Paralelepípedo.

Vantagens: este algoritmo leva a variabilidade das classes em consideração; pode ser mais eficiente que a mínima distância nos casos em que os critérios estatísticos precisam ser levados em consideração, mas em que os dados da Máxima Verossimilhança não são necessários. Desvantagens: é mais lento do que Paralelepípedo e Mínima Distância; esta regra de decisão é muito paramétrica, significando que depende amplamente de uma distribuição normal dos dados em cada banda.

Máxima Verossimilhança

Também conhecido por Máxima Probabilidade, este algoritmo assume que os histogramas das bandas têm distribuição normal. Se esse não for o caso, podemos obter melhores resultados com a Mínima Distância ou com o Paralelepípedo.

A regra é baseada na probabilidade de um pixel pertencer a uma classe particular. A equação básica assume que essas probabilidades são iguais para todas as classes. Se o usuário tiver um conhecimento à priori, de que as probabilidades não são iguais para todas as classes, pode-se especificar fatores de peso para classes particulares. Esta variação é conhecida como Regra de Decisão Bayesiana (Bayesian Decision). Caso não se tenha conhecimento, à priori, das probabilidades, recomenda-se que não sejam especificadas e neste caso, assume-se o valor "default" igual a 1.0 na equação. De acordo com CROSTA (1993), para que a regra de decisão seja precisa, é necessário definir áreas de treinamento bastante representativas.

Vantagens: é um dos classificadores mais precisos (se os dados possuírem distribuição normal) e leva em consideração a variabilidade das classes. Desvantagens: este método é um pouco mais lento que os anteriores. O tempo de processamento aumenta com o número de bandas; é muito paramétrica, significando que depende amplamente da distribuição normal dos dados em cada banda.

2.5.4 Acurácia da Classificação

Toda classificação está sujeita a erros, sendo o que a torna mais ou menos confiável é a quantidade de pontos classificados corretamente. Os erros são provenientes de diversas fontes, como:

- equívocos do fotointérprete;
- dados com alto grau de correlação;
- dificuldades na escolha de amostras homogêneas;
- desconhecimento da realidade de campo;
- defeitos do sensor ou resolução do sensor;
- problemas de método ou de sistema de classificação temática, dentre outras.

Segundo THAPA & BOSSLER (1992)⁹ e GEMAEL (1994)¹⁰, citados por ANTUNES & LIGNAU (1997) os erros podem ser de três tipos:

- Erros grosseiros – ocasionados pela falta de atenção do observador, erros de leitura de valores em equipamentos ou escalas;
- Erros sistemáticos – ocorrem em inventários de campo e fotogrametria, devido às condições do meio, imperfeições nos equipamentos e limitações humanas;
- Erros ao acaso – são de pequena magnitude e caracterizam-se por serem aleatórios ou acidentais e não podem ser vinculadas à alguma causa específica.

Com a finalidade de testar a precisão (acurácia) deste tipo de trabalho, utiliza-se da matriz de erro e de testes estatísticos, dentre os quais destacam-se o índice *Kappa*.

Matriz de Erro

Também é conhecida como matriz de confusão, por identificar não somente o erro

⁹ THAPA, K. & BOSSLER, D.J. Accuracy of spatial data used in geographic information system. **Photogrammetric Engineering and Remote Sense**, 58 (6):835-841. 1992.

¹⁰ GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações – aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994

global da classificação para categoria, mas também as confusões entre as categorias. Este procedimento é essencial para a análise sobre a exatidão dos processos de classificação, uma vez que é possível a identificação, para cada categoria, dos erros de omissão e comissão (BRITES, 1996)

A matriz de erro da classificação contém resultados tabulados da avaliação da acurácia para uma classificação temática. Cada frequência observada na matriz corresponderá, também, a uma frequência esperada, a qual é calculada sob uma determinada hipótese, de acordo com as regras da probabilidade. A frequência observada na diagonal apresenta a concordância entre o esperado e o observado em cada categoria, ou seja, aqueles corretamente classificados (ROSENFELD & FITZPATRICK-LINS, 1986, ANTUNES & LIGNAU, 1997).

Índice Kappa

O índice *Kappa* é um coeficiente de concordância em escalas nominais, que mede o relacionamento entre a concordância, a casualidade e a discordância esperada (COHEN, 1960¹¹ *apud* ROSENFELD & FITZPATRICK-LINS, 1986). A estimativa de *Kappa* (\hat{K}) é a proporção de concordância, depois que a concordância atribuída à casualidade é retirada. O índice *Kappa* leva em consideração todos os elementos da matriz ao invés de apenas aqueles que se situam na diagonal principal da mesma, ou seja, estima a soma da coluna e linhas marginais. Segundo COHEN (1960)¹¹ *apud* ANTUNES & LIGNAU (1997) o coeficiente mede o grau de concordâncias em escalas nominais, assumindo que:

- as unidades são independentes;
- as classes ou categorias da escala nominal são independentes e mutuamente exclusivas;
- o classificador e os pontos de referência operam de forma independente.

¹¹ COHEN, J.A. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurements**. v.20, 1:37-46.,1960

2.6 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

O GPS é um sistema de posicionamento, radionavegação e transferência de tempo por satélites, desenvolvido sob os auspícios do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, originalmente criado com fins militares estratégicos e de navegação. O GPS permite uma determinação de posição em três dimensões (latitude, longitude e altitude), 24 horas por dia, em qualquer condição meteorológica e em qualquer lugar do planeta, com precisão relativa (US COST GUARD, 1997).

Atualmente entre as principais aplicações do GPS cita-se: o suporte para navegação terrestre, marítima ou aeronáutica; posicionamento; exploração geofísica; mapeamento; esportes; agricultura; geologia; estudo de populações de animais silvestres; monitoramentos ambientais; dentre outras.

De maneira resumida, assim descreve-se o funcionamento do GPS:

- O receptor GPS recebe sinais dos satélites visíveis, que mostram a posição, a velocidade e o horário do usuário conforme necessidade de seu uso terrestre, marítimo ou aeronáutico. Alguns mostram dados adicionais como a distância e direção para pontos demarcados (*Waypoints*) ou mapas digitais;
- O conceito da operação GPS é baseado na distância do satélite. O usuário determina sua posição na terra, medindo a distância que se encontra do grupo de satélites no espaço. Os satélites atuam como pontos precisos de referência;
- Cada satélite GPS transmite um sinal acurado de posição e horário. O receptor do usuário mede o tempo que o sinal demora para atingir o receptor, que é a medida direta da distância exata em relação ao satélite. Medidas coletadas simultaneamente de 4 satélites são processadas para determinar as 3 dimensões de posição, a velocidade e o horário.

Existem dois níveis de serviço oferecidos pelo GPS (US COST GUARD, 1997) em três modalidades de posicionamento básicas (WELLS, 1986; FREITAS, 1998):

| Nível de Serviço | Modalidade de Posicionamento |
|--|--|
| – Serviço de Posicionamento Preciso (PPS - <i>Precise Positioning Service</i>), | – que utiliza o código P (uso exclusivo militar – EUA e forças aliadas); |
| – Serviço de Posicionamento Padrão (SPS - <i>Standard Positioning Service</i>), | – que utiliza o código C/A – que utiliza a fase da portadora (L1 e L2). |

Os receptores GPS estão sendo amplamente utilizados em pesquisas ambientais como instrumento de navegação e para a localização precisa de objetos, fenômenos ou na delimitação de áreas. Com esta finalidade, ANTUNES (1996) utiliza as coordenadas de localização obtidas por GPS, como pontos de controle no terreno (*ground control points* - GPC), os quais são utilizados em correções geométricas de imagens de satélite e, também, como referências no terreno para amostras de uso de solo e cobertura vegetal com fins de classificação digital. O NMA (1997) cita ainda, a utilização do GPS como apoio na cartografia digital, mapeamento temático e levantamentos ecológicos.

A utilização de receptores GPS, em conjunto com sensoriamento remoto, aumenta muito a habilidade para coletar informações necessárias para tomadas de decisão sobre questões relacionadas com a conservação de áreas naturais, sem mencionar a sua grande utilidade para SIGs (CRISTOFANI, 1996).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

Localização

Este trabalho foi realizado na região centro-sul da planície litorânea do litoral do Estado do Paraná, tendo como limite norte a Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba, e se estende até a barra do rio Saí-Guaçu ao sul (no limite estadual com Santa Catarina), delimitada pelas seguintes coordenadas geográficas 25°28'S e 48°00'W; 25°59'S e 49°00'W, em áreas de Formação Pioneiras e Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (Figura 03). A área de estudo abrange os municípios de Antonina, Morretes, Paranaguá, Pontal do Paraná, Matinhos e Guaratuba.

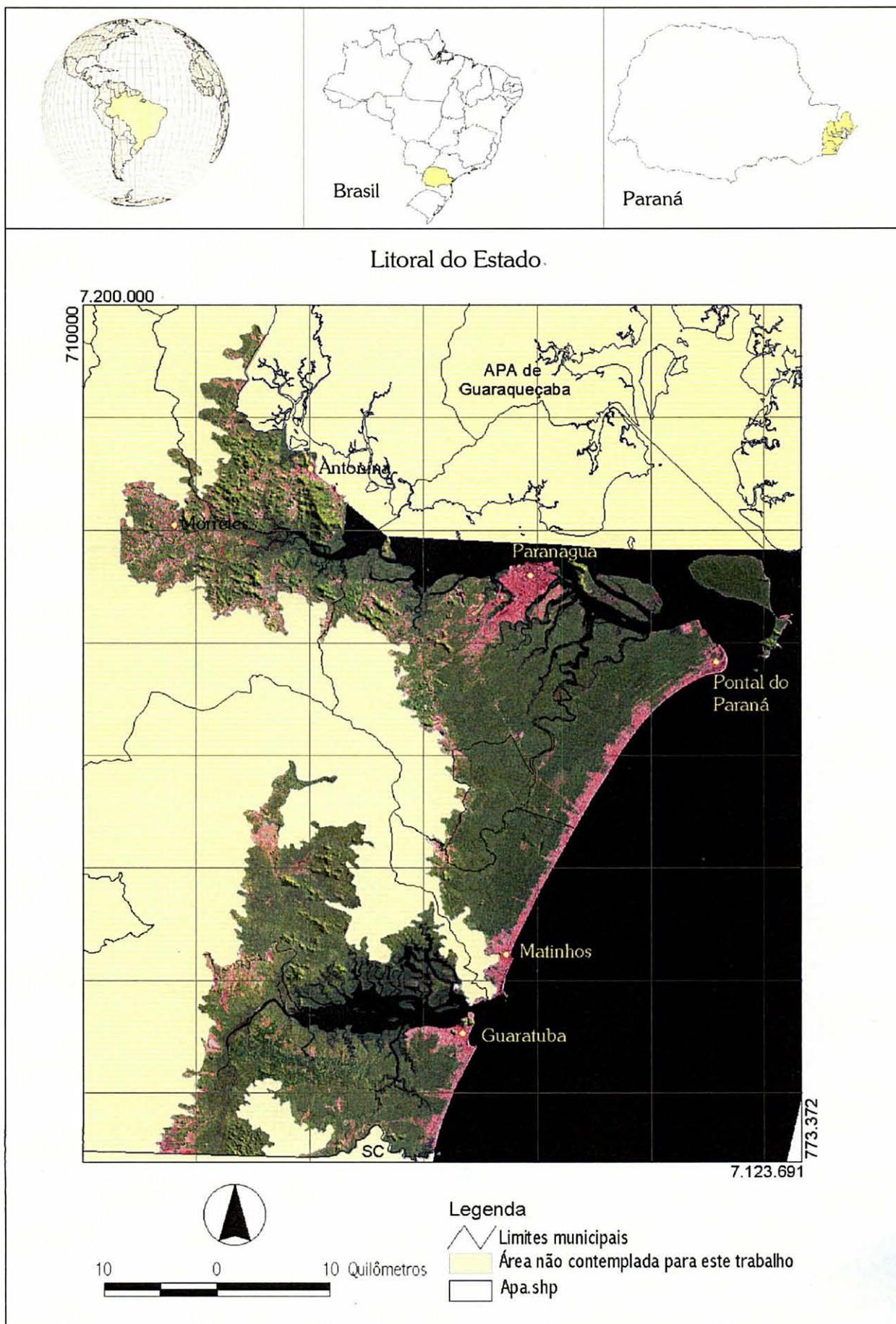
Geomorfologia

O Estado do Paraná possui um litoral relativamente pouco extenso, porém muito recortado, caracterizado por uma costa rica em enseadas, pontais e ilhas, em tempos passados e atualmente bastante modificada por processos de retificação da linha da costa, devido à intensa sedimentação (BIGARELLA, 1947; MAACK, 1981).

Este litoral caracteriza-se pela ocorrência de dois domínios geológicos principais, associados à macro-unidades geomórficas regionais: o das rochas do embasamento cristalino e o da cobertura sedimentar cenozóica, em geral designado como planície litorânea (IPARDES, 1989).

A planície entre a Serra do Mar e o Oceano Atlântico foram constituídas em grande parte pelos aluviões que se fundiram no litoral com as areias trabalhadas pelo mar (BIGARELLA, 1946). A planície é constituída por sedimentos continentais e costeiros. Dentre os primeiros destacam-se os sedimentos associados à encostas, tais como leques, talus, colúvio e sedimentos fluviais. O sedimento costeiro pertence a dois tipos de sistemas principais: o de planície costeira (com cordões litorâneos) e o estuarino. Ambos são representados tanto por ambientes antigos formados durante períodos em que o mar tinha níveis relativamente mais altos que o atual, como por ambiente atuais, tais como praias, planícies de maré, deltas de maré e dunas frontais (IPARDES, 1989).

Figura 03 - Localização da área de estudo.



As planícies costeiras com cordões litorâneos são uma das feições mais marcantes do litoral brasileiro. No Paraná, estende-se desde o canal do Varadouro (ao norte), até o rio Saí-Guaçu (ao sul). Os cordões litorâneos são bastante expressivos nesta região, quando observados por meio de fotos aéreas e imagens de satélite, porém pouco visíveis em campo (ANGULO 1992). Estes cordões foram denominados de restingas e feixes de restingas por BIGARELLA (1946).

No Paraná, a planície litorânea estende-se desde o sopé da serra (escarpa) até o oceano, possuindo um comprimento de aproximadamente 90 km e apresenta largura média entre 10 a 20 km, sendo que na região da Baía de Paranaguá ocorre a largura máxima, com cerca de 55 km (BIGARELLA, 1978). Apresenta-se profundamente recortada pelos complexos estuarinos das baías de Paranaguá, Laranjeiras, Pinheiro e Guaratuba, resultando em numerosas ilhas, algumas com grandes extensões como das Peças, do Mel, Rasa, da Cotinga e Rasa da Cotinga (BIGARELLA, 1946; MAACK 1981; ANGULO, 1992).

As altitudes da planície são inferiores a 20 m, ocorrendo em vários locais morros e colinas isoladas, com altitudes de até 500 m. A altitude da planície aumenta da costa para o continente, alcançando as maiores altitudes no sopé da serra (IPARDES, 1989).

Clima

O clima da região litorânea paranaense sofre influência de vários fatores, mas são dois os mais importantes: a proximidade da Serra do Mar, que contribui para um alto índice pluviométrico e um nível elevado de umidade relativa do ar; e a corrente marítima do Brasil, responsável pela baixa amplitude térmica, ao longo do ano (MAACK, 1981; IPARDES, 1989).

O clima do litoral paranaense é classificado como do tipo Af (Koeppen), ou seja, tropical superúmido, sem estação seca, com temperatura média em todos os meses superior a 18°C (megatérmico), isento de geadas e com precipitação média no mês mais seco acima de 60 mm (IAPAR, 1994).

A temperatura média anual varia de 19°C a 21°C, sendo a média das temperaturas máximas de 25°C a 26°C e das mínimas de 16°C a 18°C. A temperatura média do mês mais frio varia de 17°C a 19°C a do mês mais quente de 24°C a 26°C (IAPAR, 1994).

A precipitação média anual é de 1959 mm, sendo que o maior registro foi de

2.556 mm e o menor de 1.253 mm. De janeiro a março, costumam-se registrar as maiores pluviosidades médias. A umidade do ar é alta com os valores médios, oscilando em torno de 85% (MAACK, 1981).

IPARDES (1990), enquadra diferentemente o clima do litoral, atribuindo os seguintes tipos climáticos: Cfa e Cfb (Koeppen). Por apresentar a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, podendo apresentar geadas. O tipo Cfa ocorreria nas partes de baixa altitude do litoral enquanto o tipo Cfb ocorreria acima de 700 m.

Hidrografia

O litoral paranaense pode ser dividido em duas bacias hidrográficas principais (que por sua vez são subdivididas em diversas sub-bacias) e por duas menores. As maiores são a de Paranaguá e de Guaratuba e as menores são do rio Saí-Guaçu, limite sul do estado, e dos rios que deságuam no Mar de Ararapira, no extremo norte (ANGULO, 1992). Quase a totalidade dos rios da vertente oriental da Serra do Mar, deságuam nas baías de Paranaguá e Guaratuba (BIGARELLA, 1978). MAACK (1981) considera estes sistemas fluviais geologicamente mais recentes, em relação aos rios da bacia do rio Paraná.

Os principais rios que compõem a bacia da Baía de Paranaguá são:

- a) Sub-bacia da baía de Paranaguá – o rio Guaraguaçu é o de maior importância, seguido pelos rios Saquarema, Jacareí e Saquarema, dentre outros rios menores. MAACK (1981), comenta que a força de erosão destes rios é insignificante, sendo parcialmente acompanhados por orla pantanosa;
- b) Sub-bacia da baía de Antonina - os rios de maior importância são o Nhundiaquara e o Cachoeira;
- c) Sub-bacia da baía das Laranjeiras – com vários rios, destacam-se os rios Guaraqueçaba, Serra Negra e Tagaçaba.

A bacia da baía de Guaratuba é um dos sistemas mais interessantes e importantes do litoral, com importantes rios provenientes das serras, como o São João, Cubatão e Cubatãozinho, e os rios de menor magnitude de planícies, como o Taquaraçu, Descoberto e Boguaçu (MAACK, 1981; ANGULO, 1992; RODERJAN, 1996).

Os principais rios destas bacias litorâneas possuem curso superior localizado na área serrana com fortes declives, vales fortemente encaixados e um padrão de canal retilíneo.

O curso inferior, localizado nas planícies, possui geralmente um amplo vale de fundo plano e um padrão de canal meandrante. Os rios que nascem no planície sedimentar têm em suas margens, várzeas ricas e os leitos cheios de seixos de diabásio (MAACK, 1981; ANGULO, 1992; KUNIYOSHI, 1993).

Solo

Levantamentos pedológicos que incluem o litoral paranaense relacionam um conjunto bastante diversificado de tipos de solo, indicando, porém, o predomínio de: Solos Indiscriminados de Mangue (Manguitos), Solos Orgânicos, Areias Quartzosas, Podzol, Solos Aluviais e Gleis, nas regiões de Planície e nas áreas montanhosas destacam-se o Podzólico, Cambissolo, e Latossolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 1984; IPARDES, 1989; RODERJAN, 1996). De acordo com o IBGE (1990), é sobre estes solos que se desenvolvem as Formações Pioneiras e a Floresta Ombrófila Densa.

A planície, em grande parte, apresenta-se como formação humosa desenvolvida às custas das vasas brejosas, entremeadas por camadas de areia, provavelmente de origem eólica. Ao passo que os solos mais interiorizados são argilosos, provenientes de rochas pré-cambrianas ao norte e paleozóicas ao sul (BIGARELLA, 1957¹²; NOGUEIRA & TRICART, 1959¹³, citados por KUNIYOSHI, 1993).

Segundo EMBRAPA (1984), CURCIO & RACHWAL (1994) e RODERJAN (1996), segue descrição sucinta dos principais tipos de solo encontrados na região:

- Solos Indiscriminados de Mangue – são solos frágeis, de origem sedimentar (areno-siltico-argiloso), ricos em matéria orgânica, hidromórficos, salinos, que ocorrem em ambiente fluviomarinho, em locais de águas tranquilas.
- Solos Orgânicos – são solos hidromórficos constituídos essencialmente por resíduos orgânicos em vários estágios de decomposição.
- Areias Quartzosas – são constituídas principalmente por partículas arenosas (acima de 85%). Caracterizam-se pelos baixos níveis de nutrientes e pela deficiência em reter água.

¹² BIGARELLA, J.J. Notas sobre os depósitos arenosos recentes do litoral sul brasileiro. **Bol. Geog.**, 15(137):185-187, 1957.

¹³ NOGUEIRA, A.A.; TRICART, J. Contribuição ao estudo dos sedimentos litorâneos do sul do Brasil. **Bol. Par. Geogr.**, 12(3 e 4):5-14.1959.

- Podzóis – são solos associados à materiais psamíticos (cerca de 85%), caracterizando-se por um horizonte de perda (E=eluvial), abaixo do horizonte A e um horizonte B espódico, de acúmulo de húmus e ou óxido de ferro. Quando o lençol freático se encontra elevado e o horizonte Bh ou Bir apresenta-se acizentado, tem-se o Podzol Hidromórfico.
- Solos Aluviais – são encontrados normalmente associados à margem de rios, caracterizando-se por não ter pedogênese local e serem formados por alúvios recentes. São solos de alta fertilidade, que podem apresentar características hidromórficas, dependendo do local onde foram depositados.
- Gleis – são solos minerais hidromórficos derivados de sedimentos alúvio-coluvionares que apresentam horizonte Gleis (cinza) dentro de 60 cm superficiais, formado pela redução e/ou remoção do ferro. Esta classe engloba os Gleis Húmicos, Gleis Pouco Húmicos e Gleis Turfosos.
- Cambissolos – são solos minerais não hidromórficos e de horizonte B incipiente. Situam-se em encostas e sua posição na paisagem, relevo e material de origem determinam o grau de desenvolvimento e a profundidade.
- Podzólicos – são solos minerais não hidromórficos e de horizonte B textural argiloso.

3.2 FONTE DE DADOS

Para a realização deste trabalho foi necessário a utilização de diferentes fontes de dados, descritas a seguir:

Base cartográfica

Foram utilizados mapas temáticos produzidos pelo IPARDES para o macrozoneamento da APA de Guaraqueçaba, na escala de 1:200.000:

- Mapa de Vegetação da APA de Guaraqueçaba
- Mapa de Relevo da APA de Guaraqueçaba
- Mapa de Solos da APA de Guaraqueçaba

Do LISERP/SEMA foi utilizado, na escala 1:250.000:

- Mapa de uso do solo do Paraná

Também foram utilizadas as seguintes cartas topográficas do IBGE e do Ministério do Exército na escala 1:50.000 :

- Folha SG.22-X-D-II-3 (Morretes)
- Folha SG.22-X-D-II-4 (Antonina)
- Folha SG.22-X-D-III-3 (Guaraqueçaba)
- Folha SG.22-X-D-III-4 (Barra do Superagüi)
- Folha SG.22-X-D-VI-1 (Pontal do Paraná)
- Folha SG.22-X-D-V-1 (Mundo Novo)
- Folha SG.22-X-D-V-2 (Paranaguá)
- Folha SG.22-X-D-V-3 (Pedra Branca do Araraquara)
- Folha SG.22-X-D-V-4 (Guaratuba)
- Folha SG.22-X-D / SG.23-V-C (Curitiba) – escala 1:250.000

Fotos aéreas

Foram utilizados dois tipos de fotografias aéreas: o primeiro conjunto consistiu de fotos métricas de tamanho 23 x 23 cm, em preto e branco do ano de 1980, em escala 1:25.000 (IAP); o outro conjunto, de tamanho 20 x 30 cm, são fotos aéreas de pequeno formato, coloridas, ampliadas para a escala de 1:20.000 (AGRITEC) do ano de 1991 (cobrindo apenas a planície litorânea entre Pontal do Paraná e Caiobá).

Imagem de satélite

A imagem digital fornecida pelo INPE foi captada pelo sensor TM do Satélite LANDSAT-5 em 18 de julho de 1994, sendo sua órbita e ponto 220/77, quadrante N. Os dados digitais deste trabalho foram cedidos pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto e GIS do Curso de Engenharia Florestal da UFPR, e pela SPVS – Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental.

A coordenada geográfica do canto superior direito da imagem em UTM corresponde a 800.000 E e 7.220.000 N, a coordenada do canto inferior esquerdo é 700.000 E e 7.120.000 N.

3.3 EQUIPAMENTOS

Foram utilizados os recursos computacionais do Laboratório de Sensoriamento Remoto, do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, mais especificamente: uma estação de trabalho TD-3 da INTERGRAPH, onde estão instalados os *software* Microstation e MGE Advanced Imager, para a conversão da imagem e para a delimitação da região a ser trabalhada.

Utilizou-se também um microcomputador pessoal Pentium de 64 Mb E 5 Gb de disco rígido, placa gráfica de 8 Mb RAM, com monitor 17" e Zip drive. Os programas utilizados para o processamento digital de imagens foram: Windows NT 4.0, Microstation 5.0, MGE Base Imager (MBI), MGE Advanced Imager (MAI) e Idrisi for Windows 2.1.

Para a correção geométrica das imagens, utilizou-se um receptor GPS (*Global Positioning System*) do Laboratório GPS da UFPR, marca Trimble, modelo da série 4.000, com precisão menor que o metro em DGPS (GPS diferencial, também conhecido como posicionamento relativo).

A obtenção de coordenadas do terreno das áreas de amostragem (*training areas*) das formações vegetais, foi realizada com a utilização de um receptor GPS pessoal, marca Garmin, modelo 38, com precisão de 15 m RMS, que devido à disponibilidade seletiva (*Selective Availability - SA*) imposta pelo Departamento de Defesa dos EUA tem sua precisão degradada para algo em torno de ± 50 m, porém em períodos de atividade militar dos EUA ou aliados da OTAN o erro pode ultrapassar 100 m.

3.4 PROCEDIMENTOS

Teoricamente, a classificação digital de imagens pode ser realizada utilizando-se apenas os recursos computacionais sobre dados digitais, sem o envolvimento de trabalhos em campo. Entretanto esta técnica é fortemente contra-indicada.

Para o presente trabalho, optou-se inicialmente por um levantamento *multisensor e multistage*, isto é, aplicação de diferentes tipos de sensores (imagens de satélite, fotos aéreas, GPS, etc.), em diferentes estágios ou fases de amostragens (levantamentos em campo, interpretação visual das imagens, trabalhos em laboratório, etc.), utilizando-se dados de um sensor ou de levantamentos em campo para estimar ou ajustar dados de

um outro sensor, com o objetivo de aumentar a precisão dos trabalhos, como sugerido por SADER, STONE & JOYCE (1990) e SCHREUDER, LABAU & HAZARD (1995).

Devido a alguns fatores limitantes, não foi possível adotar integralmente o método pretendido, porém realizaram-se algumas modificações para torná-lo viável, mesmo que parcialmente. Deste modo, as atividades executadas neste trabalho dividem-se em duas etapas distintas, uma desenvolvida em campo e outra, em laboratório.

3.5 FASE DE CAMPO

Para um maior grau de precisão e confiabilidade das informações geradas é necessário que os dados digitais sejam conferidos e complementados em campo. A seleção das áreas visitadas em campo foi realizada de acordo com resultados preliminares das classificações supervisionadas e não supervisionadas, da fotointerpretação e de acordo com dados obtidos de entrevistas com pesquisadores. A visita a estes locais permitiu conferir e corrigir os dados da classificação digital, fornecendo também informações sobre a detecção das diferentes fases sucessionais da caxeta nestas áreas.

Porém, a principal vantagem da fase de campo se refere à possibilidade da coleta de pontos GPS, responsáveis pelo referenciamento geográfico das imagens, além de fornecer precisão na localização de caxetais e oferecendo subsídios para a classificação e tratamento das imagens e interpretação das fotos.

Para a correção geométrica da imagem foi necessário a coleta de pontos GPS em campo. O método DGPS empregado foi a técnica de posicionamento estático, onde há um receptor fixo na estação da UFPR, no Centro Politécnico em Curitiba, e outro receptor móvel em campo, coletando dados durante cerca de uma hora, em cada ponto. Os dados coletados foram posteriormente processados no Laboratório GPS da UFPR. Com esta técnica obteve-se, para cada ponto observado, uma precisão menor que o metro, suficiente para a correção geométrica da imagem.

Para dar maior confiabilidade para a escolha das áreas de treinamento utilizadas na classificação digital de imagem, utilizou-se um GPS de navegação. Devido à pouca precisão do instrumento, o procedimento adotado, nesta coleta de dados geográficos,

consistiu em localizar os pontos centrais (locais distantes das bordaduras) dos alvos e realizar a leitura de pontos por cerca de 5 minutos, com a finalidade de melhorar os resultados das leituras do GPS. Este método, aliado ao cuidado de procurar alvos com áreas superiores a 900 m² (tamanho de área representado por um pixel do sensor LANDSAT-5 TM) amenizou o erro imposto pelo SA¹⁴, permitindo atingir algo em torno de 30 m de precisão. Este procedimento foi de grande auxílio no reconhecimento na imagem, das fisionomias ou alvos encontrados em campo.

3.6 FASE DE LABORATÓRIO

Esta etapa consistiu na fotointerpretação de fotos aéreas e imagens de satélite, estudo de mapas topográficos e temáticos da área, o processamento digital de imagens e na classificação digital propriamente dita, incluindo as atividades de pós-classificação e obtenção das imagens finais e mapas. A fase de laboratório teve parte de suas atividades desenvolvidas no Laboratório de Sensoriamento Remoto do Curso de Engenharia Florestal da UFPR.

3.6.1 Uso de Fotos Aéreas e da Base Cartográfica

As fotos aéreas foram utilizadas principalmente para a identificação inicial das unidades fitofisionômicas, anterior às fases de campo e processamento digital das imagens. Este material proporciona uma percepção maior dos diferentes ambientes por se tratar de material de maior escala. Além de informação sobre a vegetação, as fotos aéreas contribuem para um entendimento sobre as áreas de transição entre as formações. As fotos também auxiliaram na escolha de áreas de treinamento para a classificação supervisionada e para o refinamento das mesma.

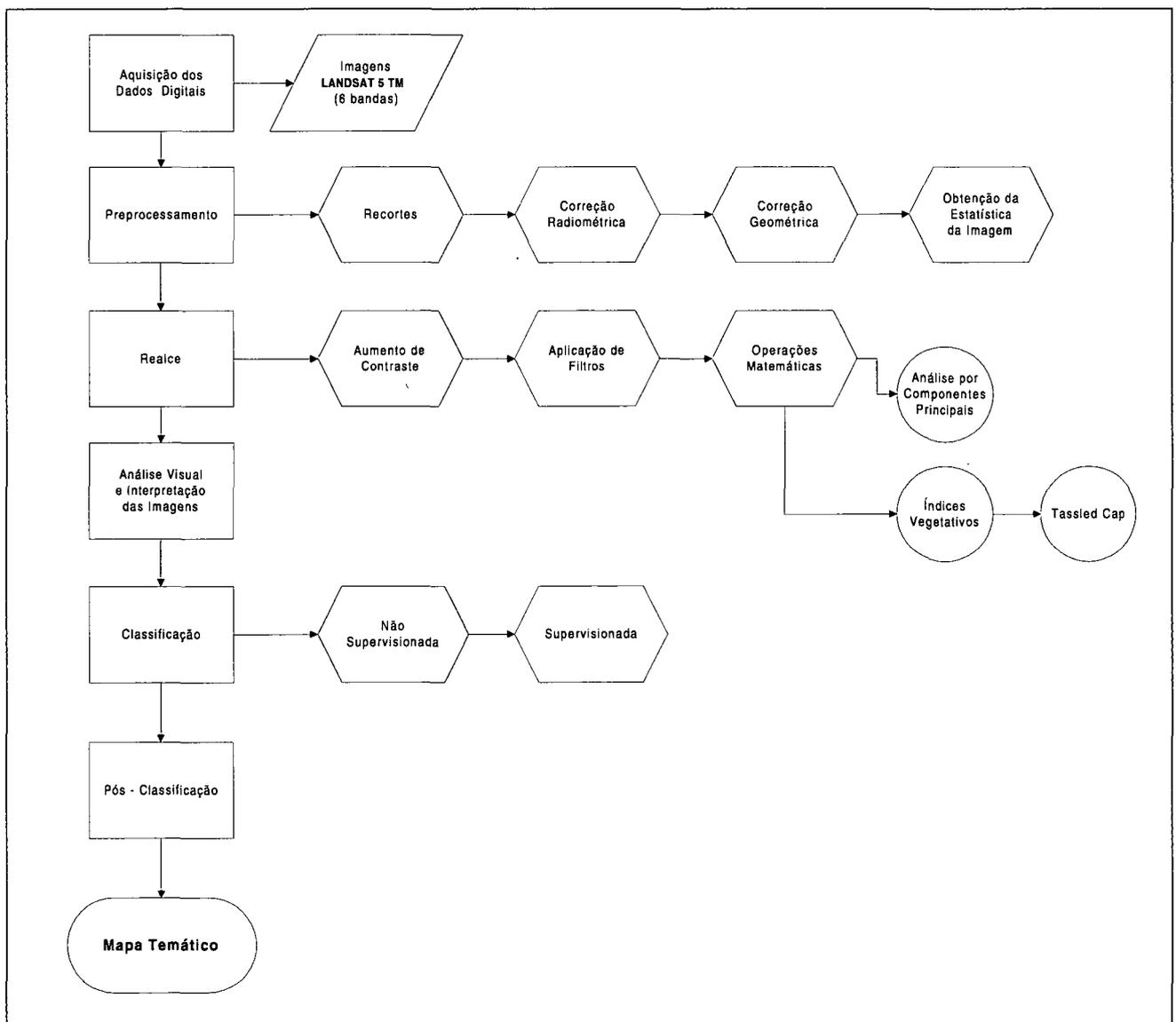
A base cartográfica constituída pelas cartas topográficas do IBGE (1986) e dos mapas temáticos do IPARDES (1997) foram de grande utilidade para a delimitação de áreas, para a verificação dos acessos aos diferentes pontos de amostragem e o reconhecimento da região.

¹⁴ SA - Selective Availability. Distorção de sinais dos satélites GPS, realizado pelo Departamento de Defesa dos EUA, para reduzir a precisão absoluta para cerca de 50 – 100 m.

3.6.2 Processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens (PDI), neste trabalho, refere-se a todos os métodos e técnicas de manipulação de dados provenientes de sensores remotos. O PDI engloba principalmente atividades de pré-processamento, realce de imagens e classificação (Figura 04).

Figura 04 – Diagrama de fluxo apresentando as diferentes etapas do método utilizado.



Pré-processamento

O pré-processamento consiste em adequar a imagem ao processamento, realizando todas as tarefas necessárias, como o recorte da cena original, (correção radiométrica), correções geométricas, e obtenção da estatística das bandas originais.

Recorte da imagem

O fato das imagens originais corresponderem aos quadrantes inteiros implica em uma área recoberta de terreno muito extensa, no caso específico deste estudo, a imagem contida no quadrante original abrange outras áreas além da porção centro-sul da planície litorânea paranaense. Desta forma, foi necessário recortá-las para restringir o processamento apenas à área desejada.

Correção Radiométrica

Este termo é muito amplo e designa àquelas técnicas que modificam os valores de brilho originais, com o objetivo de aproximá-los aos que seriam encontrados na imagem, no caso de uma recepção perfeita. Dentre este conceito estão englobadas as distorções provocadas pelos componentes da atmosfera, assim como os problemas radiométricos derivados do mal funcionamento do sensor (CHUVIECO, 1990).

A única tipo de correção radiométrica utilizado neste trabalho foi a remoção de ruídos (interferências) na imagem, que segundo LILLESAND & KIEFER (1994), pode ser entendido como todo distúrbio não desejado na imagem devido a limitações do sensor, problemas na digitalização do sinal ou nos processos de gravação, além de defeitos no equipamento orbital ou fadiga de material.

Para minimizar os efeitos de ruídos do tipo *striping* (bandeamento da imagem), utiliza-se um procedimento denominado *destriping*, que em linhas gerais, consiste em ajustar os histogramas dos sensores utilizando um histograma de referência, geralmente do conjunto de imagens. A maioria dos softwares de processamento digital de imagens executa este procedimento de forma bastante facilitada.

Correção Geométrica

As imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas à distorções de ordem geométrica, não oferecendo precisão cartográfica, quanto ao posicionamento de objetos

ou fenômenos nela representados (CROSTA, 1993). Existem muitas fontes potenciais de distorção geométrica, destacando-se: a rotação da terra, variações em altitude, velocidade e atitude¹⁵ do sensor, curvatura da terra, ângulo de rastreamento, dentre outros (BERNSTEIN & FERNEYHOUGH, 1975¹⁶ e BERNSTEIN, 1983¹⁷ *apud* JENSEN, 1986; RICHARDS, 1993).

Para atribuir propriedades cartográficas a uma imagem digital, é necessária submetê-la a um processo denominado correção geométrica ou retificação. Ao corrigirem-se os erros posicionais dos pixels, torna-se possível atribuir um sistema de coordenadas espacial e escalas, ou realizar o registro¹⁸ da imagem (SCHOWENGERDT, 1983; CROSTA, 1993).

A técnica utilizada para a correção geométrica consiste em se relacionar matematicamente as coordenadas dos pixels na imagem e as coordenadas desses pontos no terreno, com o auxílio de um mapa (RICHARDS, 1993). Atualmente o uso de pontos de controle no terreno (GCP) coletados por receptores GPS tem ampliado a precisão nos trabalhos de correção.

Para o presente trabalho, realizou-se uma reamostragem pelo método do vizinho mais próximo, garantindo um mínimo de alteração nos valores de brilho dos pixels. Porém, em muitas situações é necessário realizar este procedimento antes, como neste trabalho, onde as amostras de treinamento escolhidas na imagem devem possuir as mesmas coordenadas de posicionamento do terreno (dados de GPS) para garantir uma maior precisão na classificação.

Para este trabalho, a imagem foi corrigida na Projeção Transversa de Mercator (UTM), utilizando-se para isto GCPs retirados de mapas e GPS em UTM, fuso 22 e elipsóide SAD-69.

¹⁵ Relacionado com erros de posicionamento em relação à Terra, ocasionados por desvios de órbita, efeméride, rotação, etc.

¹⁶ BERNSTEIN, R. & FERNEYHOUGH, D.G. Digital image processing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 41:1465-1476. 1975.

¹⁷ BERNSTEIN, R. Image geometry and rectification. In: COLWELL, R.N. **Manual of remote sensing**. 2 ed. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1983. v.1, cap. 21, p. 873-922.

¹⁸ Registro é o ajuste do sistema de coordenadas de uma imagem ao sistema equivalente de uma outra imagem ou mapa. Este expediente é utilizado em trabalhos multisensores, multitemporais ou para mosaicos.

Estatística das bandas originais

A obtenção de dados estatísticos da imagem é uma das primeiras tarefas realizadas pelo processamento digital de imagens. Segundo SHORT (1982)¹⁹, citado por JENSEN (1986), a obtenção de estatísticas da imagem é de grande importância para a análise de dados provenientes de sensores remotos.

Alguns procedimentos do PDI podem provocar alterações significativas nos valores de brilho (NC - nível de cinza) dos pixels de uma imagem. Com o objetivo de minimizar este efeito indesejável, obtiveram-se as estatísticas das bandas originais antes de iniciar o processamento. A maioria dos *softwares* para sensoriamento remoto fornece automaticamente as seguintes informações: média, moda, desvio padrão, mediana, valores digitais máximos e mínimos, amplitude, histogramas e, ainda, matriz variância-covariância e matriz de correlação.

Realce de Imagem e Transformações Especiais

Entende-se como realce de imagem todo o procedimento destinado a melhorar o aspecto geral da imagem ou de alguns de seus alvos. As transformações especiais são procedimentos destinados a ampliar as possibilidades de extração de informações das imagens. Neste trabalho, foram aplicados o aumento de contraste, análise por componentes principais, índices vegetativos e transformação *tasseled cap*.

Análise por componentes principais

Esta transformação é derivada da matriz de covariância entre as bandas e gera um novo conjunto de imagens onde cada valor de pixel é uma combinação linear dos valores originais. O número de componentes principais é igual ao número de bandas espectrais utilizadas e são ordenadas de acordo com o decréscimo de variância de nível de cinza. A primeira componente contém a maior variância e a última a menor.

A transformação por componentes principais é obtidas ao se cumprir três etapas básicas: a) derivação da matriz de variância-covariância; b) cálculo dos autovetores (*eigenvectors*); e c) transformação linear do conjunto de dados (RICHARDS, 1993).

¹⁹ SHORT, N.M. **Geographic information systems**. In: NASA Scientific And Technical Information Branch The Landsat Tutorial Workbook: basics of satellite remote sensing. Washington: NASA, 1992. p.227-307.

Neste processo, o coeficiente de correlação ou da variância são utilizados para determinar um conjunto de quantidades, denominadas autovalores (*eigenvalues*). Estes indicam o comprimento dos eixos das componentes principais e são medidos em unidades de variância. Associados aos autovalores existem um vetor de módulo unitário chamado autovetor, que representam as direções dos eixos das componentes principais. Ambos constituem em fatores de ponderação que definem a contribuição de cada banda original para cada componente principal, em uma combinação aditiva e linear (INPE, 1997b).

Neste trabalho, a transformação por componentes principais foi aplicada em duas situações distintas:

- a) Sobre as seis bandas reflexivas do LANDSAT 5 TM;
- b) Sobre dois conjunto de três bandas (*triplets*), uma referente aos canais do espectro visível, outra com bandas do infravermelho.

Índices de Vegetação

Os índices de vegetação utilizados neste trabalho são:

- RVI (*Ratio Vegetation Index*) - índice de vegetação pelo cociente de bandas. Normalmente utiliza-se a razão do infravermelho-próximo com o vermelho.

$$RVI = \frac{NIR}{RED}$$

- DVI (*Difference Vegetation Index*) - índice de diferença de vegetação.

$$DVI = NIR - RED$$

- NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) - índice normalizado de diferença de vegetação. É o índice mais utilizado.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

- SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) - índice de vegetação com ajuste para solo. Índice criado para reduzir a interferência do solo.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \times (1 + L)$$

onde:

L é um fator de correção, que varia desde 0 para a cobertura de vegetação muito densa até 1 para cobertura de vegetação menos densa. A maioria das vezes é

utilizado o valor 0,5, o qual diz respeito à cobertura de vegetação intermediária.

- *MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)* - índice de vegetação com ajuste para solo modificado.

$$MSAVI2 = \left(\frac{1}{2}\right)(2(NIR + 1) - \sqrt{(2NIR + 1)^3 - 8(NIR - RED)})$$

- *TVI (Transformed Vegetation Index)* - índice de vegetação transformado.

$$TVI = \sqrt{(NDVI + 0,5)}$$

- *NDWI (Normalized Difference Water Index)* - índice normalizado de diferença de água.

$$NDWI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

Utilizaram-se, também, duas operações aritméticas que apresentaram bons resultados como índices de vegetação, são elas R42 e EQ:

$$R42 = \frac{NIR}{GREEN}$$

$$EQ = \sqrt{(2NIR + 1)^3 - 8(NIR - RED)}$$

Transformação Tasseled Cap

Esta transformação é facilmente obtida por meio dos softwares de processamento digital de imagens modernos. Sua concepção é similar ao da análise por componentes principais, modificando a forma de cálculo e oferecendo aos componentes gerados um significado físico mais preciso (CHUVIECO, 1990)

De acordo CRIST & CICONE (1984), os componentes *Brightness*, *Greeness* e *Wetness* podem ser gerados a partir da aplicação dos coeficientes a seguir mostrados, sobre as bandas reflexivas da imagem:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
|-------------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| <i>Brightness</i> | 0,33183 | 0,33121 | 0,55177 | 0,42514 | 0,48087 | 0,25252 |
| <i>Greeness</i> | -0,24717 | -0,16263 | -0,40639 | 0,85468 | 0,05493 | -0,11749 |
| <i>Wetness</i> | 0,13929 | 0,22490 | 0,40359 | 0,25178 | -0,70133 | -0,45732 |

Análise Visual da Imagem e Interpretação das Imagens

Este procedimento é necessário para estudar, reconhecer e localizar de forma visual os alvos do terreno nas imagens, possibilitando uma segregação prévia por classes de cobertura de solo, para posterior confrontação com a realidade do terreno e com os resultados do processamento digital e da classificação.

Segundo JENSEN (1986), um observador humano pode discriminar aproximadamente entre 8 a 16 tons de cinza quando da interpretação de uma foto aérea em preto e branco. Se os dados são gravados em 256 tons de cinza, existem outras informações presentes na imagem que não podem ser extraídas visualmente.

Em geral, a análise visual leva em consideração os seguintes elementos da imagem: tonalidade, cor, textura, padrão, forma, sombra, localização, convergências e evidências. Deste modo a utilização de composições coloridas, em muitos casos, significa grande auxílio na interpretação de imagens.

Composição coloridas

Para a seleção da melhor composição colorida, de acordo com CHAVEZ *et al.* (1982, 1984)²⁰ *apud* JENSEN (1986), utiliza-se o fator de índice ótimo (*Optimum Index Factor - OIF*).

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^3 S_k}{\sum_{j=1}^3 C_j}$$

onde:

S = desvio padrão para banda k

C_j = valor absoluto do coeficiente de correlação entre qualquer dupla das três bandas.

²⁰ CHAVEZ, P.S.; BERLIN, G.L. & SOWERS Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. **Journal of applied Photographic Engineering**, 8:23-30. 1982.

CHAVEZ, P.S.; GUPTILL, S.C. & BOWELL Image processing techniques for thematic mapper data. **Technical Papers, 50th Annual Meeting of the American Society of Photogrammetry**, vol. 2, pp. 728-742. 1984.

3.6.3 Classificação Digital de Imagens

Antes de iniciar a classificação digital de imagens, foi necessário conhecer melhor alguns aspectos intrínsecos à área de estudo, como formas de acesso, principais categorias de uso de solo e cobertura florestal, dentre outras particularidades. Isto somente foi possível através do reconhecimento da áreas e dos principais alvos por meio da interpretação de fotos aéreas e imagens de satélite, seguidas de saídas à campo.

Com vistas de facilitar os trabalhos, optou-se por realizar uma classificação não supervisionada anterior, de forma a evidenciar blocos homogêneos na imagem que pudessem ser reconhecidas em campo. Após este estudo preliminar, e definidas as categorias informacionais, seguiu-se para novos trabalhos em campo para conferir o resultado desta classificação preliminar e coletar pontos GPS que pudessem fornecer maior precisão a uma classificação supervisionada. O método de classificação de imagens utilizado neste trabalho encontra-se resumido na Figura 05.

Classificação Não-Supervisionada

A classificação não-supervisionada foi executada por meio do método estatístico ISODATA de agrupamento de classes. O classificador foi configurado para 20 classes iniciais e 20 interações que, ao final do processamento, resultou em uma imagem com 17 classes.

Posteriormente, optou-se por submeter a imagem classificada a uma interpretação e comparação com fotos aéreas e composições coloridas, como sugerem KRAMBER & MORSE (1994). Este procedimento originou uma nova imagem, com um número menor de classes (8), onde as principais feições fisionômicas do terreno foram retratadas, refletindo melhor a realidade de campo.

Seleção das Amostras de Treinamento para a Classificação Supervisionada

As amostras que foram utilizadas no treinamento do classificador foram coletadas de forma blocada diretamente sobre a imagem, a partir da interpretação das fotos aéreas e imagens, da classificação não-supervisionada e das saídas a campo com o uso de GPS.

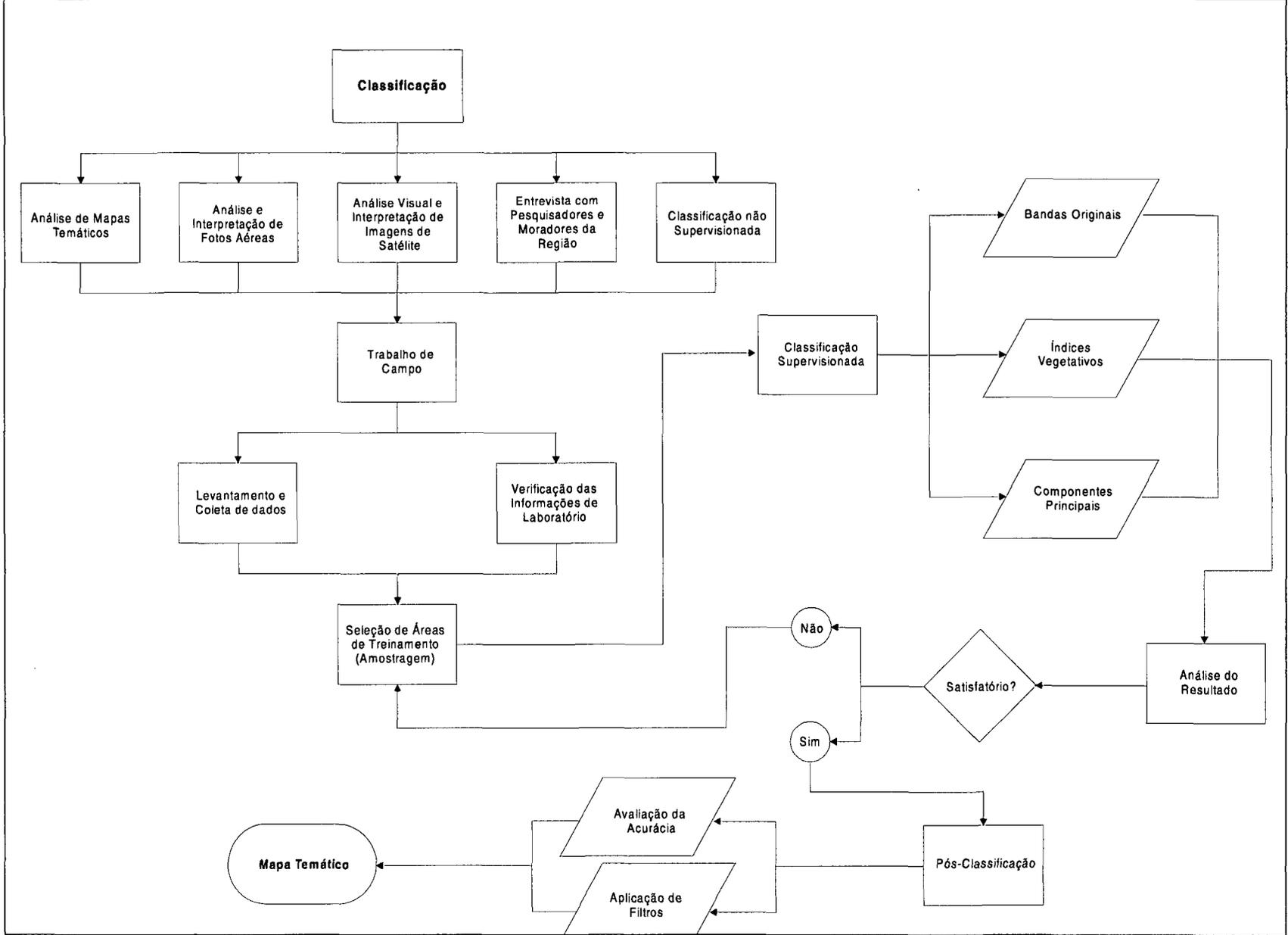


Figura 05 – Diagrama de fluxo sobre as etapas da classificação.

A imagem foi classificada utilizando-se como referência o sistema de classificação de vegetação proposto pelo IBGE (1992), deste modo foram selecionadas as seguintes unidades vegetacionais:

- a) Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha (mangues);
- b) Formação Pioneira de Influência Fluvial (várzeas, brejos e fase inicial de caxetais);
- c) Formação Pioneira de Influência Marinha (restinga)
- d) Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas;

Além destas, foi necessário utilizar outras categorias informacionais para que os resultados da classificação fossem mais claros e fiéis a realidade de campo:

- f) Áreas antropizadas (pastagem, agricultura, capoeirinhas, capoeiras);
- g) Áreas urbanas;
- h) Areia e solo exposto;
- i) Corpos de água (mares, rios e lagos);
- j) Sombras;
- k) Áreas montanhosas.

Classificação supervisionada

Foram testados os algoritmos paralelepípedo, mínima distância e máxima verossimilhança, disponíveis no software de processamento digital de imagens utilizado. Além destes foi utilizado o classificador PARA-ML do software Microstation Advanced Imager (MAI), que combina os algoritmos do paralelepípedo e o da máxima verossimilhança.

Este método utiliza-se do paralelepípedo para avaliar cada pixel, separando os de valores mais distantes e aqueles cujos valores são mais próximos e poderiam ser atribuídos a mais de uma classe, são processados segundo a regra de decisão da máxima verossimilhança. A vantagem deste método é ser mais rápido que o algoritmo da máxima verossimilhança e mais confiável que o paralelepípedo.

3.6.4 Pós-Classificação

Entende-se como pós-classificação todos os procedimentos aplicados à uma imagem classificada, seja para avaliar seu grau de acurácia, como para uniformizar a imagem ou melhorar seu aspecto global, visando a obtenção do mapa temático.

Acurácia da Classificação

É o procedimento utilizado para verificar se as classificações que resultaram no mapa temático são confiáveis. Normalmente, a verificação da exatidão se dá através de amostragem de dados de referência, em geral pontos que possuam coordenadas e categorias conhecidas (coletadas em campo, fotos aéreas, imagens ou mapas) que são comparados com a imagem classificada e submetidos a uma avaliação estatística para determinar o grau de concordância (ou de acurácia) da classificação.

Amostragem dos Dados de Referência

Existem várias maneiras de realizar a amostragem dos dados de referência, entretanto, neste estudo, foi realizada de forma casualizada, selecionando-se pontos representativos para as 10 categorias informacionais sobre a imagem, de acordo com a interpretação de fotos aéreas e imagens de satélites. Os pontos foram selecionados de forma a não coincidir com os pixels que foram amostrados na etapa de treinamento. Para que isto fosse possível, os polígonos de treinamento foram ativados sobre a imagem na qual foram coletados novos pontos de referência para a verificação da exatidão das classificações, conforme método utilizado por BRITES (1996).

Matriz de erros

Foi gerada uma matriz bidimensional, na qual as linhas apresentam os dados das classes de referência, enquanto as colunas apresentam as categorias deduzidas da classificação. Trata-se de uma matriz quadrada $n \times n$ onde n indica o número de categorias. A diagonal da matriz expressa o número de pontos de verificação onde se produz a concordância entre a realidade de campo e a classificação para cada classe, enquanto as última coluna e a última linha apresentam o total de pontos atribuídos para determinada classe.

Este procedimento possibilitou, além da avaliação da “confusão do classificador”, o cálculo dos índices de acurácia do produtor, do usuário, acurácia total e o índice *Kappa*.

Índices de acurácia

Na tabela 02 são apresentados os índices de acurácia utilizados neste trabalho.

TABELA 02 – Índices de Acurácia

| | Acurácia | Fórmula | Interpretação |
|--|----------------------|--|--------------------------------|
| Coeficiente de concordância global | Acurácia total | $P_0 = \frac{\sum x_{ii}}{N}$ | $0 \leq P_0 \leq +1$ |
| | Índice Kappa | $\hat{\kappa} = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$ | $-1 \leq \hat{\kappa} \leq +1$ |
| Coeficiente de concordância para classes individuais | Acurácia do Produtor | $Ap_i = \frac{x_{ii}}{x_{i+}}$ | $0 \leq Ap \leq +1$ |
| | Acurácia do Usuário | $Au_i = \frac{x_{ii}}{x_{+i}}$ | $0 \leq Au \leq +1$ |
| | Índice Kappa | $\hat{\kappa}_i = \frac{Nx_{ii} - x'_{i+} x_{+i}}{Nx_i - x_{i+} x_{+i}}$ | $-1 \leq \hat{\kappa} \leq +1$ |

Fonte: Antunes & Lingnau, 1997.

Filtros

O procedimento de pós-classificação mais usual é a aplicação do filtro de moda (também podem ser usados os filtros de média e mediana) para eliminar o efeito *salt and pepper*, que apresenta-se como pequenos pontos não classificados ou classificados erroneamente em meio de blocos homogêneos. Com isto, gera-se uma imagem com aparência menos ruidosa, isto é, com menor interferência.

Estes filtros agem pela aplicação de matrizes, onde o ponto central é avaliado quanto à frequência das classes em sua vizinhança. De acordo com os valores de peso e limiar definidos pelo usuário, este ponto central terá ou não sua classe substituída pela classe de maior frequência na vizinhança (INPE, 1997b).

Obtenção da imagem final e preparação para o mapa temático

De posse da imagem classificada e realizada a análise de acurácia da classificação, deve-se partir para obtenção da imagem final ou imagens finais e, se o grau de acurácia for aceitável, para o mapa temático.

Escala

De maneira genérica, a escala determina a quantidade de detalhamento que poderá ser vista em um mapa. Ao reduzir-se a escala, os detalhes de um mapa também são reduzidos. Somente escalas grandes permitem uma apresentação mais fiel à realidade de

campo. Por outro lado, escalas menores permitem que uma maior quantidade de terreno seja representada, apesar da redução do detalhamento. Isto é, alguns alvos de pequena extensão existentes no terreno não serão mapeados.

Para o presente estudo, elegeu-se a escala máxima para a apresentação de mapas a 1:100.000, porém devido às facilidades de impressão, os mapas que constam neste trabalho, estão compreendidas entre 1:400.000 (com poucos detalhes) e 1:250.000 (mais detalhada)

Mapa temático

A imagem final, resultado da classificação digital, exige a confecção de legenda, permitindo a identificação de cada classe apresentada pela imagem. Este procedimento pode ser realizado com o software MGE de processamento digital de imagens, porém foi utilizado o pacote gráfico COREL DRAW 7 para este fim, devido à facilidade de uso e à melhor apresentação gráfica.

No caso do mapa temático, ainda é necessário a utilização de alguns recursos de GIS, como a sobreposição de arquivos vetoriais que contém informações sobre coordenadas e a aplicação de quadriculas e conseqüente atribuição de escalas e convenções. Este trabalho foi executado com o software ARCVIEW GIS 3.0a.

A impressão do resultado final foi obtida pela utilização de impressora laser colorida em papel A3, cujo serviço foi terceirizado em empresas copiadoras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTATÍSTICA DAS IMAGENS

Pode-se afirmar que, atualmente, todos os programas de processamento digital de imagens fornecem, de forma automática e simples, informações estatísticas dos dados provenientes de sensores remotos. Após o recorte da imagem, foi realizada a análise estatística de uma seção da imagem original que contém a área de estudo. Cada banda individual apresentou as seguintes características:

Número de Linhas = 3.088

Número de Colunas = 2.751

Quantidade de Pixels = 8.495.088

As medidas de tendência central e de dispersão obtidas, são muito importantes para verificar o comportamento espectral da cena, auxiliando na compreensão das características da imagem e subsidiando os procedimentos de realce. Foram calculados, para cada banda, os valores de média, mediana, moda, desvio padrão, variância, valor máximo, valor mínimo e amplitude, além dos histogramas das bandas originais (Tabela 03 e Figura 06).

Tabela 03 – Estatística básica das bandas originais

| Banda | Média | Mediana | Moda | Variância | Desvio Padrão | Valor Mínimo. | Valor Máximo. |
|--------------|--------------|----------------|-------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 38,8466 | 40 | 39 | 66,3755 | 8,1471 | 0 | 105 |
| 2 | 14,0416 | 14 | 14 | 12,6873 | 3,5619 | 0 | 62 |
| 3 | 12,4440 | 13 | 14 | 17,2357 | 4,2357 | 0 | 135 |
| 4 | 25,6421 | 30 | 4 | 327,3051 | 18,0915 | 0 | 93 |
| 5 | 19,1050 | 21 | 0 | 274,1115 | 16,5864 | 0 | 159 |
| 7 | 3,8937 | 3 | 0 | 19,6305 | 4,4306 | 0 | 92 |

Como a área de estudo apresenta-se com uma grande extensão, compreendendo diferentes ambientes, em todas as bandas, o valor mínimo é 0 (zero), isto se deve às áreas de sombras e de água existente em todas as bandas e ao baixo contraste que os dados originais apresentam. Onde o relevo apresenta-se mais acidentado, a exposição das montanhas ao sol, em determinadas horas do dia, impedem que algumas áreas

sejam corretamente iluminadas, devido à projeção de sua sombra, resultando em áreas escuras na imagem, de pouca reflectância. No caso da água, isto se deve à característica espectral do alvo que, segundo RICHARDS (1993), reflete cerca de 10% (ou menos) da energia incidente na faixa espectral compreendida entre o azul e o verde (bandas 1 e 2 respectivamente); uma pequena percentagem no vermelho (banda 3) e nenhuma energia nas bandas do infravermelho (bandas 4, 5 e 7).

O valor de brilho máximo presente nas bandas estudadas constituem poucos pixels por banda, indicando muitas vezes, alvos que refletem com grande intensidade a energia recebida, como por exemplo o solo exposto. Em alguns casos, os valores máximos de brilho representam picos de energia refletida ou problemas na imagem originados pela fadiga do sistema sensor do LANDSAT-5.

Sob a ótica do sensoriamento remoto, as medidas de correlação e covariação são importantes para averiguar a qualidade dos dados e o seu grau de similaridade, além de auxiliarem na escolha de *triplets* de bandas para análise visual ou classificação assistida por computador, indicando quais poderão ser descartadas ou incluídas em um estudo.

A covariância indica a similaridade entre dois conjuntos de dados, ou seja, como os dados estão correlacionados entre si, fornecendo a medida do quanto de informação contida em um par de bandas é comum a ambas (Tabela 04).

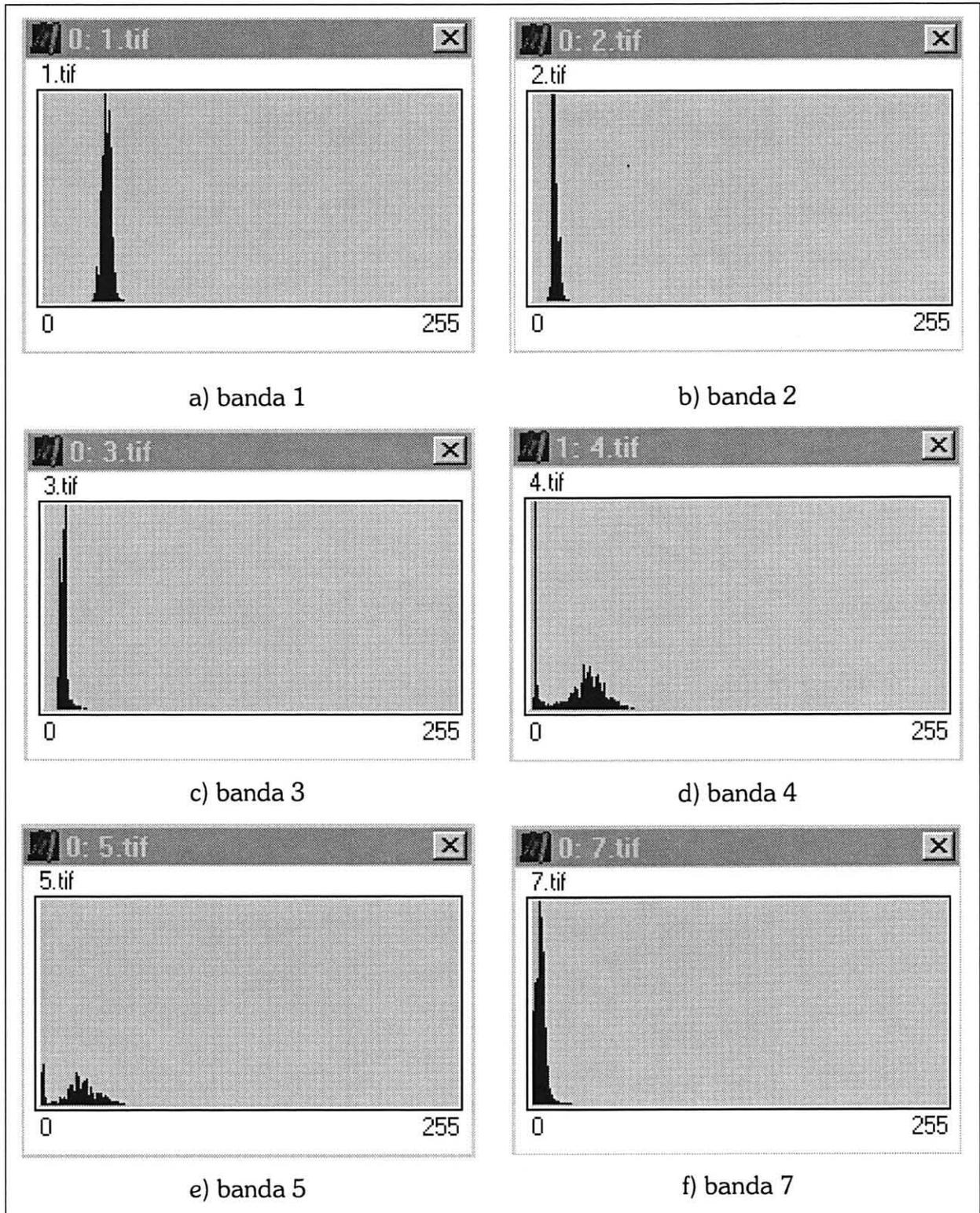
Quanto maior o valor de covariância, maior é o grau de correlação entre os dados.

Tabela 04 – Matriz de Covariância

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 66,9327 | | | | | |
| 2 | 25,1184 | 12,7076 | | | | |
| 3 | 23,6885 | 13,2376 | 17,7294 | | | |
| 4 | 24,8238 | 26,6881 | 36,8314 | 327,8989 | | |
| 5 | 23,3459 | 27,4511 | 43,4473 | 265,3472 | 274,5233 | |
| 7 | 7,4050 | 7,9235 | 13,0824 | 55,0392 | 65,8734 | 19,5907 |

O coeficiente de correlação é outra forma para indicar a existência de informação espectral redundante entre bandas. Devido aos valores estarem entre -1 e 1, é mais fácil perceber a quantidade de informações comuns entre os dados. Quanto mais próximo de 1 for o coeficiente, mais redundante são os dados.

Figura 06 – Histogramas das bandas originais



Obs.: No eixo de coordenadas cartesianas, a abscissa contém os valores de brilho e a ordenada contém a quantidade de pixels (f).

As bandas do visível (1, 2 e 3) estão bastante correlacionadas, como poder ser observado na Tabela 05. Em grau comparável, as bandas do infravermelho (4,5 e 7) também apresentam redundância considerável ($r > 0,6867$).

A correlação elevada encontrada, tanto nas bandas do visível, quanto nas do infravermelho, é esperada. Isto se deve à resolução radiométrica do sensor TM do LANDSAT-5, cujas bandas do visível apresentam relativa proximidade nos seus comprimentos de ondas. As características espectrais da cena também contribuem para a correlação elevada, devido a homogeneidade das fisionomias de vegetação.

Valores de correlação inferiores são encontrados, quando uma banda do espectro visível é comparada com uma banda do infravermelho, especialmente entre as bandas 1 e 4 ($r=0,1676$), 1 e 5 ($0,1722$), 1 e 7 ($0,2045$).

Tabela 05 – Matriz de Correlação

| Bandas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1,0000 | | | | | |
| 2 | 0,8613 | 1,0000 | | | | |
| 3 | 0,6877 | 0,8819 | 1,0000 | | | |
| 4 | 0,1676 | 0,4134 | 0,4831 | 1,0000 | | |
| 5 | 0,1722 | 0,4648 | 0,6228 | 0,8844 | 1,0000 | |
| 7 | 0,2045 | 0,5022 | 0,7020 | 0,6867 | 0,8982 | 1,0000 |

4.2 CORREÇÃO GEOMÉTRICA DA IMAGEM

Devido ao tamanho da imagem original ser bastante extensa, recobrimo a totalidade do litoral paranaense, selecionou-se um total de 80 pontos de controle no terreno (GCP) bem distribuídos na área de estudo. Os GCPs de fácil acesso e identificação na imagem foram coletados por meio de um GPS geodésico e apresentaram uma precisão superior a ± 5 m.

Para a retificação foi utilizado o método do vizinho mais próximo, que apresenta a vantagem de não alterar os valores de brilho da imagem. O valor do RMS atingido pelo processo de retificação foi menor que um pixel (em torno de 0,83 pixel), de acordo com o recomendado por CROSTA (1993). Após a correção geométrica, a imagem foi recortada de modo a conter

apenas a área de estudo que foi submetida ao processamento digital e posterior classificação.

4.3 REALCE DAS IMAGENS E TRANSFORMAÇÕES ESPECIAIS

As bandas originais utilizadas neste estudo se apresentavam sem contraste, dificultando a interpretação visual das mesmas. Foi necessário aplicar algumas técnicas de contraste, realizar algumas transformações especiais, como a análise por componentes principais, índices vegetativos e transformação *tasseled cap* para facilitar a extração de informações temáticas deste conjunto de dados.

Aumento de contraste

Devido às limitações do sensor e das características físicas do processo de aquisição de dados, toda imagem LANDSAT-5 TM bruta apresenta-se escura, com pouco contraste. Para uma inspeção visual, muitas vezes é necessário aumentar o contraste da imagem, a fim de garantir um maior discernimento dos alvos e objetos da cena.

As bandas originais foram contrastadas linearmente, apenas para a inspeção visual de bandas ou composições. A principal característica do contraste linear é a distribuição da amplitude original dos valores de brilho em um novo espaço, definido em 256 níveis de cinza. Bandas contrastadas não foram usadas para as transformações especiais, tão pouco para as classificações. Cabe salientar que esta técnica é utilizada apenas para a interpretação visual, uma vez que o aumento de contraste altera o valor radiométrico dos pixels e compromete o resultado de uma classificação digital.

Análise por Componentes Principais

Existem muitas técnicas para transformações especiais aplicadas às imagens, sendo a análise por componentes principais a mais conhecida, devido à facilidade de sua implementação. Entretanto, sua utilização está mais restrita a trabalhos acadêmicos, enquanto sua aplicação na área comercial, ainda é pouco difundida no Brasil.

Como já foi mencionado, a correlação existente entre os dados provenientes da maioria dos sensores remotos prejudica os trabalhos de interpretação, classificação e

processamento das imagens. A aplicação da análise por componentes principais (PCA), para a redução da redundância entre as bandas, facilita e aumenta a eficiência computacional do processamento das imagens, além de comprimir a informação contida no conjunto original de bandas em um número menor de componentes (bandas). As novas imagens criadas pela aplicação da PCA podem ser usadas para uma melhor identificação de certos tipos de cobertura vegetal.

Aplicou-se, inicialmente, a PCA em todas as 6 bandas originais (Figura 07). Segundo QUINTANILHA (1990), uma das vantagens da PCA é que as novas imagens associadas a cada um dos componentes principais têm variâncias ordenadas, ou seja, o primeiro componente concentra a maior quantidade de variação, enquanto o último componente, a menor.

Com a aplicação da PCA, obteve-se uma matriz de autovalores (Tabela 06) que representam o comprimento dos eixos das componentes principais de uma imagem e são medidos em unidades de variância. Para facilitar o entendimento da contribuição de cada componente principal (PC), os autovalores são transformados em porcentagem.

Segundo BRITES (1996), a variância estatística nas imagens multiespectrais está relacionada com a resposta espectral dos vários materiais presentes na superfície da terra (rochas, vegetação, solos, etc.) e com a dimensionalidade dos dados.

Tabela 06 – Variância de cada componente (todas as bandas).

| Componente | Variância (%) | Variância Acumulada (%) |
|-------------------|----------------------|--------------------------------|
| PC-1 | 82,3350 | 82,3350 |
| PC-2 | 11,1048 | 93,4398 |
| PC-3 | 5,5616 | 99,0015 |
| PC-4 | 0,6196 | 99,6211 |
| PC-5 | 0,2523 | 99,8734 |
| PC-6 | 0,1266 | 100,0000 |

No caso das imagens utilizadas neste estudo, o primeiro componente (PC-1) absorve 82,33% da variação total da cena. O PC-2 absorve somente 11,10% da variação e o PC-3 absorve 5,56. Os três primeiros componentes totalizam 99% da variação existente no conjunto original de dados. Os três últimos componentes concentram os ruídos e efeitos indesejáveis existentes no conjunto de imagens e acrescentam muito pouco ao total de informações, representado pelos três primeiros PCs e foram descartados.

Figura 07 - Aplicação de análise por componentes principais.



1ª componente



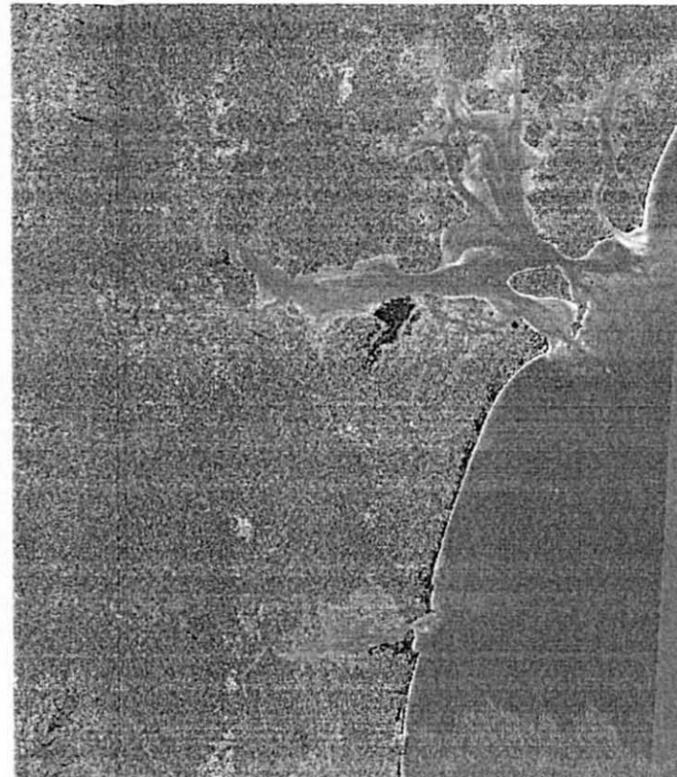
2ª componente



3ª componente



4ª componente



5ª componente



6ª componente

Os autovetores representam as direções dos eixos dos componentes principais. São fatores de ponderação que definem a contribuição de cada banda original, na composição de um componente principal (INPE, 1997b). Na matriz de autovetores (Tabela 07), observam-se as bandas que mais contribuem com informações para cada PC.

Tabela 07 – Matriz de autovetores

| Banda | PC-1 | PC-2 | PC-3 | PC-4 | PC-5 | PC-6 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0,0737 | 0,8787 | -0,1831 | 0,3757 | -0,1589 | -0,1500 |
| 2 | 0,0721 | 0,3239 | 0,0043 | -0,3284 | 0,2397 | 0,8512 |
| 3 | 0,1043 | 0,3069 | 0,1597 | -0,7248 | 0,3150 | -0,4949 |
| 4 | 0,7218 | -0,1607 | -0,6545 | -0,1302 | -0,0857 | -0,0227 |
| 5 | 0,6596 | -0,0178 | 0,6367 | 0,3240 | 0,2328 | 0,0071 |
| 7 | 0,1496 | 0,0510 | 0,3274 | -0,3221 | -0,8698 | 0,0870 |

Desta forma, para o PC-1, as bandas 4 e 5 estão contribuindo com mais informações, as bandas 7 e 3, com menos e as bandas 1 e 2, com quase nenhuma. Para o PC-2, as bandas que mais contribuem são as 1 e 2, seguidas por 3 e 7, sendo as que menos contribuem são as 4 e 5. Este mesmo raciocínio é aplicado para as bandas subsequentes.

O PC-1 contém a informação de brilho associado às sombras de topografia e às grandes variações da reflectância espectral geral das bandas (Figura 7). A informação topográfica e o contraste entre os alvos vão diminuindo gradativamente nos PCs subsequentes, devido à diminuição do sombreamento e da variância, indicando a redução da dimensionalidade, ao concentrar a informação nos primeiros PCs. O PC-3 e o PC-4 contêm tipicamente menos estrutura da imagem e mais ruído que as primeiras, indicando a compressão dos dados nos primeiros canais. O último componente representa basicamente o ruído existente nos dados originais.

O PC-1 tem comportamento oposto ao do PC-2, quanto à sua formação. Enquanto o primeiro componente recebe maior contribuição das bandas do infravermelho (4, 5 e 7), o segundo componente acolhe dados das bandas do visível (1, 2 e 3).

As feições topográficas na imagem são destacadas pelo PC-1, permitindo também uma grande separação entre os corpos d'água e os alvos no continente. Os

núcleos urbanos também aparecem bem. Este componente concentra toda variância da cena, principalmente àquelas provenientes das bandas do infravermelho, como conseqüência, as informações sobre vegetação também são concentradas neste componente, por este motivo, a vegetação, se mostra de maneira muito homogênea, dificultando a separação entre as diferentes fisionomias florestais, porém ocorre um contraste entre as áreas florestadas e algumas categorias de uso de solo, principalmente áreas de pastagem, povoamentos e capoeirinhas.

O PC-2 é de difícil interpretação, caracteriza-se pela ausência de informação topográfica (ou é mostrada “de forma invertida”) e a vegetação aparece de forma discreta. As áreas de antropismos são bem evidenciadas por apresentarem áreas escuras na imagem, chamando a atenção de quem as observa, sendo possível em alguns casos detalhar o tipo de uso de solo. Este componente também destaca alguns tipos de áreas úmidas, como brejos e depressões, entre os cordões litorâneos.

Com o PC-3, também, não se obtém informações relevantes à vegetação, sendo possível extrair algumas informações sobre a vegetação. No entanto, as áreas de antropismos aparecem bem, sendo possível detalhar o tipo de uso do solo. As áreas úmidas também podem ser analisadas neste componente. Os demais componentes são de difícil interpretação e apresentam muitas interferências e pouca estrutura e informação, não sendo utilizadas neste trabalho.

Como o resultado obtido com a aplicação da PCA, em todas as bandas foi bastante satisfatório e diante do comportamento durante a formação de cada PC, decidiu-se aplicar a PCA em *triplets* de bandas. O primeiro trio foi composto com as três bandas do visível e o segundo, com os três canais do infravermelho (Figura 08).

Este procedimento além de reduzir a dimensionalidade dos dados, reduz muito a correlação dentro destes dois *triplets*, resultando em duas imagens PCVI-1 (PC das bandas do visível) e PCIR-1 (PC das bandas do infravermelho) que concentram as informações presentes nos dados originais, contribuindo com mais duas importantes bandas para as composições coloridas.

Através da matriz de autovalores para estas duas bandas (Tabelas 08 e 09) pode-se observar que PCVI-1 concentra 89,56% da variância das bandas do visível,

enquanto o PCIR-1, apresenta 93,37% da variância total das bandas do infravermelho.

Tabela 08 – Variância de cada componente (bandas do visível).

| Componente | Variância (%) | Variância Acumulada (%) |
|---------------|---------------|-------------------------|
| PCVI-1 | 89,5637 | 89,5637 |
| PCVI-2 | 9,4262 | 98,9899 |
| PCVI-3 | 1,0101 | 100,0000 |

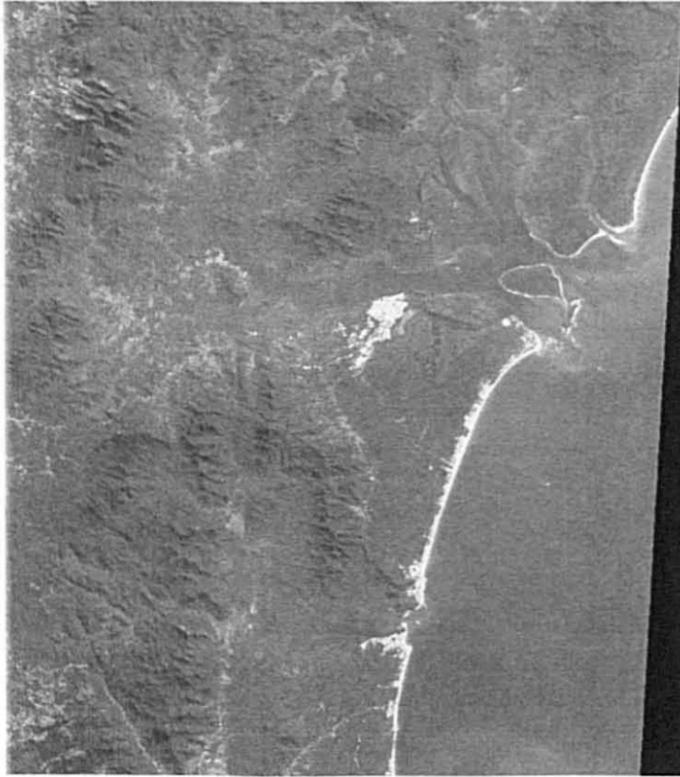
Tabela 09 – Variância de cada componente (bandas do infravermelho).

| Componente | Variância (%) | Variância Acumulada (%) |
|---------------|---------------|-------------------------|
| PCIR-1 | 93,3710 | 93,3710 |
| PCIR-2 | 6,2462 | 99,6171 |
| PCIR-3 | 0,3829 | 100,0000 |

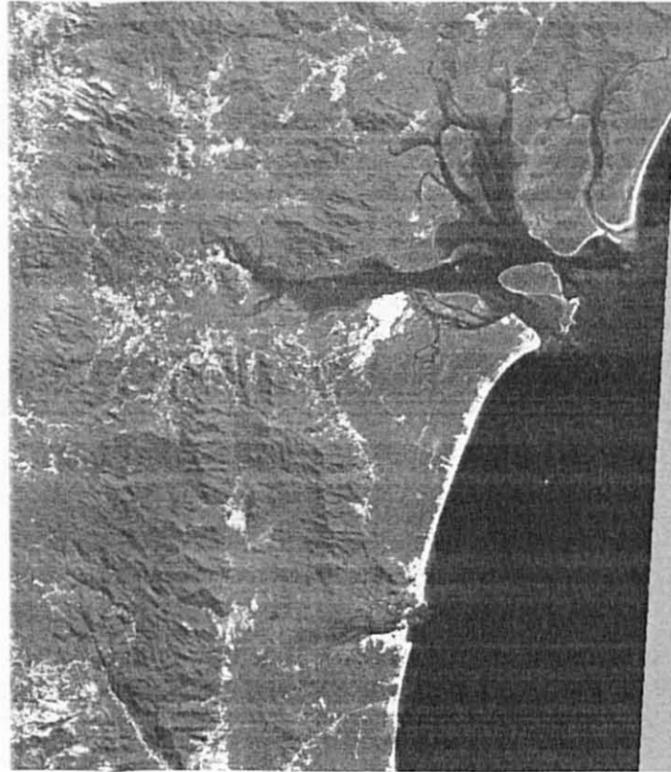
A interpretação visual do PCIR 1 indica ter um comportamento muito semelhante ao do PC1, porém não contém a variância de bandas do visível. Os corpos d'água, apresentam-se muito escuros, permitindo um bom delineamento das áreas onde ocorrem. A vegetação aparece de forma bem clara e, apesar de bastante homogênea, é possível diferenciar algumas classes. O PCVI 1, concentra as variâncias das bandas do visível, sendo possível identificar os antropismos com muita facilidade. As informações sobre vegetação são de difícil observação, quando comparada com a banda 3 original, possivelmente isto se deve à concentração dos dados das bandas do visível, neste componente que “esconde” a vegetação.

A utilização de determinados PCs em composições coloridas, combinados com bandas normais, produzem excelentes resultados, principalmente na diferenciação de tipologias florestais, como no caso da utilização da PC3 combinados com as bandas 5 e 4 normais ou na utilização da PCVI 1 e PCIR 1 combinados com alguma banda original ou com algum índice vegetativo.

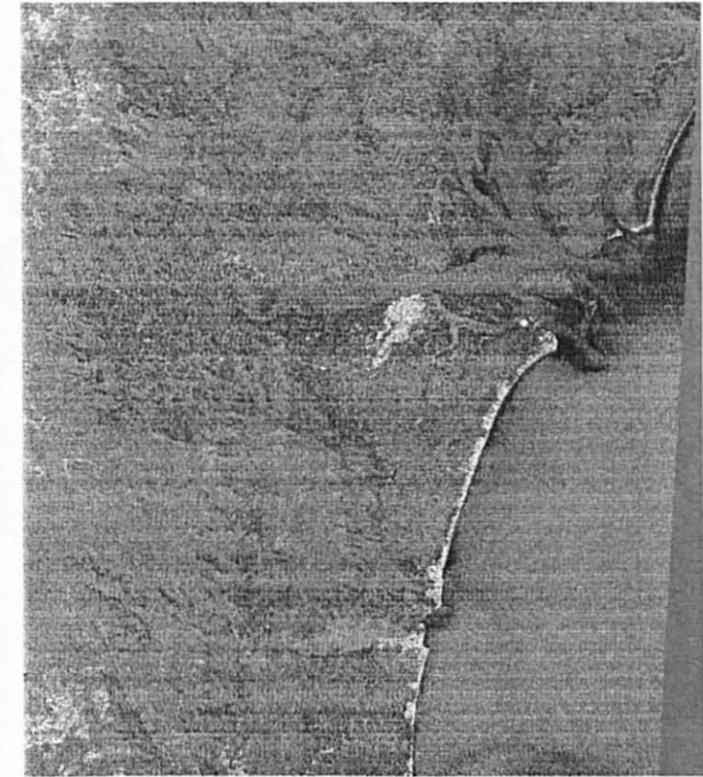
Figura 08 - Análise por componentes principais, nas bandas do visível e do infravermelho.



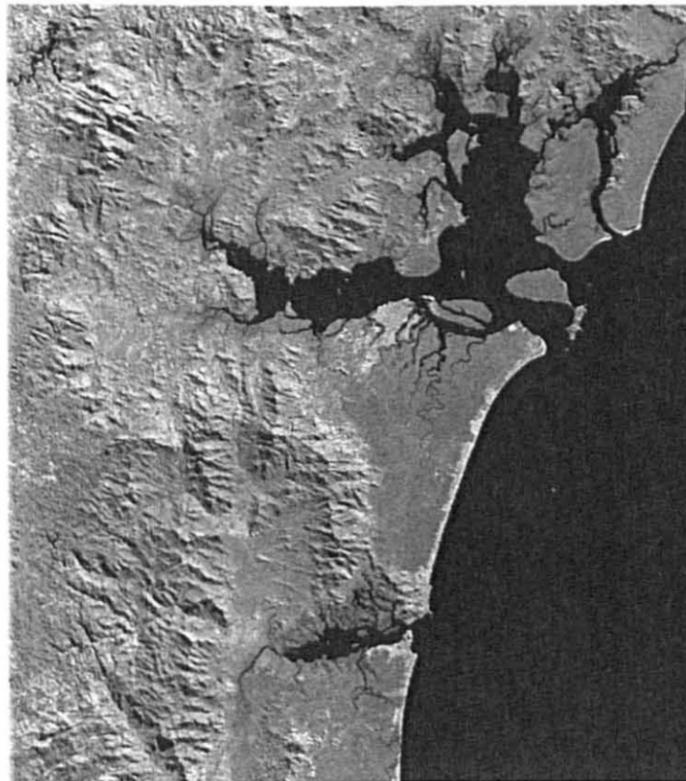
1ª componente (visível)



2ª componente (visível)



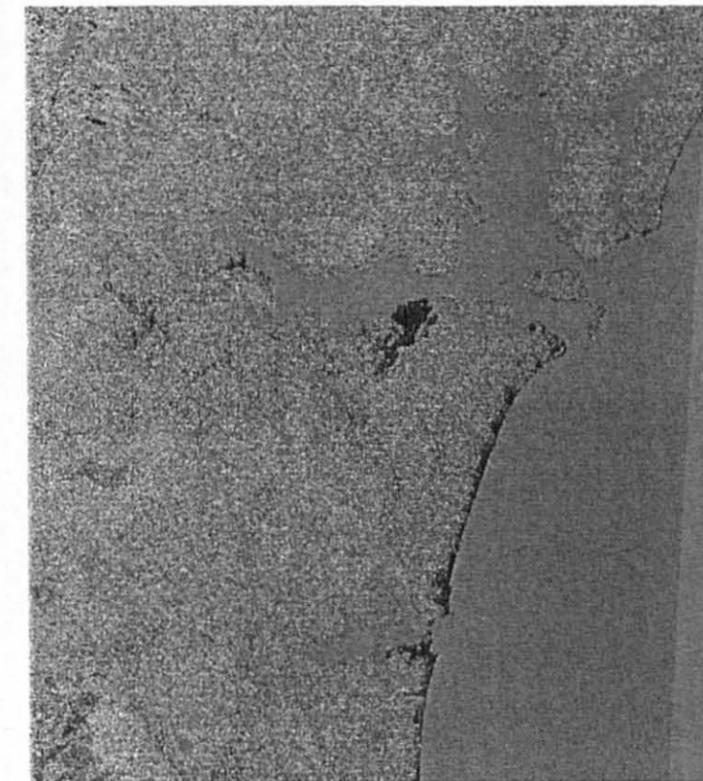
3ª componente (visível)



1ª componente (infravermelho)



2ª componente (infravermelho)



3ª componente (infravermelho)

Índices de Vegetação

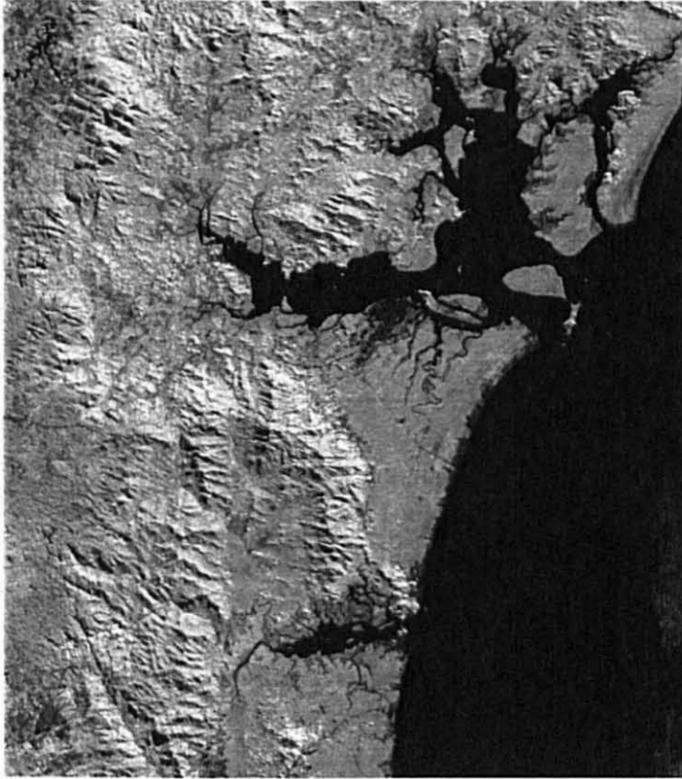
Índice de Vegetação é o nome genérico dado àquelas operações algébricas, envolvendo dados multiespectrais, que têm como principal objetivo a redução do número de bandas (dimensionalidade) a um único valor digital que realce alguma feição ou característica vegetal. Em estudos com vistas a mapeamento de vegetação, qualquer informação adicional que aumente o discernimento entre as classes vegetais é bem-vindo.

Na tabela 10 são apresentados os índices de vegetação e a descrição de seu resultado no discernimento das categorias informacionais são apresentadas nas Figuras 9 e 10.

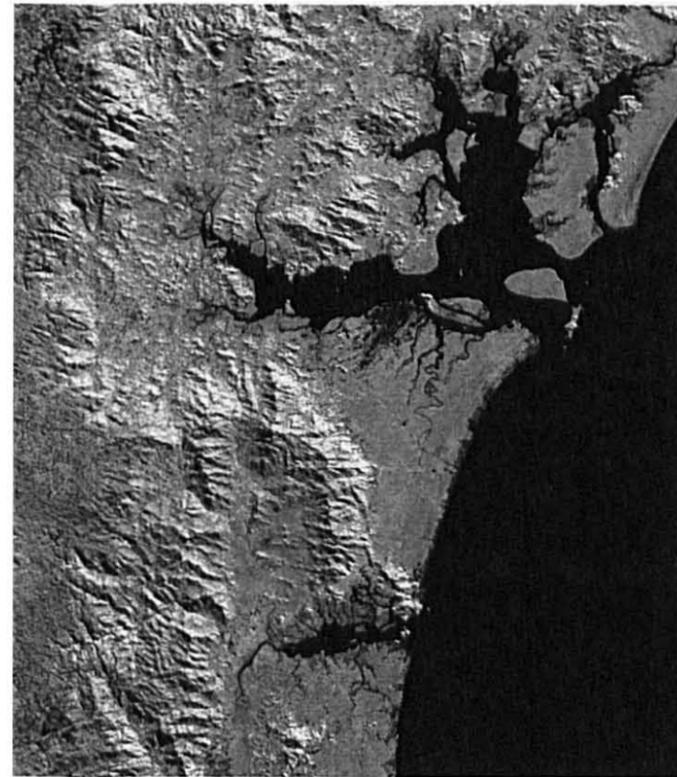
Tabela 10 – Índices de Vegetação

| Índices de Vegetação | Descrição | Resultado |
|----------------------|---|--|
| RVI | Índice de Vegetação pela Divisão de Bandas | Evidencia áreas de Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha e algumas de Fluvial. O restante da vegetação da planície litorânea é generalizado. Também destaca alguns tipos de antropismos (Figura 9a). |
| DVI | Índice de Vegetação pela Diferença de Bandas | Resultado semelhante ao RVI, porém os antropismos não aparecem tão bem (Figura 9b). |
| NDVI | Índice Normalizado de Diferença de Vegetação | Má separabilidade de classes de vegetação. O contraste entre áreas florestais e antropizadas são destacadas (Figura 9c). |
| SAVI | Índice de Vegetação com Ajuste de Solo | Resultado semelhante ao NDVI (Figura 9d). |
| MSAVI2 | Índice de Vegetação com Ajuste de Solo Modificado | Índice de difícil interpretação. As classes de vegetação não são separadas satisfatoriamente (Figura 9e). |
| TVI | Índice de Vegetação Transformado | Ineficiente na separação de classes de vegetação. O resultado apresentado é de difícil interpretação (Figura 10a). |
| NDWI | Índice Normalizado de Diferença de Água | Eficiente no contraste entre corpos d'água e o continente. Não evidencia a umidade do solo (Figura 10b). |
| R42 | Operação aritmética entre bandas | Boa separabilidade de classes, semelhante ao RVI (Figura 10b). |
| EQ | Operação aritmética entre bandas | Boa separabilidade de classes para a inspeção visual, discrimina bem a vegetação (Figura 10c). |

Figura 09 - Índices vegetativos: RVI, DVI, NDVI, SAVI e MSAVI2.



RVI



DVI



NDVI



SAVI



MSAVI

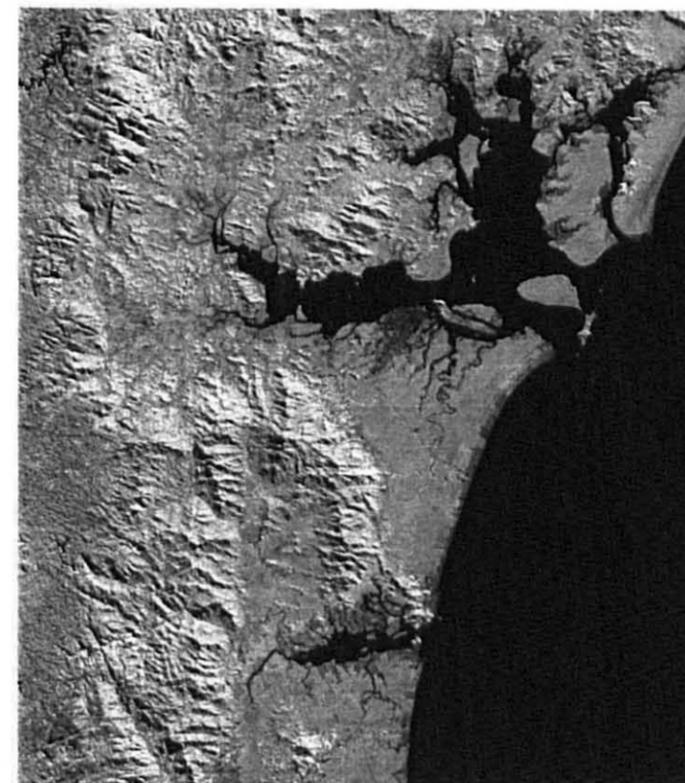
Figura 10 - Índices vegetativos: TVI, NDWI, R42 e EQ.



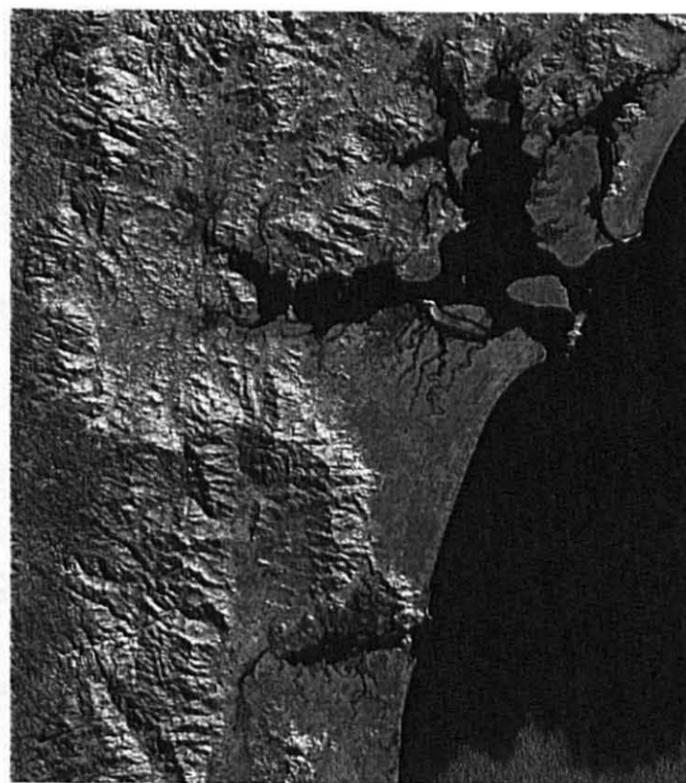
TVI



NDWI



R42



EQ

O índice normalizado de diferença de vegetação (NDVI) é amplamente utilizado em estudos sobre vegetação baseados em imagens de sensoriamento remoto. Porém, em algumas pesquisas, é utilizado sem muito critério, servindo apenas como dado adicional, trazendo poucas respostas. Neste trabalho, o NDVI não forneceu resultados satisfatórios na discriminação de classes de vegetação, porém o contraste entre áreas de antropismos e florestas é bem nítido. De acordo com SADER; STONE & JOYCE (1990) e TEILLET; STAENZ & WILLIAMS (1997), este resultado pouco expressivo do NDVI deve-se à resolução espacial, espectral e radiométrica do sensor utilizado, além da escala de trabalho.

Ao contrário do que ocorre com o NDVI proveniente de dados de LANDSAT TM, o produzido a partir de dados do NOAA AVHRR apresenta desempenho muito satisfatório ao realizar mapeamentos de vegetação em escala continentais e globais, apesar de não ser indicado para trabalhos florestais, por ser concebido para atividades meteorológicas e trabalhar com bandas espectrais inapropriadas para esse propósito, (FOODY & HILL, 1966). Isto ocorre devido a fatores como resolução do sensor e, principalmente, escala do mapa e detalhamento da vegetação. Em escalas pequenas, a diferenciação de biomas ou grandes unidades fitofisionômicas é muito mais fácil que diferenciar unidades fitogeográficas em escala regional ou local, como no caso deste trabalho. Sob o ponto de vista da escala continental ou global, não há diferença entre Áreas de Formação Pioneira de Influência Marinha e Fluvial e os subtipos de Floresta Ombrófila Densa encontrados no litoral do Estado do Paraná.

Os índices de vegetação tradicionais, como o NDVI e o RVI, são muito sensíveis aos efeitos do tipo de solo e da atmosfera. Segundo RONDEAUX; STEVEN & BARET (1996), este problema levou ao desenvolvimento de novos índices menos sensíveis a influências externas, dentre eles destacando-se: SAVI, MSAVI, TSAVI (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index) e GEMI (Global Environment Monitoring Index). Apesar de serem teoricamente mais confiáveis que o NDVI, estes índices não são muito empregados, provavelmente pela falta do hábito da utilização de índices de vegetação, em especial daqueles pouco difundidos.

O índice de vegetação com ajuste para solos (SAVI) parte do princípio de que a reflectância espectral da cobertura vegetal é a combinação da reflectância espectral da planta e dos componentes do solo. De acordo com este raciocínio, os componentes do

solo exercem mais influência nas áreas de vegetação baixa ou em estágios iniciais de sucessão, que em áreas de vegetação mais desenvolvida, ou mais alta (Figura 09).

Deste modo, para cada densidade de vegetação existe um fator de ajuste “L”, cujo valor pode variar de 0 (zero) a 1. Nos locais de altíssima densidade, $L=0$ (neste caso $SAVI=NDVI$). No caso do litoral paranaense, existem áreas de altíssima densidade ($L=0$) de alta densidade ($L=0,25$) e de densidade intermediária ($L=0,5$), os locais de baixa densidade de vegetação ($L=1$) são em menor número e ocorrem em áreas com forte antropização e em formações vegetais de fase inicial de sucessão.

O resultado obtido é bastante semelhante ao NDVI, principalmente por se tratar de áreas de vegetação naturalmente densa, onde a reflectância espectral dos componentes de solo não afetam de maneira significativa a imagem. Tanto o SAVI como o NDVI são eficientes em contrastar as áreas florestadas e desflorestadas, devido a forte tendência que possuem para indicar alterações na quantidade de biomassa.

Segundo LEITE (1994), a região da Floresta Ombrófila Densa do sul do Brasil desenvolve-se em um ambiente, cujas condições topográficas e atmosféricas garantem altos índices de umidade, responsáveis por esta tipologia florestal, onde uma das características mais marcantes é a grande produção de biomassa. Os índices de vegetação são muito empregados para a detecção do vigor vegetal em grandes espaços, devido à sua propriedade de concentrar as informações relativas ao “verdor” (*greeness*), indicando com propriedade as regiões de déficit hídrico, baixa produção de biomassa, sendo utilizado para monitoramento de vegetação, mapeamento de biomas, dentre outras aplicações, na maioria dos casos em escala continental ou global (CHUVIECO, 1990; LILLESAND & KIEFER, 1994). Isto responde ao fraco desempenho dos índices de vegetação para separar as diferentes tipologias vegetacionais na planície costeira, mas justifica a sua boa atuação na diferenciação entre as áreas vegetadas e antropizadas. O MSAVI2 (índice de vegetação com ajuste para solos modificado 2) é outro tipo de índice utilizado para reduzir as interferências do solo, porém é de difícil interpretação visual. (Figura 10).

A operação aritmética EQ, apresentou resultados muito bons, separando bem algumas classes de vegetação, os corpos d’água, mas não destacou os antropismos. Deste modo, EQ pode ser indicada como uma banda a ser utilizada em *triplets* para analisar a vegetação.

Tasseled Cap

Com a transformação *tasseled cap*, obtiveram-se três novas bandas sintéticas, que de forma análoga a transformação por componentes principais, realiza a compressão dos dados das seis bandas originais em três canais: *brightness* (B), *greenness* (G) e *wetness* (W).

Com a utilização da banda *brightness* foi possível detectar o contraste de áreas com vegetação e sem vegetação. Esta banda se apresenta com um resultado bastante similar com o primeiro componente principal PC-1, destacando as feições topográficas na imagem, percebe-se com muita clareza os centros urbanos. A vegetação se mostra de maneira muito homogênea, dificultando a separação entre as diferentes fisionomias florestais, porém, ocorre um contraste entre as áreas florestadas e algumas categorias de uso de solo, principalmente áreas de pastagem, povoamentos e capoeirinhas. Este resultado é reflexo do comportamento espectral da vegetação, ao absorver a radiação no espectro visível e refletir, de forma muito espalhada, a radiação da faixa do infravermelho.

A banda *greenness* concentra informações sobre a vegetação, porém pela interpretação visual não é fácil extrair informações. Os antropismos não são bem destacados. Enquanto a banda *wetness* é utilizada para discriminar o coeficiente de umidade no solo e diferenças de umidade nas copas das árvores, também é de difícil análise visual.

A composição colorida BGW, mostra-se muito eficiente ao separar bem as diferentes classes de uso do solo e de vegetação (Figura 11). Percebe-se uma clara separação dos manguezais e com algum cuidado, pode-se localizar as áreas de Formação Pioneira de Influência Marinha (restinga), e de Influência Fluvial. Pode-se separar bem a vegetação de planície e de encosta, com algum destaque para a Floresta Ombrófila Densa Altomonta. Os antropismos também são bem discriminados, podendo-se identificar bem algumas classes.

4.4 COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA COR

Apesar de ser possível e até mesmo ser usual a utilização de bandas isoladas para interpretação visual e classificação digital, as composições coloridas apresentam-se como melhor opção para estas finalidades. O grande problema quando se possui muitas

bandas é a quantidade de combinações possíveis. A vasta bibliografia existente afirma que no caso do sensor LANDSAT-5 TM, a melhor combinação de bandas para o estudo da vegetação é o *triplet* 5-4-3, porém as outras bandas podem auxiliar no discernimento de alvos localizados em locais mais úmidos ou combinados com outros elementos da geomorfologia.

Com o objetivo de encontrar outras combinações úteis de bandas, utilizou-se a fórmula proposta por CHAVES (*op. cit.*) para que as composições pudessem ser ordenadas de acordo com o melhor fator de índice ótimo - OIF (Tabela 11). Valores altos de OIF representam *triplets* de bandas com mais informações (dado pela variância) e com menor redundância (dado pela correlação).

A melhor combinação entre as bandas originais é a 1-4-5 com OIF próximo a 35. Para a imagem da área de estudo, combinações com bandas tradicionais como 3-4-5, 4-5-7 e 2-3-4 não foi obtido um bom OIF.

Tabela 11 – Fator de Índice Ótimo para *triplets* de bandas originais

| Combinação de bandas | OIF | Combinação de bandas | OIF | Combinação de bandas | OIF |
|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| 145 | 35,0088 | 135 | 19,5322 | 235 | 12,3605 |
| 147 | 29,0094 | 125 | 18,8978 | 357 | 11,3384 |
| 157 | 22,8849 | 247 | 16,2882 | 137 | 10,5494 |
| 134 | 22,7881 | 457 | 15,8355 | 127 | 10,3137 |
| 245 | 21,6959 | 234 | 14,5542 | 123 | 6,5640 |
| 124 | 20,6987 | 347 | 14,2881 | 237 | 5,8489 |
| 345 | 19,5383 | 257 | 13,1672 | -- | -- |

A aplicação de análise por componentes principais e índices de vegetação, possibilitou a geração de um novo conjunto de imagens que pode ser aproveitado na formação de outras composições coloridas. A partir de uma matriz de correlação (Anexo 01) de todas as bandas (originais e processadas, exceto as provenientes da transformação *tasseled cap*) selecionaram-se as que possuíam pouca correlação, para a confecção de uma nova tabela de OIF (Anexo 02) .

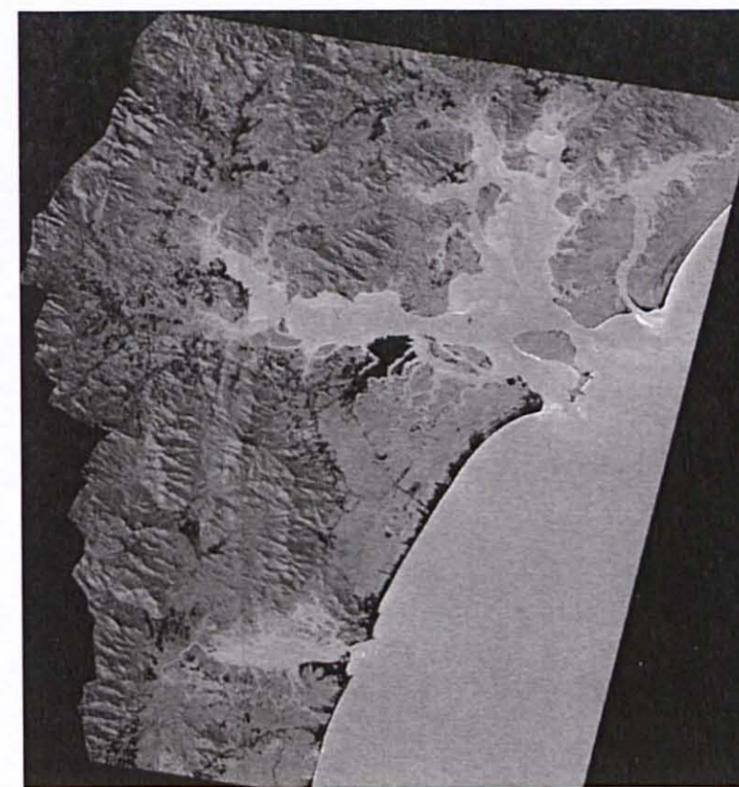
Figura 11 - Transformação Tasseled Cap: bandas *brightness*, *greeness* e *wetness* e composição colorida B-G-W (RGB).



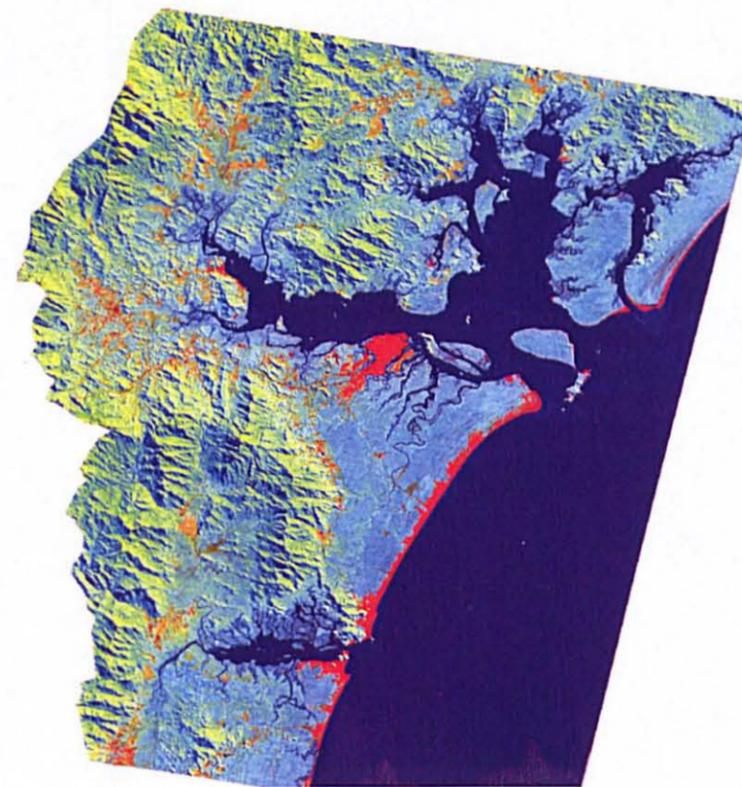
a) Brightness



b) Greeness



c) Wetness



d) brightness-greeness-wetness (RGB)

Os *triplets* com melhor desempenho em OIF foram: 2-7-NDWI; 2-4-PCA3; 1-5-PCA3 e PCIR1-PCVI1-PCA3. Todas as composições coloridas contendo NDWI combinado com bandas originais não apresentaram um bom desempenho visual, devido à tendência deste índice realçar somente os locais onde ocorrem águas abertas. Porém, este índice ao ser combinado com componentes principais, produzem composições bastante úteis para a manipulação visual, apesar das cores fortes e saturadas, como o apresentado pela composição PC2-PC1-NDWI.

Composições Coloridas Selecionadas

Nem sempre *triplets* com bons valores de OIF produzem composições com bom desempenho visual ou apropriadas para classificação digital. Dentre as várias combinações testadas, destacam-se:

Tabela 12 – Composições coloridas selecionadas

| Composição (RGB) | OIF | Descrição |
|------------------|-------|---|
| PCA3-PCA1-PCA2 | -14,5 | O resultado visual é bastante satisfatório, principalmente considerando-se que esta composição concentra cerca de 99% da variância de toda a cena. Devido à tendência do PC1 concentrar informações do espectro infravermelho, enquanto o PC2 concentra dados das bandas do visível, esta composição apresenta um contraste entre as áreas de antropismo e de vegetação, porém não diferencia muito bem os diferentes tipos de Floresta Ombrófila Densa e ambientes associados. |
| 4-5-3 | 19,5 | Considerada como uma das melhores composições para a observação e análise de vegetação. Este <i>triplet</i> possibilita definir melhor os mangues, as áreas urbanas, os locais de antropismos. Porém as demais formações florestais da planície litorânea se mostram muito homogêneas, dificultando a sua separação (Figura 12a). |
| 4-5-PC3 | 93,5 | O resultado visual é semelhante à composição anterior. A presença do terceiro componente principal aumentou o destaque das áreas de antropismos e áreas úmidas e sugere uma distinção maior das áreas de mangue (Figura 12e). Porém os povoamentos florestais e as áreas de restinga não são bem evidenciadas por esta composição. |

Continua ...

...Continuação

| Composição (RGB) | OIF | Descrição |
|-------------------------|------------|--|
| PCVI1-PCIR1-PCA3 | 308,9 | Com esta composição de bandas obteve-se um ótimo desempenho na interpretação visual. Houve uma boa separabilidade das classes de uso de solo, principalmente as áreas urbanas e de influência antrópica. Esta composição colorida, separa bem os diferentes tipos de vegetação, principalmente a Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, Formação Pioneira de Influência Fluvial e Formação Pioneiras de Influência Marinha (restinga) (Figura 12b). Os mangues também apareceram muito bem. |
| B-G-W | -1963,1 | Separa bem quase a totalidade dos alvos. Esta composição é muito eficiente para comparar as áreas dos diferentes tipos de vegetação e os antropismos. Os centros urbanos são bem marcados, assim como os locais que apresentam umidade no solo (Figura 12c). Os povoamentos e os cursos d'água também são bem evidenciados. |
| PC3-G-W | -18,5 | Este conjunto de bandas não é muito boa para diferenciar os diferentes tipos de antropismo e os centros urbanos não aparecem muito bem, porém parece evidenciar mais os locais úmidos, isto pode ser devido ao fato de utilizar-se da banda <i>wetness</i> , que normalmente está relacionada com a umidade do solo, associada ao terceiro componente principal (que também apresenta algumas informações relacionadas à umidade) e a banda <i>greeness</i> . A vegetação que se desenvolve nestes locais também pode ser observada com relativa facilidade. As áreas de povoamento florestais e desmatamentos também são bem destacados (Figura 12d). |

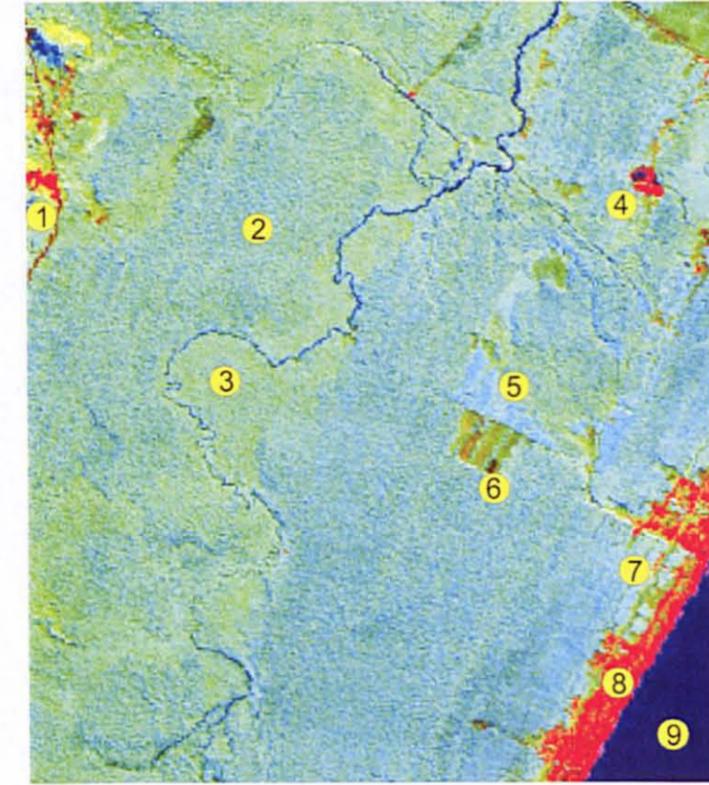
Figura 12 - Detalhe da imagem nas composições (RGB): a) 5-4-3, b) PCVI-PCIR-PC3, c) B-G-W, d) PC3-G-W



a) 5-4-3



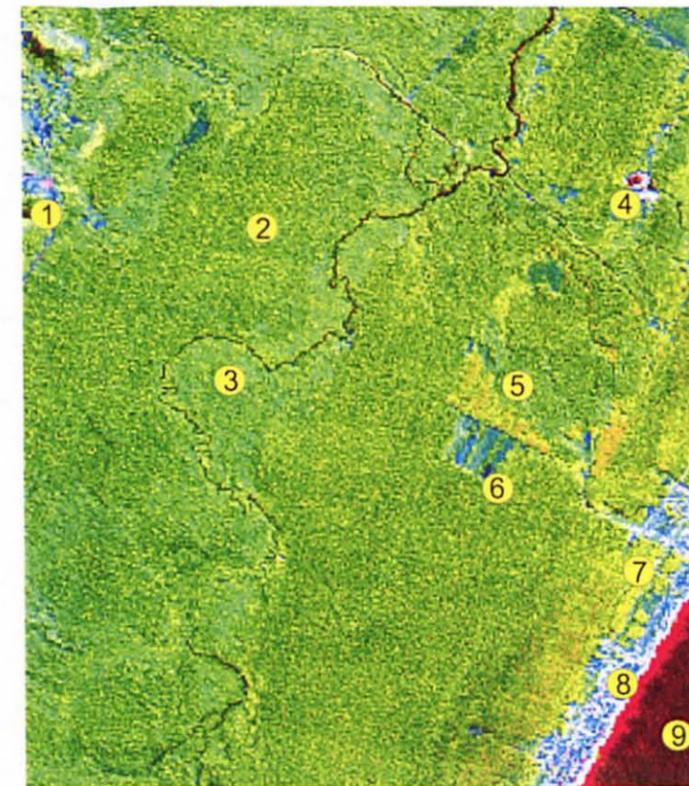
b) PCVI-PCIR-PC3



c) B-G-W



d) PC3-G-W



d) PC3-4-5

Legenda

- 1 Mineração
- 2 Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas
- 3 Formação Pioneira de Influência Fluvial
- 4 Extração de Areia
- 5 Reflorestamento
- 6 Desmatamento c/ regeneração (capoeirinha)
- 7 Formação Pioneira de Influência Marinha
- 8 Área Urbana
- 9 Oceano

B - Brightness (tassled cap)

G - Greeness (tassled cap)

W - Wetness (tassled cap)

PC3 - 3º componente principal das bandas originais

PCVI - 1º componente principal das bandas do visível

PCIR - 1º componente principal das bandas do infravermelho

4.5 CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

Classificação Supervisionada

A classificação supervisionada é o método mais empregado para associar classes espectrais da imagem a temas ou feições do terreno. Esta técnica necessita de uma grande intervenção (supervisão) por parte do pesquisador, sendo este o responsável pela determinação de quais grupos de pixels serão relacionados com as tipologias do terreno. Segundo RICHARDS (1993), é o procedimento mais usado para análises quantitativas de imagens de sensoriamento remoto.

Classificações Obtidas

Foram testados vários algoritmos classificadores, dentre estes, optou-se pela combinação entre o paralelepípedo e a máxima verossimilhança (algoritmo Para-ML do MGE *Advanced Imager*). Este classificador separou melhor as classes encontradas na planície costeira do que a utilização isolada dos classificadores da mínima distância, paralelepípedo e máxima verossimilhança. O algoritmo utiliza-se do paralelepípedo para separar os pixels de valores de brilho mais distantes e da máxima verossimilhança, para os casos de maior proximidade entre os valores de brilho.

Em todas as classificações obtidas, foram utilizadas as mesmas áreas de treinamento e as mesmas considerações estatísticas, sendo que a única diferença reside na combinação de bandas espectrais ou em transformações especiais. O algoritmo classificador foi aplicado nos seguintes conjuntos de banda: a) PCA1-PCA2-PCA3; b) PCVI-PCIR-PCA3; c) 3-4-5; d) 1-4-5; e) B-G-W; f) B-G-W-PCA3 (respectivamente, FIGURAS 13a, 13b, 14a, 14b, 15a e 15b. Estes foram selecionados, devido ao bom desempenho dos conjuntos de bandas na interpretação visual, nos resultados de OIF das composições e pelo fato de serem *triplets* de utilização tradicional.

As classificações obtidas demonstraram não haver diferenças significativas em seu resultado visual, porém, se avaliadas sob o ponto de vista de suas matrizes de erro, pode-se estabelecer uma ordenação das classificações, de acordo com sua acurácia global e índice *Kappa* (Tabela 13). As diferenças entre os resultados das classificações tornam-se mais explícitas, quando observadas no gráfico da Figura 16.

Figura 13 - Classificação supervisionada sobre os seguintes conjuntos de bandas: a) PCA1-PCA2-PCA3; b) PCVI-PCIR-PCA3.

a) PCA1-PCA2-PCA3

b) PCVI-PCIR-PCA3

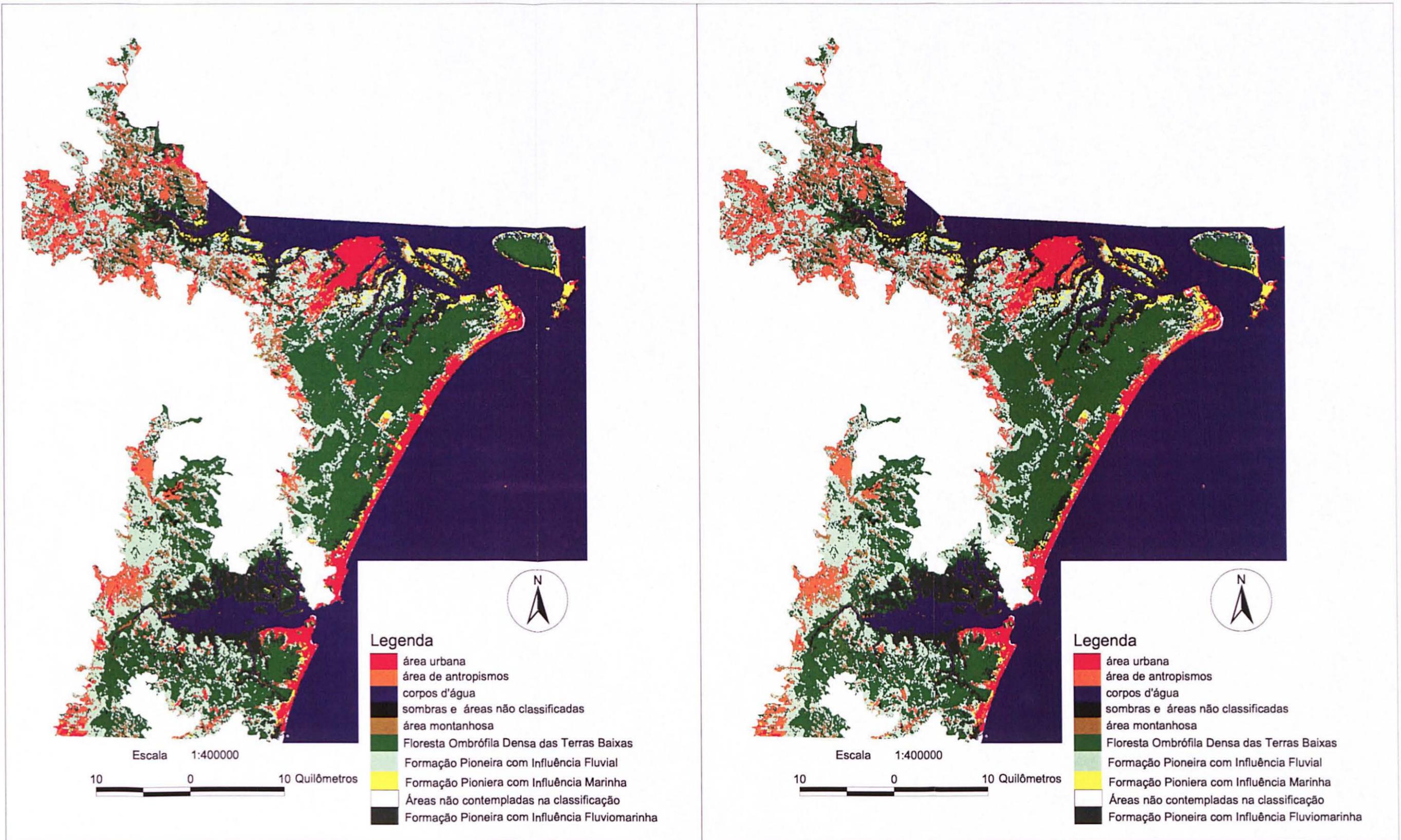
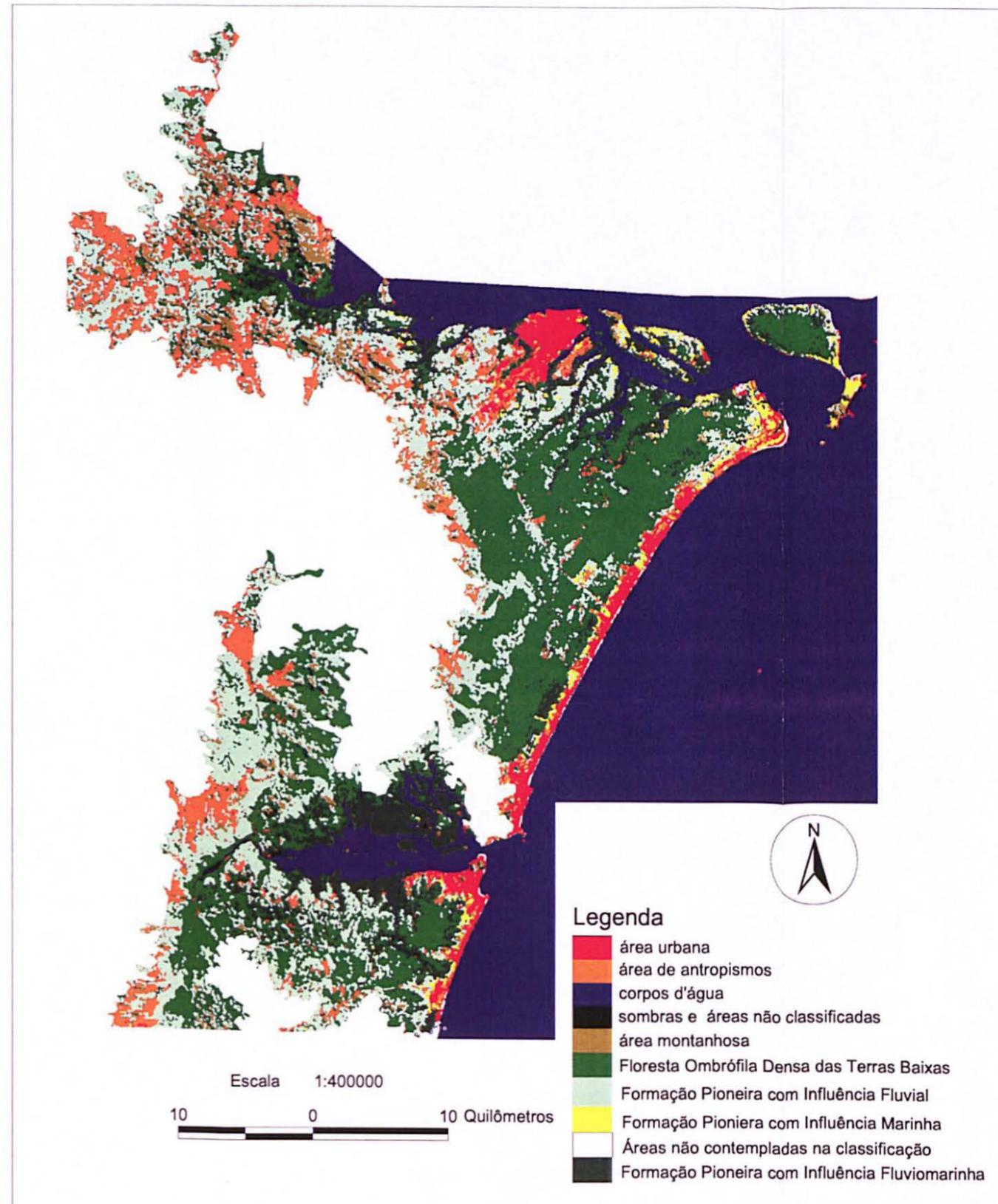


Figura 14 - Classificação supervisionada sobre os seguintes conjuntos de bandas: a) 1-4-5; b) 3-4-5.

a) 1-4-5



b) 3-4-5

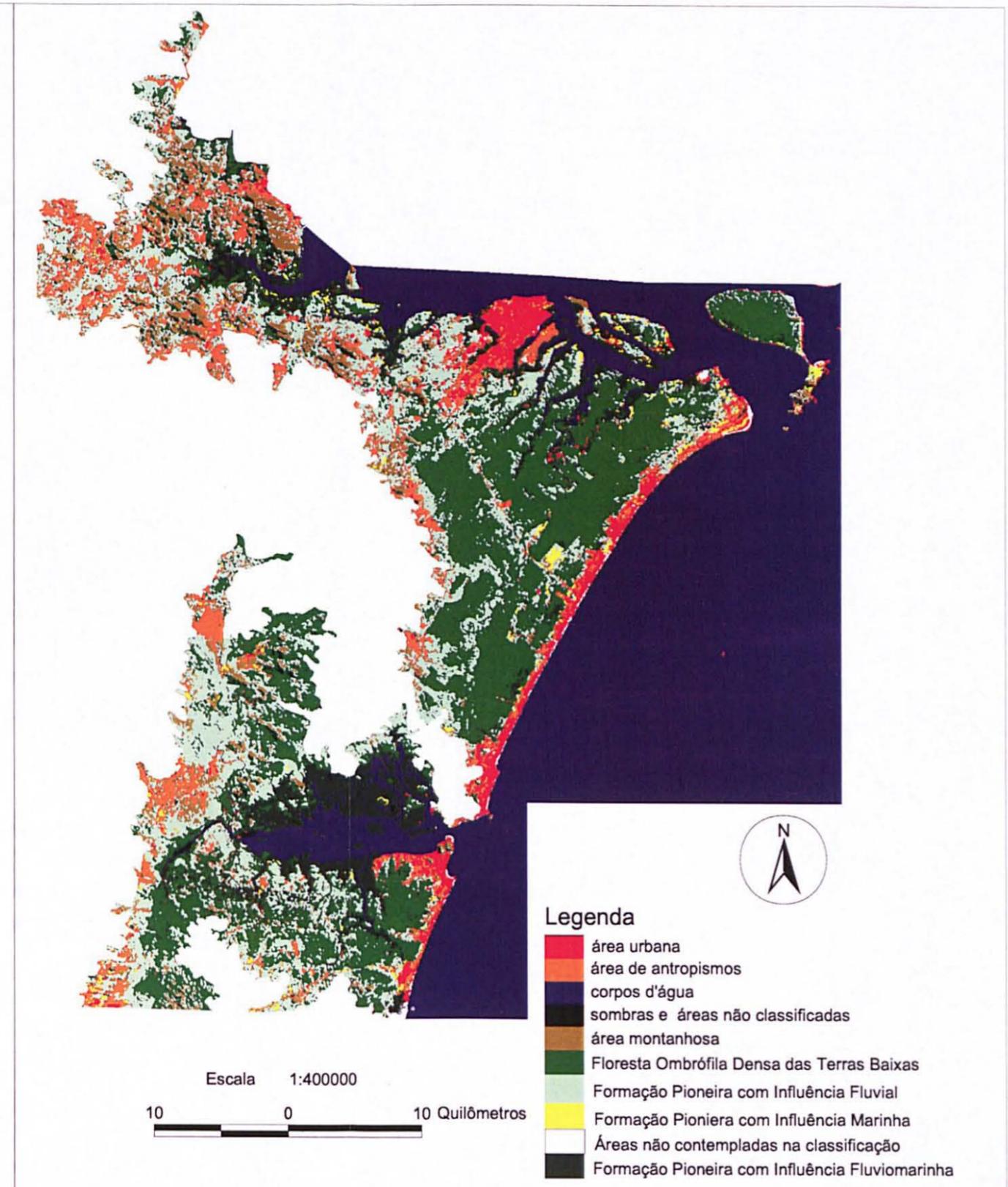


Figura 15 - Classificação supervisionada sobre os seguintes conjuntos de bandas: a) B-G-W e b) B-G-W-PCA3.

a) B-G-W

b) B-G-W-PCA3

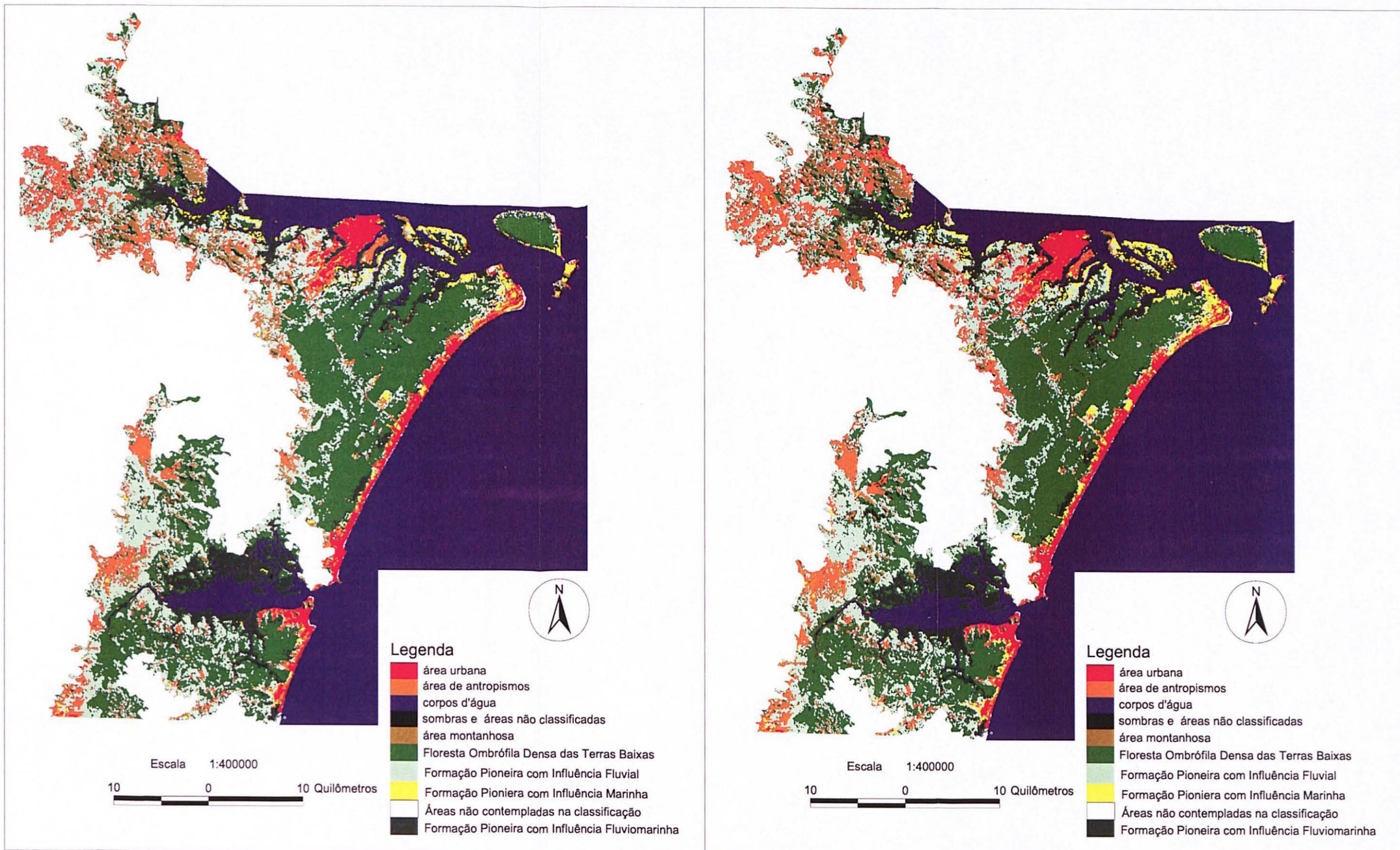
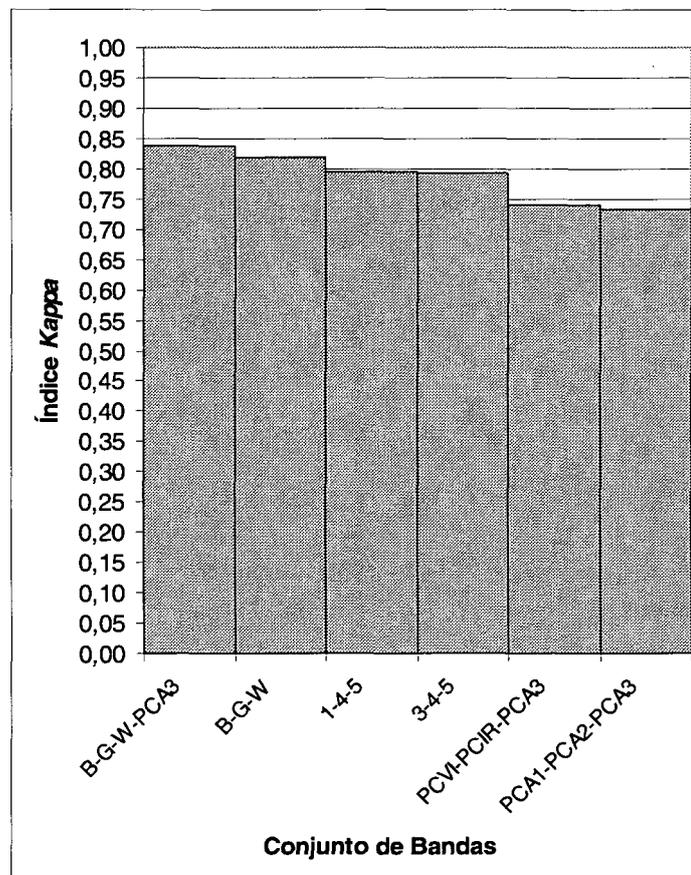


Tabela 13 – Acurácia média, global e índice Kappa das classificações selecionadas (N=300).

| Combinação de Bandas | Acurácia Global | Índice Kappa |
|----------------------|-----------------|--------------|
| PCA1-PCA2-PCA3 | 75,94% | 73,30% |
| PCVI-PCIR-PCA3 | 76,79% | 74,07% |
| 3-4-5 | 81,07% | 79,16% |
| 1-4-5 | 81,13% | 79,53% |
| B-G-W | 82,35% | 81,89% |
| B-G-W-PCA3 | 85,33% | 83,70% |

Figura 16 – Comportamento do Índice Kappa para as seis classificações de acordo com amostragem casualizada das diferentes classes envolvidas.



As classificações, nas quais os componentes principais estão presentes, apresentaram um bom resultado, obtendo uma acurácia total entre 76% e 77%. A inspeção visual revela uma boa separabilidade de classes, aproximando a classificação com a realidade

de campo. A utilização do 1º PC das bandas do visível, associado com o 1º PC dos canais do visível e com o 3º PC das bandas originais, revelou-se mais eficiente que o conjunto dos PCs das bandas originais. Cabe salientar que a análise por componentes principais, fornecem um material muito importante para a interpretação visual de imagens, permitindo conhecer melhor os dados e o comportamento dos alvos, no entanto, a classificação destes dados não acompanhou o mesmo desempenho, forneceram resultados muito bons, porém inferiores aos outros conjuntos de bandas.

Foram obtidas, com a utilização dos conjuntos de bandas do visível, 3-4-5 e 1-4-5, boas classificações, que superaram os resultados obtidos pelos componentes principais. O contrário ocorreu, durante a interpretação visual das composições coloridas, onde os *triplets* contendo os componentes principais pareceram revelar mais informações. Cabe destacar o bom desempenho da combinação de bandas 1-4-5, sobre a tradicional composição 3-4-5. Talvez o OIF maior da combinação 1-4-5, justifique este resultado. Sob o ponto de vista visual, as duas classificações foram muito semelhantes, ambas se aproximaram bastante com a realidade de campo.

Os conjuntos de bandas com os melhores resultados foram os provenientes da transformação *tasseled cap*, demonstrando um potencial promissor na discriminação do uso do solo e na identificação de tipologias florestais. Nessas duas combinações, envolvendo bandas provenientes da transformação *tasseled cap*: B-G-W e B-G-W-PCA3, a melhor classificação foi obtida com B-G-W-PCA3, que separou muito bem as classes, obtendo-se valores 85,33% de acurácia total e 83,70% de índice *Kappa* total (Tabela 14 e Tabela 15).

Nesta classificação, percebeu-se a boa identificação e delimitação da Formação Pioneira de Influência Fluviomarina, dos corpos d'água, das áreas sombreadas, montanhosas e urbanas, todos com valores de acurácia superiores a 82%. Porém, cabe salientar que, valores elevados dos índices de acurácia, não correspondem necessariamente em uma classificação fiel à realidade de campo.

Tabela 14 – Matriz de erros da classificação B-G-W-PCA3 (tamanho da amostra por classe, N=30).

| Classes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Total |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| 1 | 28 | 1 | | | | | | | 1 | | 30 |
| 2 | 4 | 22 | 1 | | | | | | 3 | | 30 |
| 3 | | | 23 | | 2 | 2 | | 1 | 2 | | 30 |
| 4 | 2 | | | 28 | | | | | | | 30 |
| 5 | | | 2 | | 27 | | | | 1 | | 30 |
| 6 | | 1 | 5 | | 1 | 22 | | 1 | | | 30 |
| 7 | | | | | | | 30 | | | | 30 |
| 8 | | 1 | | | | 2 | | 27 | | | 30 |
| 9 | | 2 | 2 | | 1 | 3 | | 3 | 19 | | 30 |
| 10 | | | | | | | | | | 30 | 30 |
| Total | 34 | 27 | 33 | 28 | 31 | 29 | 30 | 32 | 26 | 30 | 300 |

Total de Pixels Classificados Corretamente = 256 ($\sum x_{ij}, p/i = j$)

Classes: 1 – Áreas Urbanas; 2 – Áreas Antropizadas; 3 – Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas; 4 – Faixa de Areia; 5 – Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha; 6 – Formação Pioneira de Influência Fluvial; 7 – Corpos d'água; 8 – Áreas Montanhosas; 9 – Formação Pioneira de Influência Marinha; 10 – Áreas Sombreadas; 11 – Pixels Não Classificados.

Tabela 15 – Acurácia determinada para todas as classes.

| Classes | Acurácia do Produtor | Acurácia do Usuário | Índice Kappa |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|--------------|
| Áreas urbanas | 82,35% | 93,33% | 92,48% |
| Áreas de Antropismos | 81,48% | 73,33% | 70,70% |
| Faixa de areia | 100,00% | 93,33% | 92,65% |
| F. P. de Infl. Fluvial | 75,86% | 73,33% | 70,48% |
| F. P. de Infl. Fluviomarinha | 87,10% | 90,00% | 88,85% |
| F. P. de Infl. Marinha | 73,08% | 63,33% | 59,85% |
| Fl. Ombr. Densa das Terras Baixas | 69,70% | 76,67% | 73,78% |
| Áreas Montanhosas | 84,38% | 90,00% | 88,81% |
| Corpos d'água | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| Áreas Sombreadas | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Mesmo testando-se várias áreas de treinamento, e várias combinações de bandas para as classificações, não foi possível obter uma separabilidade ótima para as classes de

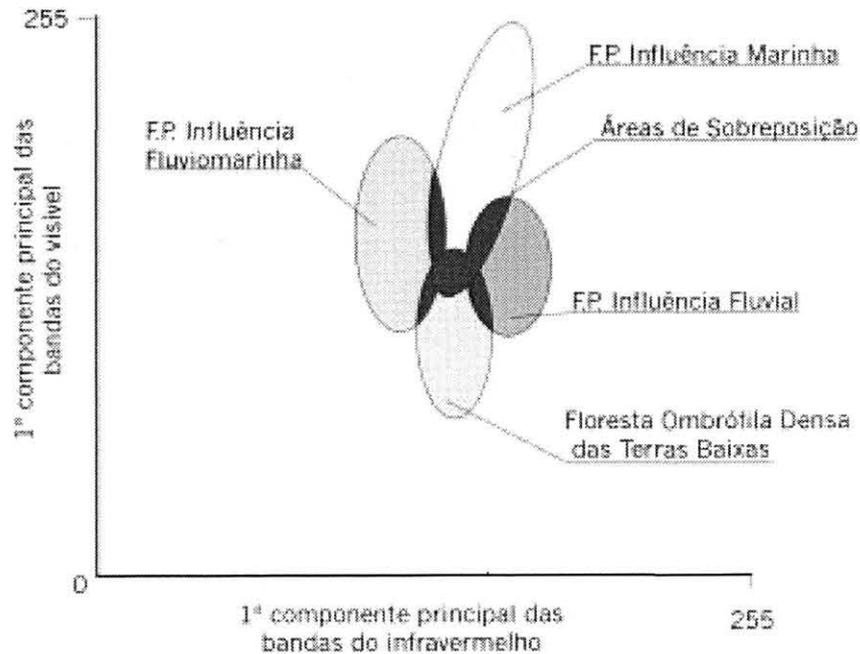
Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, Formações Pioneiras de Influência Fluvial e Marinha. A Formação Pioneira de Influência Fluvial apresentou os valores 75,86 % de acurácia do produtor, 73,33% de acurácia do usuário e 70,48% de índice *Kappa*. Muitas vezes, esta classe confunde-se com a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, com a Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha e Marinha e com as áreas de antropismos. Situação semelhante ocorre com a Formação Pioneira de Influência Marinha (índice *Kappa* = 59,85%), com muitas regiões da cena assinaladas como áreas de antropismos, mangue e várzeas pelo classificador.

Ao se observar as elipses das assinaturas espectrais para os tipos de vegetação, percebe-se a existência de sobreposições entre as classes (Figura 17). Este efeito está normalmente associado às classes de difícil distinção espectral ou a problemas na escolha das áreas de treinamento, onde blocos não homogêneos foram selecionados.

A paisagem formada pela seqüência de cordões litorâneos é responsável por um ambiente heterogêneo, no que se refere à água no solo, quando observadas em campo, em escala real. Estas variações são principalmente sentidas no conjunto de plantas que cobrem estas áreas, uma vez que podem assumir características xerofíticas (quando se localizam no topo de dunas e cordões), mélicas (quando o solo apresenta um teor equilibrado de água) ou hidrofíticas (quando o solo encontra-se encharcado, nas depressões intercordões). Neste caso, em um espaço relativamente pequeno, pode-se ter, em escala real, diferentes tipos de vegetação. Se a Floresta Ombrófila Densa é caracterizada pela grande produção e quantidade de biomassa (LEITE, 1994) algumas comunidades pioneiras também o são (produtividade primária), o que faz com que índices vegetativos ou canais espectrais responsáveis pela detecção de biomassa não separem bem estas duas situações. O conjunto destes fatores são um dos responsáveis pela proximidade entre as classes espectrais, tornando a sua separabilidade difícil.

Existem também outras fontes de interferências, como a sucessão secundária que nas fases iniciais, confundem o algoritmo classificador (efeito da proximidade espectral), atribuindo erroneamente alguns pixels de áreas antropizadas às classes de vegetação pioneira e vice versa. Devido à concentração de propriedades rurais próximas aos núcleos urbanos, este efeito concentra-se mais nestas áreas. Esta sobreposição de classes é afetada diretamente na proporção de áreas ocupadas por estas tipologias .

Figura 17 - Elipses de quatro diferentes assinaturas espectrais (ilustração simplificada).



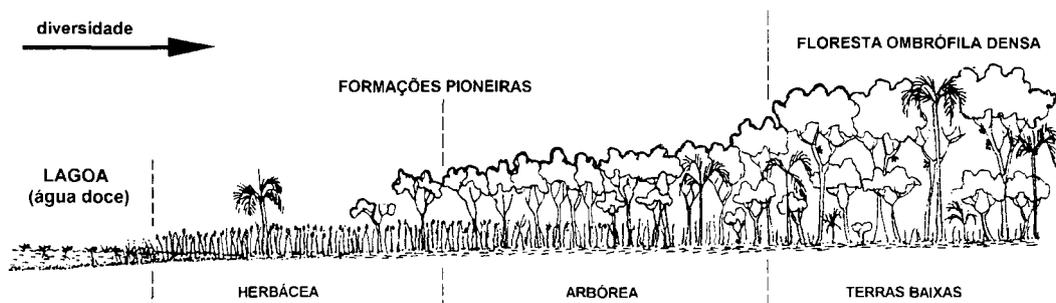
Os antropismos ocupam, atualmente, áreas expressivas e pode-se afirmar, diante do histórico de ocupação da litoral, que as áreas de vegetação primária na planície costeira estão confinadas à pequenas áreas, que dependendo da escala podem não ser mapeadas ou identificadas. Isto pode ser sentido na classificação digital, principalmente nas classes de Formação Pioneiras de Influência Fluvial, que teve a sua área ampliada além da verdade de campo, e de Formação Pioneira de Influência Marinha, que o classificador confundiu, em muitos casos, com as áreas antropizadas.

4.6 FORMAÇÃO PIONEIRA DE INFLUÊNCIA FLUVIAL

Como já foi mencionado anteriormente, a detecção das Formações Pioneiras foi influenciada pelo grau de antropismo existente, uma vez que as capoeirinhas e capoeiras freqüentemente confundem-se com as comunidades pioneiras. Além disto, a proximidade espectral entre algumas classes de vegetação cria dificuldades para o classificador atribuir corretamente os pixels para cada tipologia. Deste modo, apesar dos bons índices de acurácia, tem-se classes com mais áreas do que realmente existem em campo e outras com menos.

No caso da Formação Pioneira de Influência Fluvial, um dos motivos desta “confusão espectral” reside no fato de se tratar de diferentes etapas serais de uma sucessão ecológica, ora com vegetação herbácea abundante, ora arbóreas, por vezes apresentando agrupamentos quase monoespecíficos de *T. cassinoides* (caxeta), dependendo também do histórico das perturbações antrópicas (Figura 18).

Figura 18 – Sucessão Ecológica em área de Formação Pioneira de Influência Fluvial, em direção à comunidade clímax.



Fonte: GALVÃO *et. al.*, 1999.

Esta variabilidade de ambientes dificulta a detecção das áreas de ocorrência da formação, uma vez que tendem a confundir-se com outros alvos em campo. Por exemplo, quando *T. cassinoides* está presente na transição entre a Formação Pioneira e a Floresta Ombrófila Densa, onde ocorre o predomínio de outras espécies, como o *Callophyllum brasiliense* (guanandi), *Tapirira guianensis* (cupiúva) e *Alchornea triplinervia* (tapiá-guaçu). Neste caso, o classificador tende a atribuir os pixels da Formação Pioneira para a classe de Floresta Ombrófila Densa. Corroborando com esta idéia, CARTER (1979) *apud* LO & LEE (1994) comentam a existência de dificuldades para o mapeamento de áreas úmidas, devido às complexidades, causadas pela dinâmica natural destas áreas e as complicadas relações entre hidrologia, solos e vegetação, incluindo as diferenças apresentadas em áreas de transição entre diferentes comunidades.

Tentativas anteriores de mapeamento das Formações Pioneiras de Influência Fluvial na costa brasileira foram realizadas, mas apresentaram problemas. Alguns desses levantamentos enquadraram estas áreas sob a denominação genérica de restinga, o que ocasionou a perda de detalhamento, interpretações equivocadas sobre as áreas de

ocorrência e sobre a descrição dessas comunidades pioneiras.

Apesar destas dificuldades o classificador obteve 85,33% de acurácia total e 83,70% de índice *Kappa* total. FOODY & HILL (1996) realizaram uma classificação digital de um conjunto de bandas (2, 4 e 7) do Landsat TM, em uma área de floresta tropical no Peru, onde ocorrem Formações Pioneiras de Influência Fluvial, em diferentes estágios sucessionais, inclusive uma etapa seral dominados por agrupamentos quase homogêneos de *Tabebuia* spp., cuja descrição é muito semelhante ao caxetal encontrado no litoral paranaense. Estes autores obtiveram o valor de 50,08% de acurácia total, indicando que as diferentes classes de vegetação não foram altamente separáveis. Para atingir o valor de 90,20% de acurácia total, algumas classes de vegetação foram reunidas, levando em conta a proximidade nas suas características ambientais, uma vez que não foi possível individualizar as classes de vegetação.

HAMBURGUER & CRISCUOLO (1995) também enfrentaram dificuldades na detecção dos caxetais, principalmente nas regiões transicionais, onde *Tabebuia cassinoides* começa a ser substituída por espécies de Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas.

Para uma maior discriminação entre os diferentes tipos de vegetação e para melhor entender o comportamento espectral das diferentes comunidades da Formação Pioneira de Influência Fluvial é necessário refinar as observações de campo, com um maior detalhamento em termos de estrutura, forma, composição e ambiente. Esta observação é ratificada com as efetuadas por HAMBURGUER & CRISCUOLO (1995) e FOODY & HILL (1996), que comentam a utilidade da obtenção de dados auxiliares para o mapeamento deste tipo de vegetação.

Com a digitalização de polígonos sobre a imagem classificada em software de SIG (ARCVIEW GIS 3.0) foi obtido um novo referencial para o total de área ocupado pela Formação Pioneira de Influência Fluvial (Tabela 17). Os resultados obtidos indicam um total de 19.975,74 ha ou seja 23,42% da área total do litoral centro-sul do Estado do Paraná ocupada por esta formação, enquanto as áreas úmidas ocupam 35,82% (40.587,13 ha).

Tabela 17 – Áreas determinada para as classes.

| Classes | Área (ha) | Área (%) |
|---|------------------|-----------------|
| Formação Pioneira de Influência Fluvial | 19.975,741 | 23,42 |
| Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha | 12.760,150 | 9,71 |
| Formação pioneira de Influência Marinha | 7.851,236 | 2,69 |
| Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas | 3.535,791 | 42,98 |
| Áreas urbanas | 56.463,412 | 5,97 |
| Áreas de Antropismos | 30.761,460 | 15,21 |
| Total | 131.347,79 | 100,00 |

A partir das classificações geradas, em especial àquela proveniente da combinação de bandas sintéticas produzidas pela transformação *tasseled cap* (B-G-W) e análise por componentes principais (PCA3), foi produzido um mapa identificando as áreas, onde as Formações Pioneira de Influência Fluvial ocorrem na planície costeira do Paraná (Figura 19). Também foi produzido um mapa em uma escala maior (1:250.00), onde foram identificados as Formações Pioneiras de Influência Fluvial, Fluviomarinha, Marinha, áreas antropizadas, áreas urbanas e Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (Figura 20). Como o objetivo do presente trabalho é o levantamento das áreas de Formação Pioneira de Influência Fluvial, agruparam-se na mesma categoria de Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, os capoeirões, os povoamentos e as áreas de Ombrófila Densa Submontana, que ocorrem isoladas na planície costeira.

Figura 19 - Ocorrência de Fomações Pioneiras de Influência Fluvial.

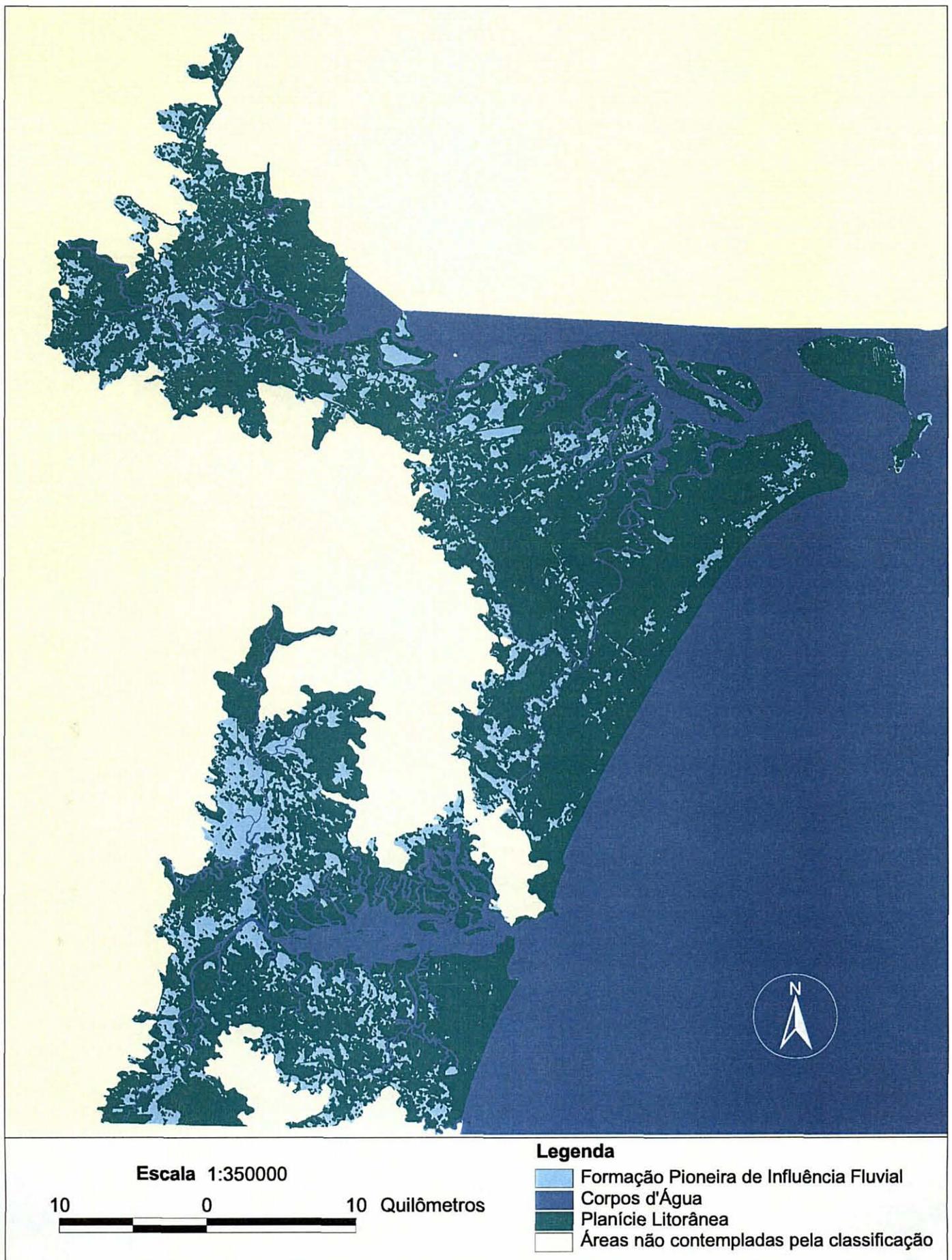
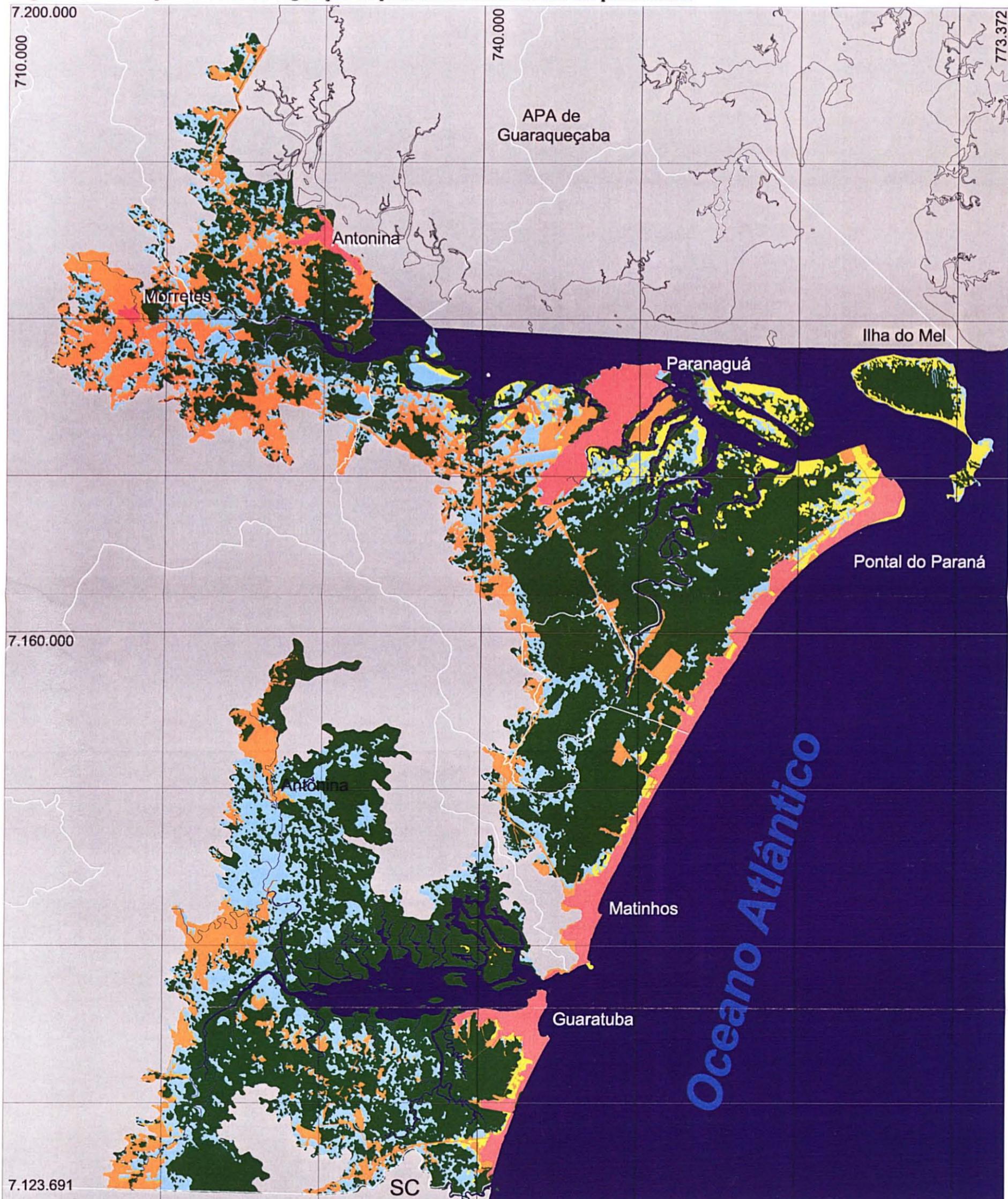


Figura 20 - Principais classes de vegetação da planície litorânea centro-sul paranaense.



Legenda

- Formação Pioneira de Influência Fluvial
- Formação Pioneira de Influência Fluviomarinha
- Formação Pioneira de Influência Marinha
- Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas
- Corpos d'Água
- Áreas de Antropismo
- Áreas Urbanas
- Áreas não contempladas pela classificação



Escala 1:250000



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos de processamento de imagens e de classificação digital estão, atualmente, tornando-se mais populares do que eram há poucos anos. Isto se deve ao fato dos computadores estarem mais acessíveis à pesquisadores e instituições, e sua capacidade de processamento tem se tornado cada vez maior, além dos significativos avanços na área de software.

As técnicas de sensoriamento remoto empregadas neste estudo revelaram-se muito úteis para trabalhos de levantamento de vegetação, porém não podem prescindir de trabalhos de campo. Estes, quanto mais detalhados e precisos, maior será o grau de precisão atingido. Deste modo, a utilização do GPS de posicionamento significa em um grande aumento na fidelidade dos trabalhos. Mesmo equipamentos destinados à navegação podem ser empregados com relativo sucesso, desde que seja utilizado um método adequado e respeitadas as limitações do equipamento.

As seguintes conclusões puderam ser reunidas a partir dos resultados alcançados neste trabalho:

- O emprego de técnicas de sensoriamento remoto, como a análise por componentes principais, índices vegetativos e transformação *tasseled cap*, trazem bons resultados aos trabalhos, seja para a interpretação visual de imagens ou para a classificação digital;
- A análise por componentes principais demonstrou ser uma técnica de rápida implementação e de fácil interpretação, sendo úteis porque eliminam a redundância e a correlação entre os dados, permitindo separar melhor as classes e identificar alvos ou fenômenos.
- O uso de análise por componentes principais em um *triplet* de bandas do visível e em um *triplet* do infravermelho, ao invés de sua utilização em todo conjunto de bandas é merecedor de destaque. Nesta abordagem, foram obtidas duas novas bandas que concentraram as informações do espectro visível e outra do infravermelho, ampliando as possibilidades de composições coloridas e classificação digital.
- Os índices vegetativos, não são indicados para trabalhos de segmentação de

classes de vegetação, uma vez que não trazem informações suficientes para a discriminação das diferentes unidades fitofisionômicas. Porém a detecção do contraste da quantidade de biomassa, é favorecida pelos índices (principalmente NDVI e SAVI), sendo recomendado para monitorar desflorestamentos;

- O índice NDWI, ao contrário do que se imaginava, este índice não foi de grande auxílio na classificação digital. Não é adequado para a detecção de solos com superávit hídrico.
- A transformação *tasseled cap*, é uma boa forma para reduzir a dimensionalidade dos dados, uma vez que sua implementação e interpretação são mais simples que a análise por componentes principais. Uma das vantagens de seu emprego é a maior discriminação entre as classes de vegetação. Até mesmo as análises visuais são facilitadas pelo uso da combinação destas bandas.
- A classificação supervisionada que se apresentou com os melhores resultados foi a combinação entre as bandas provenientes da transformação *tasseled cap* (*greenness, brightness e wetness*) com o terceiro componente principal, atingindo bons índices de acurácia (acurácia global de 85,33% e índice Kappa de 83,70%), sendo aproveitada como base para a produção de um mapa com a localização das Formações Pioneiras de Influência Fluvial.
- A área total do litoral centro-sul do Estado do Paraná ocupada pela Formação Pioneira de Influência Fluvial é de 19.975,74 ha ou seja 23,42%, enquanto as áreas úmidas ocupam 35,82% (40.587,13 ha).

Considerações Finais

Os resultados obtidos por este estudo, permite recomendar o método utilizado em trabalhos similares, porém, para atingir resultados mais positivos, é importante que as fases de campo sejam ampliadas, e sejam utilizados meios auxiliares, a fim de aumentar a precisão.

Para outros estudos similares, recomenda-se:

- Testar a análise de textura, bem como outros métodos e técnicas não abordados por este trabalho.
- Integrar dados provenientes de outros sensores de características radiométricas

distintas como o caso dos radares de abertura sintética ou sensores passivos com maior resolução espacial, principalmente aqueles recentemente lançados, como o LANDSAT-7, IKONOS e o CBERS-1 (cooperação Brasil – China).

- A incorporação destes dados a um sistema de informações geográficas, de forma a facilitar a produção de mapas, executar análises com variáveis espaciais e obter novas informações a do conjunto original de dados. Como consequência, possibilitar o monitoramento de áreas, principalmente os desflorestamentos, permitindo resposta rápida e eficaz se utilizado pelos órgãos públicos de gestão ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABER, J.S. ES 771 **Remote Sensing**. <http://academic.emporia.edu/aberjame/remote/remote.html>. 1998.
- ACIESP. **Glossário de Ecologia**. São Paulo: ACIESP / CNPq / FAPESP. 1987. 271p. (Publicação ACIESP Nº 57).
- AFIFI, A.A.; CLARK, V. **Computer-aided multivariate analysis**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1990.
- ANDRADE, J.B.; MACHADO, S.A. Marcos Históricos no mapeamento florestal do Paraná usando técnicas de sensoriamento remoto. In: **Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográficas Aplicado Engenharia Florestal**. Curitiba, 1994 p 1- 10.
- ANGULO, R.J. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. Tese de Doutorado. São Paulo, 1992. Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Geociências.
- ANTUNES, A.F.B. **Análise do uso do processamento digital de imagens na segmentação de tipologias vegetais da APA de Guaraqueçaba - PR**. Curitiba, 1996. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- ANTUNES, A.F.B. & LINGNAU, C. Uso de índices de acurácia para a avaliação de mapas temáticos obtidos por meio de classificação digital. In: GIS BRASIL 97 (1997: Curitiba). **Anais do III Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento**. Curitiba: Fator GIS / Mídia Digital. 1997. CD-ROM.
- ARAÚJO, D.S.D. Restingas: síntese dos conhecimentos para a costa sul-sudeste brasileira. In: **Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileiras**. Cananéia, 1987. Anais v.1, p. 333-347.
- AWBL. **Ecology**. [Http://www.awbl.com/classes/science/ecology/lesson00/allc-5521-00-1.html](http://www.awbl.com/classes/science/ecology/lesson00/allc-5521-00-1.html). 1997. (Association of Web-Based Learning).
- BAIO, F.H.R. **GPS na Agricultura**. <http://www.ciagri.usp.br/~fhrbaio/gps.htm>. 1998.
- BARBOSA, M.P. **Curso de sensoriamento remoto e SIG: Princípios físicos**. Campina Grande, 1998. (Apostila do Curso de Especialização em Sensoriamento Remoto e SIG).
- BAUER, M.E.; BURK, T.E.; EK, A.R.; COPPIN, P.R.; LIME, S.D.; WALSH, T.A. WALTERS, D.K.; BEFORT, W.; HEINZEN, D.F. Satellite inventory of minnesota forest resources. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, **60**, 3:287-298. 1994.
- BELWARD, A.S. **Spectral characteristics of vegetation, soil and water in visible,**

- near-infrared and middle-infrared wavelengths.** In: Belward, A.S.; Valenzuela, C.R. Remote Sensing and Geographical information systems for resource management in developing countries. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990, p.31-54.
- BIGARELLA, J.J. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. **Arq. Biol. Tec.** , v.1. p.11-75, 1946.
- BIGARELLA, J.J. **A serra do mar e a porção oriental d Estado do Paraná**. Governo Estadual do Paraná / ADEA, 1978. 249p.
- BIRD, A.C. **Principles of remote sensing: Eletromagnetic radiation, reflectance and emissivity.** In: Belward, A.S.; Valenzuela, C.R. Remote Sensing and Geographical information systems for resource management in developing countries. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990, p.1-16.
- BLACKBURN, A. **Remote sensing of the photosynthetic potential of vegetation: the question of scale.** <http://www.kcl.ac.uk/kis/schools/hums/geog/phdab5.htm>. Departament of Geography, King's College London. 1996.
- BOYD, D.S.; RIPPLE, W.J. Potential vegetation indices for determining global forest cover. **Int. J. Remote Sensing**, 18, 6:1395-1401. 1997.
- BRAUN-BLANQUET. J. **Sociologia Vegetal: Estudio de las comunidades vegetales.** Buenos Aires: ACME Agency. 1950. 444p.
- BREWER, R. **The science of ecology.** 2 ed. Ft. Worth: Saunders College Publishing. 1994. 771p.
- BRITES, R.S. **Verificação de exatidão em classificação de imagens orbitais: efeitos de diferentes estratégias de amostragem e avaliação de índices de exatidão.** Viçosa, 1996. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.
- CALVÁRIO & ROCHHOLZ Instrumentos Técnicos e Científicos, Lda. **Técnicas de Medição com GPS.** <http://homepage.esoterica.pt/~zeissacc/docs/GPSModos.htm>. 1998.
- CAMPOS, L.F.G. **Mappa Florestal.** Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio – Serviço Geológico e Mineralógico. 102 p. 1912 (Edição Fac-similar. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo. 1987).
- CHAVEZ JUNIOR, P.S Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 32, 3:339-348, 1989.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial.** Madrid: Rialp, 1992. 453p.
- CRACKNELL, A.P.; HAYES L.W.B. **Introduction to remote sensing.** Taylor & Francis Ltd.,1991. 293p.

- CRISTOFANI, A. The earth in balance: maintaining Brazil's biodiversity. **GPS World** June 1996 pag. 20-26.
- CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: IG/Unicamp, 1993. 170 p.
- CURCIO, G.R. & RACHWAL, M.F.G. **Principais tipos de solos do Estado do Paraná, suas características e distribuições na Paisagem**. In: IPARDES. A Vegetação Natural do Estado do Paraná. Curitiba: IPARDES-CTD. 1994.
- DANA, P. **Global Positioning System Overview**. <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>. Department of Geography, University of Texas at Austin, 1998.
- DIEGUES, A.C.S. Conservação e desenvolvimento sustentado de ecossistemas litorâneos no Brasil. In: **Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileiras**. Cananéia, 1987. Anais v.3, p. 196-243.
- DIEGUES, A.C.S. **An inventory of brasilian wetlands**. Gland: IUCN. 1994. 216p.
- EDITORA NOVA FRONTEIRA. **Dicionário Aurélio eletrônico V. 2.0**. 1996. (Software desenvolvido por Márcio Ellery Girão Barroso, produto baseado no Novo Dicionário da Língua Portuguesa de Aurélio Buarque de Holanda Ferreira).
- ENVI **ENVI 3.1 Tutorials**. http://www.envi-sw.com/e_tutor.htm. 1998.
- FERRI, M.G. **Vegetação Brasileira**. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: EDUSP, 1980. 157p.
- FOODY, G.M. On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, **58**(10):1459-1460. 1992.
- FOODY, G.M. & HILL, R.A. Classification of tropical forest classes from Landsat TM data. **Int. J. Remote Sensing**, **17** (12):2353-2367. 1996.
- FORTES, L.P.S. Especificações e normas gerais para levantamentos GPS (preliminares). *Cad. Geoc.*, Rio de Janeiro, n. 10:63-77, jan. 1994.
- FREITAS, L.E. **Sistema de navegação por satélite GPS: funcionamento do sistema e suas aplicações**. <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/9947/index.html>. 1998.
- FUNG, T. LEDREW, E. Application of principal components analysis to change detection. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, **53**, 12:1649-1658. 1987.
- GALVÃO, F.; RODERJAN, C.V.; KUNYOSHI, Y.S. & ZILLER, S.R. Composição florística e fitossociológica de caxetais do litoral do Estado do Paraná – Brasil. **Scientia Forestalis**. Nº56, 1999. (no prelo)

- GARMIN **What is GPS?**. <http://www.garmin.com/gpsWhatisit.html>. 1998.
- HAMBURGUER, D. & CRISCUOLO, C. **Levantamento de caixetais no Município de Iguape**. Rio Claro: UNESP / Fundação SOS Mata Atlântica, 1995. (Relatório Técnico)
- HERTEL, R.J.G. **Aspectos interessantes da vegetação do Paraná**. In: GRAFIPAR. História do Paraná. 2 ed. Curitiba: GRAFIPAR. 1969. pág. 130-241.
- HOWARD, A.J. **Remote sensing of forest resources: theory and application**. London: Chapman & Hall, 1991. 420 p.
- HOWARD, J.A. Remote sensing of tropical forests with special reference to satellite imagery. In: **Remote Sensing in Forestry**. Proceedings of the Symposium held during the XVI IUFRO World Congress, Oslo, 1976. p. 211- 226.
- IAPAR (1994) **Cartas Climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR. 45p.
- IBGE (1990) **Geografia do Brasil** . Rio de Janeiro. (dados editoriais incompletos)
- IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE. 1992 92p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 1).
- INPE. **O satélite Landsat**. <http://ametista.dgi.inpe.br/html/landsat.html>. INPE, 1997a
- INPE. **Manual do SPRING 2.0**. http://dpi.inpe.br/spring//usuário/c_pprot.html. INPE, 1997b
- IPARDES. **Zoneamento do Litoral do Paranaense**. Curitiba: IPARDES/SEPLAN, 1989. 174p.
- IPARDES. **Mapa da vegetação da Apa de Guaraqueçaba - PR, 1:200.000**. Curitiba: IparDES (anexo do Diagnóstico Ambiental de Guaraqueçaba) 1989b.
- IPARDES. **Mapa de solos da Apa de Guaraqueçaba - PR, 1:200.000**. Curitiba: IparDES (anexo do Diagnóstico Ambiental de Guaraqueçaba) 1989b.
- IPARDES. **Mapa de relevo da Apa de Guaraqueçaba - PR, 1:200.000**. Curitiba: IparDES (anexo do Diagnóstico Ambiental de Guaraqueçaba) 1989b.
- IPARDES. **Macrozoneamento da Apa de Guaraqueçaba - PR**. Curitiba: IPARDES, 1990. 257p.
- JASTER, C.B. **Análise estrutural de algumas comunidades florestais no litoral do Estado do Paraná**. Göttingen, 1995. Dissertação de Mestrado. Universidade Georg-August de Göttingen / Alemanha. (Tradução fornecida pelo autor).
- JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1986. 379 p.

- JOLY, C.A. Heterogeneidade e diversidade de estratégias adaptativas de espécies arbóreas de mata de galeria. In: Simpósio sobre Perspectivas de Ecologia Aplicada. Anais do X Simpósio Anual da ACIESP. São Paulo. 1986. p.19-38.
- JUNK, W.J. **Wetland of tropical south america**. In: WHIGHAM, D.F.; DYKYJOVÁ, D. & HEJNÝ, S. Handbook of vegetation Science: Wetlands of the world I. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. pág. 679-739.
- KALENSKY, Z.; WIGHTMAN, J.M. Automatic forest mapping using remotely sensed data. In: **Remote Sensing in Forestry**. Proceedings of the Symposium held during the XVI IUFRO World Congress, Oslo, 1976. p. 115-135
- KLEIN, R.M. Aspectos dinâmicos da vegetação do sul do Brasil. *Sellowia* 36:5-54. 1984.
- KLEIN, R.M **Estrutura, composição, florística e dinamismo e manejo da “Mata Atlântica”(Floresta Obrófila Densa) do sul do Brasil**. In: Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileiras: estrutura função e manejo. Água de Lindóia, 1990. Anais v.1, p. 259-286.
- KRAMBER, W.J.; MORSE, A. **Integrating image interpretation and unsupervised classification procedures**. <http://www.sgi.usrus.maine.edu/gisweb/spatab/acms/asprs/acsm>. 1994.
- KUNYOSHI, Y.S. **Aspectos morfo-anatômicos do caule, raiz e folha de *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC (BIGNONIACEAE) em diferentes fases sucessionais no litoral do Paraná**. Curitiba, 1993. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- LEITE, P.F. & KLEIN, R. M. **Vegetação**. In: IBGE. Geografia do Brasil: região Sul. Rio de Janeiro, v 2, 113-150. 1990.
- LEITE, P. F. **As diferentes unidades fitoecológicas da região sul do Brasil: proposta de classificação**. Curitiba, 1994. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- LI, Y.; MAUSEL, P.; WU, Y.; MORAN, E; BRONDÍZIO, E. **Discrimination between advanced secondary succession and mature mist forest near Altamira, Brazil, using Landsat TM data**. <http://www.sgi.usrus.maine.edu/gisweb/spatab/acms/asprs/acsm> 1994.
- LO, C.P.; WATSON, L.J. **Okefenokee swamp vegetation mapping with Landsat thematic mapper data: an evaluation**. <http://www.sgi.usrus.maine.edu/gisweb/spatab/acms/asprs/acsm> 1994.
- MA, Z.; REDMOND, R.L. *Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 61, 4:435-439. 1995.
- MAAK, R. **Mapa fitogeográfico do Estado do Paraná**. Escala 1: 750.000. Curitiba: Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas, 1950.

- MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: José Olympio / Secretaria de Cultura e do Esporte do Estado do Paraná. 1981.
- MALTBY, E. **Waterlogged Wealth: Why waste the world's wet places?** Nottingham: WWF/IUCN. 1986. 200p.
- MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical Methods**. Department of Mathematics and Statistics, University of Otago, New Zeland. Chapman & Hall, 1994.
- MANUAL DO ERDAS, 1991. **ERDAS field guide**. Second Edition, Version 7.5, 216 p.
- MARGALEF, R. **Ecologia**. Barcelona: Omega. 1986. 951p.
- MUCHONEY, D.M.; GROSSMAN, D.H.; SOLOMON, R. Rapid ecological assessment for conservation planning. **Technical Papers. 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention**. Vol.4 :141-145
- NMA **GPS** <http://www.nma.embrapa.br/satelites/gps.html>. NMA-Embrapa, 1997.
- NMA **Landsat** <http://www.nma.embrapa.br/satelites/landsat.html>. NMA-Embrapa, 1997.
- NOVO, E.M.L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgar Blücher, 1992. 142p.
- ODUM, E.P. **Fundamentos de Ecologia**. 4 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 1988. 925p.
- PAUL, M.M. **Computer processing of remotely sensed images**. Chichester, 1994.
- PINTO, J.H.D.; SANTOS, J.R.; CHIANG, L.C.; NIETTO, M.; PINTO, S.A.F.; CARVALHO, V.C. **Levantamento integrado dos recursos naturais da área do Parque Nacional da Amazônia (Tapajós), baseado nas imagens MSS do Landsat**. Brasília:IBDF/CNPq-INPE. 1979. 63p.
- QUINTANILHA, J.A. Pcessamento de imagens digitais. **Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento**. São Paulo: EDUSP. Anais. p37-52. 1990
- RAY, T.W. **A Faq on vegetation in remote sensing**. <ftp://kepler.gps.caltech.edu/pub/terrill/rsvegfaq.txt>. 1994 Division of geological and planetary sciences, California Institute of technology.
- RCSSMRS. **Mapping of the distribution of water hyacinth using satellite imagery: pilot study in Uganda**. Nairobi: RCSSMRS / French Techincal Assistance, 1995
- REITZ, P.R. Vegetação da zona marítima de Santa Catarina. **Sellowia**, 13(13):17-116. 1991.
- RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction**. 2 nd. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 340 p.

- RICKLEFS, R.E. **Ecology**. 3 ed. New York: W.H. Freeman and Company. 1990. 896p.
- RODERJAN, C.V.; KUNIYOSHI, Y.S. **Macrozoneamento florístico da área de proteção ambiental APA-Guaraqueçaba**. Curitiba: FUPEF 1988. 53p (Série Técnica, 15)
- RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S. & KIRCHNER, F. **Levantamento da Vegetação da Área de Proteção Ambiental de Guaratuba – APA de Guaratuba**. Curitiba, 1996. (relatório não publicado).
- ROSENFELD, G.H.; FITZPATRICK-LINS, K.A. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **52**(2):223-227. 1986.
- SADER, S. A.; STONE. T.A.; JOYCE, A.T. Remote sensing of tropical forest: an overview of research and applications using non-photographic sensors. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **56**(10):1343-51, 1990.
- SANTOS, J.R.; HERNANDEZ-FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1981. 59p. (Notas de aula)
- SCHOWENGERDT, R.A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Orlando: Fl, Academic Press, 1983. 249 p.
- SCHREUDER, H.T.; LABAU, V.J.; HAZARD, J.W. The Alaska four-phase forest inventory sampling design using remote sensing and ground sampling. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, **61**, 3:291-297. 1995.
- SILVA, A.F. Afitosociologia na Mata Atlântica. In: **Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira**. Anais. 1987. v.1, p 62-77.
- SILVA, S.M. **Composição florística e fitossociologia de um trecho de floresta de restinga na Ilha do Mel, Município de Paranaguá, PR**. Campinas, 1990. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- SILVEIRA, P. **Detecção de alterações na cobertura vegetal ocasionado pela expansão urbana em uma região do litoral paranaense, através de técnicas de sensoriamento remoto**. Curitiba, 1997. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- SIRTOLI, A.E. **Detecção automática da expansão de mineração de calcário através de técnicas de sensoriamento remoto**. Curitiba, 1998. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- STAR, J. Remote sensing and GIS. In: **Curso de Pós graduação em Geoprocessamento**. CIEG/UFPR. Módulo II. 1992. p. 28-60.
- STONE, T.A.; SCHLESINGER, P.; HOUGHTON, R.A. & WOODWELL, G.M. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery. **Photogrammetric**

- Engineering and Remote Sensing**, 60(5):541-551. 1994.
- THE RAMSAR CONVENTION BUREAU. **The Ramsar convention on Wetlands**.
<http://www.ramsar.org> . 1998.
- TRIMBASE **O que é GPS**. <http://www.trimbase.com.br/oque.htm>. 1998
- US COST GUARD **Answer to frequently asked question about gps**.
<http://www.navcem.uscg.mil/gpsfaq.htm>. 1997
- VALENZUELA, C.R. **Basic principles of geographic information system**. In:
Belward, A.S.; Valenzuela, C.R. Remote Sensing and Geographical information
systems for resource management in developing countries. Dordrecht: Kluwer
Academic Publishers, 1990, p.279-296.
- VELOSO, H.P. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema
universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 124p.
- WAECHTER, J.L. Comunidades vegetais das restingas do Rio Grande do Sul. In:
Simpósio de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira. Anais. 1990.
v.3, p 228-248.
- WATRIN, O.S. **Estudo da dinâmica na paisagem da Amazônia Oriental através
de técnicas de geoprocessamento**. São José dos Campos, 1994. Dissertação de
Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- WELLS, D. **Guide to GPS positioning**. New Bruswick: Canadian GPS Associates,
1986.
- WWF. **Admiráveis áreas úmidas**. Gland: WWF. 1996. 24p.
- ZILLER, S.R. **Análise fitossociológica de caxetais**. Dissertação de Mestrado, Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da
Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1992. 101p.

ANEXOS

ANEXO 01- MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS BANDAS

| | 1a.tif | 2a.tif | 3a.tif | 4a.tif | 5a.tif | 7a.tif | dvi.tif | msavi2.tif | ndvi.tif | ndwi.tif | pca01.tif | pca02.tif | pca03.tif | pca04.tif |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1a.tif | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2a.tif | 0,9355 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 3a.tif | 0,793 | 0,9159 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 4a.tif | 0,4153 | 0,5513 | 0,5745 | 1 | | | | | | | | | | |
| 5a.tif | 0,3709 | 0,5662 | 0,7175 | 0,8396 | 1 | | | | | | | | | |
| 7a.tif | 0,3283 | 0,5384 | 0,7413 | 0,6362 | 0,9141 | 1 | | | | | | | | |
| dvi.tif | 0,1869 | 0,3007 | 0,2975 | 0,9523 | 0,7128 | 0,4671 | 1 | | | | | | | |
| msavi2.tif | 0,4068 | 0,5413 | 0,5645 | 0,9995 | 0,8374 | 0,631 | 0,9555 | 1 | | | | | | |
| ndvi.tif | 0,0306 | 0,1604 | 0,2186 | 0,861 | 0,6825 | 0,4631 | 0,9238 | 0,8727 | 1 | | | | | |
| ndwi.tif | -0,001 | -0,149 | -0,26 | -0,858 | -0,726 | -0,527 | -0,906 | -0,8691 | -0,99 | 1 | | | | |
| pca01.tif | 0,5518 | 0,7047 | 0,7708 | 0,9416 | 0,9493 | 0,8137 | 0,8112 | 0,9386 | 0,7285 | -0,746 | 1 | | | |
| pca02.tif | -0,829 | -0,668 | -0,464 | 0,136 | 0,1837 | 0,1326 | 0,3336 | 0,1447 | 0,4633 | -0,506 | 0,0038 | 1 | | |
| pca03.tif | 0,0562 | -0,035 | -0,246 | 0,3629 | -0,191 | -0,422 | 0,5134 | 0,3662 | 0,4094 | -0,328 | 0,0616 | -0,0027 | 1 | |
| pca04.tif | 0,1078 | -0,068 | -0,195 | -0,006 | 0,0813 | -0,073 | 0,0639 | 0,0002 | 0,0461 | 0,0047 | 0,0385 | -0,0439 | -0,0873 | 1 |

Anexo 01- continuação

| | pca05.tif | pca06.tif | pcair01.tif | pcair02.tif | pcair03.tif | pcavi01.tif | pcavi02.tif | pcavi03.tif | rgir.tif | rvi.tif | savi.tif | savi2.tif | tvi.tif |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|---------|----------|-----------|---------|
| pca05.tif | 1 | | | | | | | | | | | | |
| pca06.tif | 0,0186 | 1 | | | | | | | | | | | |
| pcair01.tif | 0,0141 | 0,0001 | 1 | | | | | | | | | | |
| pcair02.tif | -0,0459 | -0,0116 | 0,0516 | 1 | | | | | | | | | |
| pcair03.tif | 0,7787 | -0,0143 | 0,0369 | -0,1082 | 1 | | | | | | | | |
| pcavi01.tif | 0,059 | 0,0214 | 0,5416 | -0,1019 | -0,1427 | 1 | | | | | | | |
| pcavi02.tif | 0,1408 | -0,0261 | 0,1083 | -0,3483 | 0,0262 | -0,4906 | 1 | | | | | | |
| pcavi03.tif | -0,1145 | -0,9365 | 0,1153 | -0,2743 | 0,008 | -0,0156 | 0,0032 | 1 | | | | | |
| rgir.tif | -0,0257 | 0,1196 | 0,5792 | -0,1278 | -0,0892 | 0,2441 | -0,6223 | 0,0369 | 1 | | | | |
| rvi.tif | -0,0541 | 0,0205 | 0,8462 | 0,5169 | 0,0442 | 0,3332 | -0,126 | -0,2308 | -0,571 | 1 | | | |
| savi.tif | -0,0026 | 0,0236 | -0,4671 | -0,1835 | 0,037 | -0,8286 | 0,7311 | 0,0076 | -0,247 | -0,5 | 1 | 1 | |
| savi2.tif | -0,0029 | 0,0238 | -0,4676 | -0,1836 | 0,0369 | -0,8287 | 0,7307 | 0,0077 | -0,247 | -0,501 | 1 | 1 | |
| tvi.tif | 0,0045 | -0,053 | 0,7445 | 0,2736 | 0,0935 | -0,0282 | 0,3742 | -0,1314 | -0,933 | 0,7954 | -0,051 | -0,0512 | 1 |

ANEXO 02 – OIF DAS PRINCIPAIS COMPOSIÇÕES COLORIDAS

| BANDAS | OIF | BANDAS | OIF | BANDAS | OIF | BANDAS | OIF | BANDAS | OIF |
|----------------|---------|---------|-------|------------|---------|----------------|-------|------------|---------|
| 27ndwi | 1770,95 | 27savi | 53,68 | 23pc2 | 18,51 | ir/vi/msavi2ng | 79,37 | 13pc1 | 36,42 |
| 24pc3 | 1411,54 | 17eq | 53,64 | 12pc2 | 17,92 | ir/vi/eq | 78,50 | 23dvi | 36,29 |
| 15pc3 | 478,72 | ir/vi/3 | 50,07 | 247 | 16,29 | 47pc3 | 78,14 | 37tvi | 35,29 |
| ir/vi/pc3 | 308,93 | 13rvi | 49,86 | 457 | 15,84 | 13tvi | 77,10 | 145 | 35,01 |
| 34pc3 | 182,13 | 12dvi | 49,45 | 234 | 14,55 | ir/vi/pc1 | 72,10 | 37ndvi | 34,62 |
| 17pc3 | 139,55 | ir/vi/1 | 48,09 | 347 | 14,29 | 12tvi | 71,92 | 37savi | 34,62 |
| ir/vi/tvi | 117,85 | 23pc3 | 48,06 | 257 | 13,17 | ir/vi/7 | 71,19 | 12pc1 | 34,51 |
| 45pc2 | 112,74 | 25pc2 | 47,61 | 235 | 12,36 | 17dvi | 70,03 | 23ir | 34,34 |
| ir/vi/ndvi | 107,36 | 27dvi | 46,57 | 357 | 11,34 | 13ndvi | 68,94 | 23rvi | 34,17 |
| ir/vi/savi | 107,36 | 13r42 | 46,36 | 137 | 10,55 | 13savi | 68,94 | 37rvi | 33,27 |
| 25pc3 | 103,91 | ir/vi/2 | 46,17 | 127 | 10,31 | 27pc3 | 68,70 | 37dvi | 32,95 |
| 23ndwi | 103,33 | 27rvi | 43,77 | 123 | 6,56 | 14pc2 | 66,93 | 23r42 | 32,26 |
| ir/vi/pc2 | 102,61 | 23tvi | 43,74 | 237 | 5,85 | 13ir | 66,49 | 37pc2 | 31,38 |
| 47pc2 | 102,35 | 12rvi | 42,81 | 47ndwi | -80,00 | 17rvi | 64,38 | 37r42 | 30,52 |
| 13ndwi | 102,13 | 13eq | 42,42 | 34ndwi | -93,68 | 12ndwi | 63,20 | 147 | 29,01 |
| 17tvi | 95,44 | 12r42 | 42,16 | 45ndwi | -93,94 | 12ndvi | 62,65 | 23eq | 28,87 |
| 45pc3 | 93,56 | 27r42 | 41,24 | 24ndwi | -104,59 | 12savi | 62,64 | 37eq | 27,76 |
| ir/vi/4 | 93,33 | 47vi | 41,23 | 14ndwi | -111,96 | 35pc3 | 62,62 | 23pc1 | 25,46 |
| ir/vi/dvi | 91,29 | 23ndvi | 41,10 | 15ndwi | -132,85 | 34pc2 | 62,47 | 157 | 22,88 |
| ir/vi/r42 | 90,78 | 23savi | 41,09 | 25ndwi | -136,53 | 17r42 | 59,54 | 134 | 22,79 |
| ir/vi/5 | 87,06 | 35pc2 | 39,22 | 35ndwi | -140,94 | 15pc2 | 58,86 | 245 | 21,70 |
| ir/vi/rvi | 86,48 | 12eq | 38,58 | 14pc3 | -190,55 | 27tvi | 57,71 | 13pc2 | 20,94 |
| 12pc3 | 85,65 | 37pc3 | 38,12 | 17ndwi | -205,37 | 13dvi | 56,53 | 124 | 20,70 |
| 17ndvi | 85,61 | 27eq | 38,05 | ir/vi/ndwi | -213,28 | 24pc2 | 56,10 | 345 | 19,54 |
| 17savi | 85,61 | 12ir | 36,42 | 37ndwi | -311,07 | 27ndvi | 53,68 | 135 | 19,53 |
| 13pc3 | 81,10 | 13pc1 | 36,42 | 27ndwi | 1770,95 | 27savi | 53,68 | 125 | 18,90 |
| ir/vi/msavi2ng | 79,37 | 23dvi | 36,29 | 24pc3 | 1411,54 | 17eq | 53,64 | 23pc2 | 18,51 |
| ir/vi/eq | 78,50 | 37tvi | 35,29 | 15pc3 | 478,72 | ir/vi/3 | 50,07 | 12pc2 | 17,92 |
| 47pc3 | 78,14 | 145 | 35,01 | ir/vi/pc3 | 308,93 | 13rvi | 49,86 | 247 | 16,29 |
| 13tvi | 77,10 | 37ndvi | 34,62 | 34pc3 | 182,13 | 12dvi | 49,45 | 457 | 15,84 |
| ir/vi/pc1 | 72,10 | 37savi | 34,62 | 17pc3 | 139,55 | ir/vi/1 | 48,09 | 234 | 14,55 |
| 12tvi | 71,92 | 12pc1 | 34,51 | ir/vi/tvi | 117,85 | 23pc3 | 48,06 | 347 | 14,29 |
| ir/vi/7 | 71,19 | 23ir | 34,34 | 45pc2 | 112,74 | 25pc2 | 47,61 | 257 | 13,17 |
| 17dvi | 70,03 | 23rvi | 34,17 | ir/vi/ndvi | 107,36 | 27dvi | 46,57 | 235 | 12,36 |
| 13ndvi | 68,94 | 37rvi | 33,27 | ir/vi/savi | 107,36 | 13r42 | 46,36 | 357 | 11,34 |
| 13savi | 68,94 | 37dvi | 32,95 | 25pc3 | 103,91 | ir/vi/2 | 46,17 | 137 | 10,55 |
| 27pc3 | 68,70 | 23r42 | 32,26 | 23ndwi | 103,33 | 27rvi | 43,77 | 127 | 10,31 |
| 14pc2 | 66,93 | 37pc2 | 31,38 | ir/vi/pc2 | 102,61 | 23tvi | 43,74 | 123 | 6,56 |
| 13ir | 66,49 | 37r42 | 30,52 | 47pc2 | 102,35 | 12rvi | 42,81 | 237 | 5,85 |
| 17rvi | 64,38 | 147 | 29,01 | 13ndwi | 102,13 | 13eq | 42,42 | 47ndwi | -80,00 |
| 12ndwi | 63,20 | 23eq | 28,87 | 17tvi | 95,44 | 12r42 | 42,16 | 34ndwi | -93,68 |
| 12ndvi | 62,65 | 37eq | 27,76 | 45pc3 | 93,56 | 27r42 | 41,24 | 45ndwi | -93,94 |
| 12savi | 62,64 | 23pc1 | 25,46 | ir/vi/4 | 93,33 | 47vi | 41,23 | 24ndwi | -104,59 |
| 35pc3 | 62,62 | 157 | 22,88 | ir/vi/dvi | 91,29 | 23ndvi | 41,10 | 14ndwi | -111,96 |
| 34pc2 | 62,47 | 134 | 22,79 | ir/vi/r42 | 90,78 | 23savi | 41,09 | 15ndwi | -132,85 |
| 17r42 | 59,54 | 245 | 21,70 | ir/vi/5 | 87,06 | 35pc2 | 39,22 | 25ndwi | -136,53 |
| 15pc2 | 58,86 | 13pc2 | 20,94 | ir/vi/rvi | 86,48 | 12eq | 38,58 | 35ndwi | -140,94 |
| 27tvi | 57,71 | 124 | 20,70 | 12pc3 | 85,65 | 37pc3 | 38,12 | 14pc3 | -190,55 |
| 13dvi | 56,53 | 345 | 19,54 | 17ndvi | 85,61 | 27eq | 38,05 | 17ndwi | -205,37 |
| 24pc2 | 56,10 | 135 | 19,53 | 17savi | 85,61 | 12ir | 36,42 | ir/vi/ndwi | -213,28 |
| 27ndvi | 53,68 | 125 | 18,90 | 13pc3 | 81,10 | 13pc1 | 36,42 | 37ndwi | -311,07 |

ANEXO 3 - CLASSIFICAÇÃO NÃO-SUPERVISIONADA

O propósito da classificação não supervisionada para este trabalho foi conhecer melhor as características da imagem, localizando os agrupamentos de pixels homogêneos, tendo como objetivo facilitar os trabalhos da classificação supervisionada. Este procedimento foi anterior à fase de campo, o que permitiu responder como a vegetação é separada de acordo com os valores de brilho e a auxiliou na localização de muitas feições no terreno, aliado com a interpretação das fotos aéreas e dos mapas.

Para esta classificação digital, foi selecionado o *triplet* de bandas PCIR-PCVI-PC3, por concentrar as informações das bandas do infra-vermelho, do visível. PC3 foi utilizado para compor este conjunto de bandas, devido à sua facilidade em detectar mudanças na cobertura de vegetação que influenciam a reflectância da radiação infravermelha (MUCHONEY & HAACK, 1994).

Foi realizada uma classificação não supervisionada com 20 classes iniciais, que foram reduzidas para 17 pelo algoritmo de agrupamento (Figura I). Este resultado foi interpretado e buscou-se associar este resultado com as feições que representam no terreno. Deste modo obteve-se:

Tabela I – Relação entre os alvos no terreno e as classes utilizadas na interpretação da classificação não supervisionada.

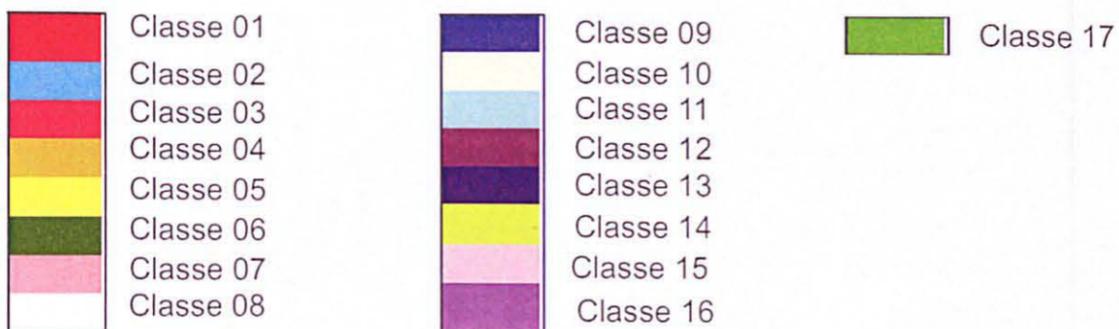
| Alvos no Terreno | Classes | Alvos no Terreno | Classes |
|---|--|--|--|
| Antropismos + Área Urbana | Classe 01 | Floresta Ombrófila Densa Altomontana | Classe 14 |
| Areia + Solo Exposto + Borda da Imagem | Classe 06 | Sombras e objetos não identificados | Classe 15 Classe 17 |
| Formação Pioneira de Influência Marinha (restinga) + Fluviomarinha (mangue) | Classe 04 | Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas + Formações Pioneiras de Influência fluvial | Classe 02 Classe 13 Classe 16 |
| Corpos d'água | Classe 05 Classe 07 Classe 08 Classe 10 | Floresta Ombrófila Densa Submontana + Montana | Classe 03 Classe 09 Classe 11 Classe 12 |

Se por um lado a classificação não-supervisionada traz vantagens, há algumas desvantagens. A principal delas é que o classificador pode realizar muitas “confusões”, generalizando algumas classes e suprimindo outras, uma vez que não há controle por parte do usuário, principalmente se houver um número reduzido de classes, existindo o risco da generalização temática da imagem, perdendo-se alguns temas importantes para interpretação. Por outro lado, um grande número de classes pode inviabilizar a análise visual da imagem classificada, dificultando a distinção entre as diversas categorias, separando pixels pertencentes a um mesmo alvo, em diferentes classes, ou concentrando pixels referentes à diferentes categorias de uso da terra ou cobertura florestal na mesma classe espectral.

Figura I - Classificação não supervisionada da composição PCVI-PCIR-PC3: a) classificação original, b) classificação interpretada.



a) classificação original



b) classificação interpretada

