



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**USO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO, CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS E  
CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA AO OBJETO NO MAPEAMENTO DE  
VEGETAÇÃO DE MANGUEZAL**

**Dissertação apresentada por:**

**CESAR GUERREIRO DINIZ**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cancela Lisboa Cohen (UFPA)**

---

**BELÉM  
2011**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

D585u   Diniz, Cesar Guerreiro

Uso de imagens de alta resolução, características espectrais e classificação orientada ao objeto no mapeamento de vegetação de manguezal / Cesar Guerreiro Diniz; Orientador: Marcelo Cancela Lisboa Cohen - 2011

x, 66f.: il.

Dissertação (mestrado em geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2011.

1. Sensoriamento Remoto. 2. IKONOS. 3. Manguezais. 4. Classificação Orientada a Objeto. 5. *Avicennia* e *Rhizophora*. I. Cohen, Marcelo Cancela Lisboa, *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 22° ed.: 621.3678

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**USO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO, CARACTERÍSTICAS  
ESPECTRAIS E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA AO OBJETO NO  
MAPEAMENTO DE VEGETAÇÃO DE MANGUEZAL**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR**

**CESAR GUERREIRO DINIZ**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOLOGIA**

**Data de Aprovação: 25 /08 /2011**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. MARCELO CANCELA LISBOA COHEN**  
(Orientador-UFPA)

**Prof. Dr. PEDRO WALFIR MARTINS E SOUZA FILHO**  
(Membro-UFPA)

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> MOIRAH PAULA MACHADO DE MENEZES**  
(Membro-UFPA, Bragança)

## AGRADECIMENTO

À Universidade Federal do Pará através do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica do Instituto de Geociências, pelos conhecimentos transmitidos e por fornecerem infraestrutura necessária ao desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de Mestrado durante as etapas deste estudo.

- Agradeço imensamente a orientação do Prof. Dr. Marcelo Cancela Lisboa Cohen que disponibilizou total dedicação, acompanhando integralmente todas as etapas deste trabalho;
- Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por encorajar o ingresso de alunos oriundos de outros cursos de Pós-Graduação, permitindo a utilização da estrutura e dos créditos das disciplinas ministradas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em seus cursos de origem.
- Ao Laboratório de Dinâmica Costeira (LADIC) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG/UFPA) pelo enorme apoio no cumprimento de todas as etapas deste trabalho;
- Ao Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG/UFPA) pela cessão da infraestrutura computacional básica, sem a qual seria impossível a realização deste trabalho;
- Aos pesquisadores, técnicos e amigos; Dr. Pedro Walfir, Dr. João Roberto dos Santos, Dr. Lênio Galvão, Paulo Alves, Wilson Nascimento, Diogo Santos, Nonata Trévia e Ulisses Guimarães. As numerosas discussões sobre o conteúdo aqui abordado e os auxílios, diretos e indiretos, na solução de eventuais problemas foram primordiais para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.
- Por fim, a todos os familiares e amigos, sejam estes professores, alunos, funcionários, técnicos ou não, que direta ou indiretamente, colaboraram com esta etapa da pós-graduação.

## RESUMO

A utilização do Sensoriamento Remoto é uma das mais eficientes técnicas para avaliação de biomassa e distribuição de manguezais. Entretanto, há ainda um grande problema para a identificação da composição das espécies dentro de uma mesma unidade vegetal. Esta dificuldade está atrelada à mistura de padrões espectrais, resultado da coexistência de um variado número de espécies vegetais e, portanto de respostas espectrais semelhantes em uma mesma unidade de área. Assim, visando à individualização e posterior quantificação espacial da ocupação de árvores de *Rhizophora* e *Avicennia* em manguezais da península de Bragança (PA), este trabalho analisou as sutis diferenças nos níveis de reflectância das árvores obtidas a partir de Imagens IKONOS fusionadas e dados de campo com índices de reflectância das folhas da vegetação. Fez-se uso da classificação orientada ao objeto, combinando classificação por amostras e por conhecimento (lógica Fuzzy), apoiadas nas propriedades: média das bandas espectrais, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de brilho de solo (SBI) e índice de brilho (BI). Desta forma, no dia 22 de setembro de 2003, data da aquisição da imagem, os manguezais ocuparam uma área em torno de 141,39 km<sup>2</sup> da península de Bragança, sendo representado principalmente por *Rhizophora* (104,91 ± 1,59 km<sup>2</sup>), *Avicennia* (18,76 ± 3,61 km<sup>2</sup>) e vegetação de manguezal sombreada (17,72 km<sup>2</sup>). As classes Terra Firme, Água e Outros ocupam 5.85, 49.09 e 96.55 km<sup>2</sup>, respectivamente. Os resultados aqui obtidos permitem uma melhor localização e quantificação da cobertura da vegetação de *Avicennia* e *Rhizophora* da península de Bragança-PA, e confirmam o uso de sensores orbitais de alta resolução espacial, como adequados para o mapeamento efetivo das vegetações costeiras com a possibilidade de subsidiar futuros estudos de densidade relativa de bosques de manguezal em uma escala regional, estimativas de biomassa, dinâmica do desenvolvimento de florestas de mangue, análise ambiental e capacidade de resiliência dos bosques da península bragantina

**Palavras-Chave:** Sensoriamento Remoto. IKONOS. Manguezais. Classificação Orientada a Objeto. *Avicennia* e *Rhizophora*.

## ABSTRACT

The use of remote sensing is one of the most efficient techniques for evaluating biomass and distribution of mangroves. However, there still's a big problem for identifying the species composition within a same vegetal unit. This difficulty is linked to the mixture of spectral patterns, resulting from the coexistence of a diverse number of vegetal species and therefore similar spectral responses in the same unit of area. Working towards the individualization and quantification of the spatial occupancy of *Rhizophora* and *Avicennia* mangrove trees in the peninsula of Bragança, this study analyzed the subtle differences in the mangrove reflectance levels from a set of pan sharpened IKONOS imagery and field data collection of the reflectance signature obtained directly on leaves of the mangrove vegetation. Object oriented classification was used, within a combined approach of samples and knowledge (fuzzy logic) classification, supported by the following image properties: mean of the spectral bands, normalized difference vegetation index (NDVI), soil brightness index (SBI) and brightness index (BI). Thus, on September 22 of 2003, date of image acquisition, the mangrove forests occupied an area of approximately 141,39 km<sup>2</sup> of the Bragança Peninsula and is represented mainly by *Rhizophora* (104.91 ± 1,59 km<sup>2</sup>), *Avicennia* (18.76 ± 3,61 km<sup>2</sup>), and shaded mangrove vegetation (17.72 km<sup>2</sup>). The classes Terra Firme, Water and Others occupy 5.85, 49.09 and 96.55 km<sup>2</sup>, respectively. The results obtained allow a better location and quantification of mangrove species in the peninsula of Bragança-PA, individualization of *Avicennia* and *Rhizophora* trees, confirms the use of orbital sensors of high spatial resolution as appropriate for the effective mapping of coastal vegetation and enables the subsidize of future studies on relative density of mangrove forests in a regional scale, estimates of biomass, development dynamics of mangrove forests, environmental analysis and resilience of mangrove forests the Bragança Peninsula.

**Key words:** Remote Sensing. IKONOS. Mangroves. Object Oriented Classification. *Avicennia* and *Rhizophora*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da península Bragantina. ....	3
Figura 2 – Domínios morfológicos da Planície Costeira Bragantina .....	6
Figura 3 - Anatomia foliar básica. ....	14
Figura 4 – Comportamento espectral de uma folha verde sadia. ....	15
Figura 5 – Mosaico da península de Bragança, imagens 00, 01, 02.....	25
Figura 6 – Imagem IKONOS de 22/09/2003, mosaico de três cenas, atmosféricamente corrigidas e fundidas pelo método Gram-Schmidt Spectral Sharpening (GSSS). ....	26
Figura 7 - Esquerda: Imagem Multiespectral (True Color), resolução espacial, 4 m; Direita: banda pancromática, 1 m de resolução; Centro: Fusão GSSS, True Color e 1m de resolução espacial. A análise visual mostra um ótimo desempenho da fusão GSSS, não apresentando inversões de brilho ou cor.....	27
Figura 8 - Estrutura do Processamento Digital.....	29
Figura 9 - Imagem processada, dividida em 6 blocos iguais, de 8000 x 8000 metros. ....	30
Figura 10 – Resultado da Segmentação. Na imagem superior, polígonos gerados pela segmentação multiresolução. Na imagem inferior, trecho não segmentado. ....	31
Figura 11 – Organização da Rede Hierárquica, com dois níveis hierárquicos e um tema externo. ....	32
Figura 12 – Seleção de Amostras. Em verde claro, amostras de <i>Avicennia</i> , em verde escuro, amostras de <i>Rhizophora</i> e em branco, amostras de Vegetação de Manguezal Sombreada.....	34
Figura 13 – Estrutura dos mecanismos de herança, limiares, regras fuzzy e a modelagem semântica. ....	36
Figura 14 – Tom esverdeado da Lagoa Salina, provavelmente devido à grande concentração de material fotossintetizante, foi enquadrada na classe Outros. ....	37
Figura 15 – Reflectância média total e erro padrão por banda, por classe.....	38
Figura 16 - Valores médios de refletância (%) obtidos a partir de imagens de satélites para as classes <i>Avicennia</i> e <i>Rhizophora</i> e para Vegetação de Manguezal Sombreada. ....	40
Figura 17 – Comportamento espectral (reflectância média em %) obtido diretamente das folhas das espécies de manguezal ( <i>Rhizophora</i> , <i>Avicennia</i> e <i>Laguncularia</i> ). ....	41
Figura 18 – Teste de classificação de <i>Laguncularia</i> . Em A, foram utilizados como parâmetros de classificação; Média das Bandas 1,2,3 e 4 e os índices SBI e BI. Em B, foram utilizados apenas os parâmetros de menor sobreposição espectral; Média da Banda 4 e os índices SBI e BI. ....	43

Figura 19 - Comparação entre o comportamento espectral das espécies de manguezal, obtidos diretamente nas folhas e dos valores obtidos na imagem IKONOS.....	45
Figura 20 – Distribuição dos pontos de Validação na península Bragantina. ....	48
Figura 21 - Documentação fotográfica dos pontos de validação; A - bosques de <i>Avicennia</i> e <i>Avicennia</i> Anã; B – Bosques de <i>Rhizophora</i> ; C – Bosques de <i>Avicennia</i> ; D – Área Degradada; E – Campo Herbáceo; F – Campo Herbáceo Queimado; G – <i>Laguncularia</i> ; H – Lagoa Salina. ....	50
Figura 22 – Mapa Temático da península de Bragança.....	56
Figura 23 – Esquerda: bosques jovens de <i>Laguncularia</i> . Direita: classificação em bordas de canais apontando presença de <i>Avicennia</i> e <i>Rhizophora</i> . Em amarelo <i>Avicennia</i> , verde para <i>Rhizophora</i> , cinza pra Outros, preto para Vegetação de Manguezal Sombreada, azul para Água. ....	58
Figura 24 – Esquerda: <i>Avicennia</i> Anãs resultado do stress hídrico/salino. Direita: classificação em áreas de transição manguezal/planícies herbácea. Em amarelo <i>Avicennia</i> , verde para <i>Rhizophora</i> , cinza pra Outros, preto para Vegetação de Manguezal Sombreada.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características das unidades morfoestratigráficas de Bragança .....	7
Tabela 2 - Distribuição topográfica das unidades de vegetação na península de Bragança.....	11
Tabela 3 - Características do Satélite IKONOS II.....	20
Tabela 4 - Características dos sensores a bordo do Satélite IKONOS II .....	21
Tabela 5 – Total de folhas, espécies e unidades vegetais analisadas. ....	23
Tabela 6 – Parâmetros utilizados para a correção atmosférica, ATCOR plug-in.....	24
Tabela 7 - Características Temporais e Radiométricas das Imagens IKONOS .....	24
Tabela 8 - Índice de Qualidade Espectral. O algoritmo gera um coeficiente de correlação de brilho e contraste entre as bandas de entrada e saída. ....	27
Tabela 9 - Parâmetros usados na segmentação multiresolução, Definiens, 2008 .....	31
Tabela 10 – Confusão Espectral entre <i>Laguncularia</i> e <i>Rhizophora</i> para as banda 1, 2 e 3 .....	33
Tabela 11 - Número de objetos amostrados e suas distribuições por classe. ....	35
Tabela 12 - Valores de reflectância média, em percentagem (média $\pm$ erro padrão), por banda, por classe e por bloco. ....	38
Tabela 13 - Estimador estatístico Kappa e sua qualificação dos resultados.....	39
Tabela 14 – Confusão Espectral entre <i>Laguncularia</i> e <i>Rhizophora</i> para as bandas 1, 2, 3, 4, e para os índices SBI e BI .....	42
Tabela 15 – Valores Médios de Reflectância, em percentagem, por banda, por classe, por bloco. Valores de p e F, obtidos a partir de ANOVA um critério, Tukey.....	46
Tabela 16 – Coordenadas, EPE, Espécies Dominantes na Validação e Classe Mapeada em cada ponto.....	47
Tabela 17 – Comparação entre a Imagem IKONOS, classificação e fotografia de campo.....	53
Tabela 18 - Matriz de confusão, exatidão global e coeficiente Kappa.....	54
Tabela 19 – Área das classes mapeadas, valores em km <sup>2</sup> . ....	55

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>RESUMOS</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	viii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	4
2.1 METAS.....	4
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA</b> .....	5
3.1 CLIMA .....	5
3.2 GEOMORFOLOGIA .....	5
3.2.1 <b>Planície Aluvial</b> .....	8
3.2.2 <b>Planície Estuarina</b> .....	8
3.2.3 <b>Planalto Costeiro</b> .....	9
3.2.4 <b>Planície Costeira</b> .....	9
3.3 VEGETAÇÃO.....	11
<b>4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL</b> .....	14
4.1 REFLECTÂNCIA EM FOLHAS INDIVIDUAIS.....	14
4.2 REFLECTÂNCIA SOBRE O DOSSEL .....	17
4.3 EFEITO DA SALINIDADE SOBRE A RESPOSTA ESPECTRAL .....	19
4.4 CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE IKONOS II.....	20
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	22
5.1 AMOSTRAGEM DE CAMPO PARA ANÁLISE ESPECTRAL DE FOLHAS ...	22
5.2 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA, FUSÃO E MOSAICO DE IMAGENS.....	23
5.3 SEGMENTAÇÃO .....	29
5.4 DEFINIÇÃO DE CLASSES .....	32
5.5 SELEÇÃO DE AMOSTRAS E CLASSIFICAÇÃO .....	34
5.6 ESTRATÉGIA DE CLASSIFICAÇÃO .....	36
5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE CONCORDÂNCIA KAPPA.....	38
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	60
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

A costa brasileira possui uma das maiores áreas de manguezal contínua do mundo (Kjerfve & Lacerda, 1993). Os mais exuberantes manguezais são encontrados no norte do Brasil (Szlafsztein *et al.*, 2000). No Pará, os manguezais constituem a formação vegetal litorânea dominante em aproximadamente 2.176 km<sup>2</sup> (Souza Filho, 2005). Esse ecossistema ocorre preferencialmente em costas inundadas por águas salobras, porém devido a grande descarga de água doce dos rios da costa norte brasileira, as planícies de inundação de lama apresentam extensas áreas de várzea e de transição manguezal/várzea (Cohen *et al.*, 2009). Portanto, em regiões de várzea ou de transição manguezal/várzea, grande parte da área contabilizada como manguezal, é de fato vegetação de várzea, que é também inundada pela maré, porém, de água doce. A dificuldade na individualização desses dois tipos de vegetação, através de imagens de satélite, de radar ou fusão de ambas, é atribuída à semelhança da resposta espectral a um mesmo nível de umidade na copa dessas florestas (Cohen *et al.*, 2009; Silva, 2009).

A utilização do Sensoriamento Remoto é uma das mais eficientes técnicas para o mapeamento da distribuição e quantificação de manguezais (Souza Filho & Paradella, 2002; Souza Filho, 2005). De fato, a delimitação da ocorrência de manguezais usando dados de sensores remotos não é tarefa de extrema dificuldade, considerando o contraste espectral entre esta unidade morfológica e a maioria dos outros tipos de coberturas continentais, excetuando-se a vegetação de várzea (Silva, 2009).

Em Bragança, relativamente distante de grandes descargas de água doce, não há áreas de várzea ou de transição manguezal/várzea. A vegetação da península encontra-se representada pela floresta costeira Amazônica (> 3 m acima do nível médio do mar), restinga (~ 3 m acima do nível médio do mar, próximo ao litoral), planície herbácea (entre 3 e 2,4 m) e manguezais que se encontram topograficamente distribuídos entre as cotas de 2,4 m, limitados pela planície herbácea e 1 m acima do nível médio do mar, limitado por sedimentos mais arenosos da zona de intermaré (Cohen *et al.*, 2005a).

A vegetação de manguezal é a mais abundante das vegetações da região. Sendo 87% da península dominada por três espécies de manguezal: *Rhizophora mangle* (mangue Vermelho), *Avicennia germinans* (mangue Preto) e *Laguncularia racemosa* (mangue Branco) (Krause *et al.*, 2001). As espécies *R. mangle* e *A. germinans* são as mais abundantes, havendo a prevalência de *R. mangle* (Reise, 1999; Krause *et al.*, 2001; Mehlig, 2001; Matni *et al.*, 2006; Menezes *et al.*, 2008; Mehlig *et al.*, 2010), ao passo que *L. racemosa* desenvolvem-se

em bordas de rio, formando grupos de pequeno porte e quase sempre monoespecíficos (Harum, 2004). Este cenário é condizente com a dominância esperada para os estuários amazônicos (Almeida, 1996) bem como ao longo de toda a região costeira do Brasil (Prance *et al.*, 1975; Lacerda *et al.*, 2002).

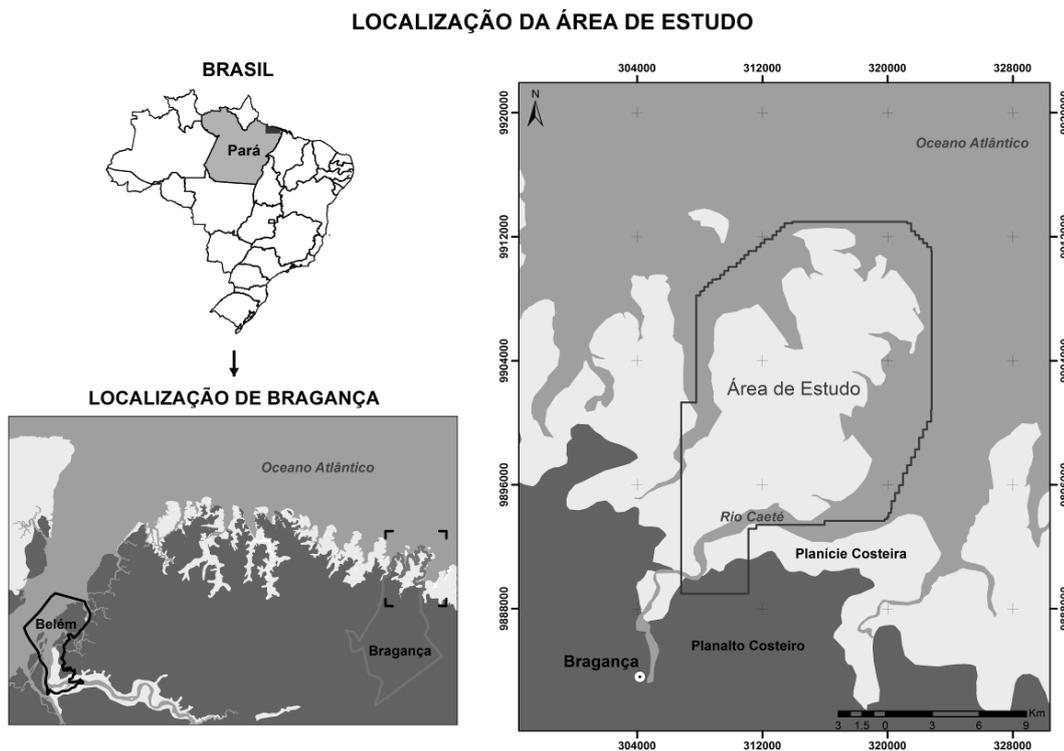
Logo a aplicação de procedimentos de identificação da vegetação de manguezal, na península de Bragança, através de tecnologias de sensoriamento remoto, é facilitada pela existência de uma menor diversidade vegetal nestes ambientes, comparativamente aos demais ambientes de florestas tropicais (Mochel & Ponzoni, 2007) e pela ausência da vegetação de várzea (Silva, 2009).

Entretanto, apesar das menores diversidades vegetais relativas, ainda existem dificuldades para a identificação da composição das espécies dentro de uma mesma unidade vegetal. Esta dificuldade na separação de espécies está atrelada a mistura de padrões espectrais, resultado da coexistência de um variado número de espécies vegetais, neste caso *R. mangle*, *A. germinans* e *L. Racemosa* e, portanto de respostas espectrais similares, em uma mesma unidade de área (Mochel & Ponzoni, 2007). Essa constatação exige que o mapeamento da vegetação litorânea alcance uma resolução espacial/espectral adequada para melhor individualizar a assembleia vegetal constituinte de cada ecossistema.

A maioria dos satélites de observação terrestres, como Landsat 7, Spot, Ikonos, Quickbird, CBERS ou Geoeye, fornecem imagens pancromáticas às resoluções espaciais mais altas que em seus respectivos modos multiespectrais (Ehlers, 2008). Neste cenário, o objetivo da fusão de imagens é combinar a alta resolução espacial e a informação multiespectral, formando um produto único, que mantém a alta resolução da imagem pancromática e as características espectrais da imagem multiespectral (Klonus & Ehlers, 2009). Os métodos de fusão funcionam adequadamente em variadas aplicações, em especial, para dados de um único sensor (*single sensor*) e sem variação temporal (*single-date*) (Ehlers & Klonus, 2008).

Adicionalmente, a classificação objeto orientada enriquece o processo de reconhecimento de padrões, por permitir o abandono do pixel como unidade única de classificação, passando a adotar objetos (ou regiões) obtidos por segmentação prévia da imagem (Batz & Schäpe, 2000). Em imagens de alta ou altíssima resolução espacial, esta característica permite a valorização da informação fornecida por atributos espaciais, forma, textura, contexto e outros, que são de difícil caracterização quando comparados aos dados de imagens de satélite de média resolução espacial (Batista & Haertel, 2007).

Esse trabalho procura caracterizar espectralmente a vegetação de manguezal e individualizar as *Rhizophora* e *Avicennia* dentro das florestas de manguezal, por meio da diferença nos níveis de reflectância obtidos a partir de Imagens IKONOS e dados de campo dos índices de reflectância das folhas da vegetação. A área de estudo compreende parte da costa paraense, mais precisamente a península Bragantina, nordeste do estado do Pará, e está posicionada entre  $47^{\circ}$  -  $46^{\circ} 45' W$  e  $1^{\circ}$  -  $1^{\circ} 15' S$  (Figura 1).



**Figura 1 - Localização da península Bragantina.**

Os resultados desse estudo permitirão uma melhor localização e quantificação espacial das espécies de manguezal da península de Bragança-PA, podendo tornar-se importante ferramenta para estimativas de biomassa, densidade arbórea, dinâmica do desenvolvimento de florestas de manguê, análise ambiental e capacidade de resiliência dos bosques de manguezal da península bragantina.

## 2 OBJETIVOS

Caracterizar espectralmente a vegetação de manguezal e individualizar a cobertura de *Rhizophora* e *Avicennia* dentro das florestas de manguezal, por meio da diferença nos níveis de reflectância obtidos a partir de Imagens IKONOS e dados de campo dos índices de reflectância das folhas da vegetação.

### 2.1 METAS

- a) Correção atmosférica e mosaico das imagens;
- b) Identificar as faixas de reflectância das vegetações a partir de imagens de satélite;
- c) Obter em campo os índices de reflectância das folhas das unidades de vegetação;
- d) Gerar um banco de dados com o perfil espectral de cada espécie vegetal identificada;
- e) Estabelecer comparação entre os resultados obtidos por meio da espectrofotometria e da análise espectral das imagens;
- f) Quantificar espacialmente as unidades individualizadas;
- g) Elaborar, validar e quantificar o mapa de cobertura vegetal baseado no estudo comparativo entre os índices de reflectância das vegetações de manguezal;

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

#### 3.1 CLIMA

O clima local é do tipo Am (Tropical Úmido e Monções), que segundo a classificação de KÖPPEN é caracterizado por ser quente e úmido (clima equatorial amazônico), com pequena amplitude térmica mensal (em torno de 3°C), oscilando entre 25°C e 28°C. Um período mais seco com menos chuva ocorre de junho a novembro. As estações meteorológicas costeiras de Belém apresentam a temperatura média mensal máxima de 26.5°C (novembro) e a mínima de 25,4°C (março). A precipitação anual média registrada é 2.277 mm<sup>3</sup> em Belém e 3.216 mm<sup>3</sup> em Soure, Ilha do Marajó (Fisch *et al.*, 1998).

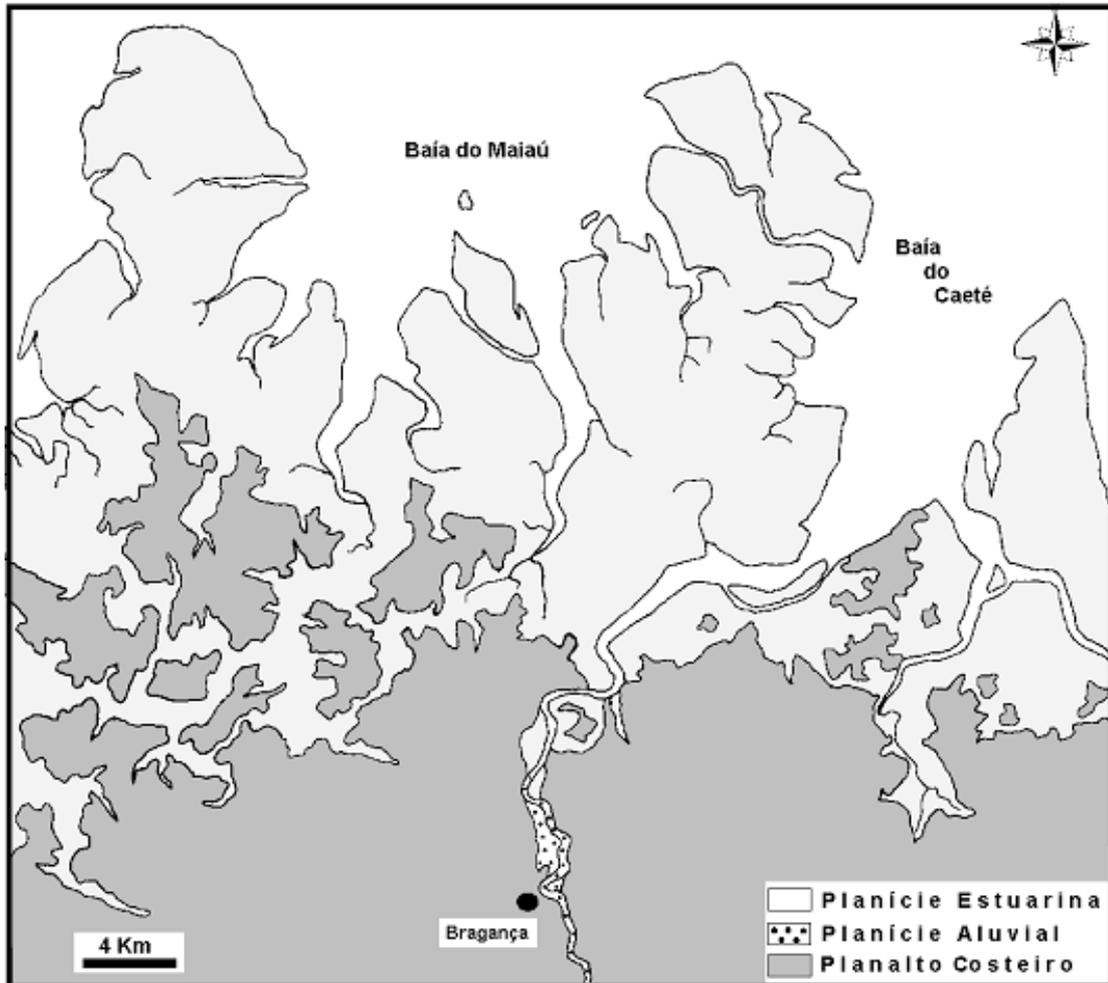
#### 3.2 GEOMORFOLOGIA

A costa norte do Brasil é dominada por macromarés com feições geomorfológicas características, com extensos depósitos de planície de maré (manguezais), com estuários, baixios, pântanos salinos, ilhas barreiras, dunas, praias e leques de lavagens associados (Souza Filho & El-Robrini, 1996).

Uma das características marcante da linha de costa paraense e maranhense é que estas apresentam penínsulas recortadas por canais de maré, dominadas por macromarés (~ 4 m) com correntes que atingem até 1,5 ms<sup>-1</sup> durante a maré de sizígia (Cohen *et al.*, 1999).

O município de Bragança está inserido na região nordeste do estado do Pará, sendo caracterizado por uma faixa costeira que se estende da Ponta do Maiaú até a foz do Rio Caeté, perfazendo uma área de 1.570 km<sup>2</sup> e cerca 40 km de linha de costa (Souza Filho & El-Robrini, 1996).

Souza Filho (1995a) compartimentou a Planície Costeira Bragantina segundo sua forma, natureza dos sedimentos, estratigrafia e vegetação dominante em três diferentes domínios morfológicos: Planalto Costeiro, Planície Aluvial e Planície Estuarina (Figura 2).



**Figura 2 – Domínios morfológicos da Planície Costeira Bragantina**

**Fonte: (Souza Filho & El-Robrini, 1996)**

Com base na litologia, estruturas sedimentares, textura, elevação, cor e contato, Souza Filho *et al.* (2006), identificou 10 fácies sedimentares na Planície Costeira, sobrepondo um substrato Miocênico (Tabela 1). De acordo com o autor, a planície costeira de Bragança evoluiu de um ambiente fluvial para uma área de intermaré lamosa acompanhando a última elevação eustática do nível do mar. A deposição de fácies marinhas/estuarinas ocorreu em associação com três gerações de ilhas-barreira, desenvolvidas de uma forma verdadeiramente transgressiva, aparentemente provocada por pelo menos dois pequenos episódios de subsidência nos últimos 3000 anos.

Tabela 1 – Principais características das unidades morfoestratigráficas de Bragança.

Unidades Morfoestratigráficas	Características dos Sedimentos	Morfologia	Tempo de Inundação	Vegetação
<b>Planície de Inundação</b>	Lama cinza oliva claro rica em fragmentos orgânicos e fitoturbações	Áreas planas limitadas por leves e pelo planalto costeiro	Somente durante os períodos de grandes cheias	Herbácea (Aleucharías sp.)
<b>Barra de Canal</b>	Areias fina a média de cor amarelo pálido, com marcas onduladas	Barras arenosas longitudinais de meio de canal e barras arenosas em pontal	Constantemente inundados	_____
<b>Manguezal de Supramaré</b>	Lama superficial oxidada, cinza acastanhada, fitoturbada com marcas e fragmentos orgânicos. Seguida de lama cinza médio, intercalada com fragmentos de matéria orgânica	Planície de supramaré, colonizada por mangue de pequeno porte	Inundação irregular durante as marés de sizígia mais altas (5-6m)	Mangue
<b>Pântano Salino</b>	Camada superficial rica em fragmentos orgânicos pretos acastanhados escuros, seguida de lama oxidada de cor marrom amarelada e por lama cinza médio, maciça, com areias formando acamamento lenticular	Planície de supramaré encaixada em uma paleo rede de drenagem colmatada, limitada pelo planalto costeiro e recortada por córregos de marés	Inundação irregular durante as marés de sizígia mais altas (5-6m) e durante todo o período chuvoso	Herbácea (Aleucharías sp.)
<b>Manguezal de Inter-maré</b>	Lama superficial oxidada, cinza acastanhada, seguida de lama cinza médio, sem estruturação aparente, fitoturbada com marcas e fragmentos orgânicos	Planície de inter-maré colonizada por mangue de grande porte	Inundado regularmente pela maré semidiurna	Mangue
<b>Planície Arenosa</b>	Areias quartzosas, finas, cinza muito claro, com estruturação maciça, estratificação plano-paralela, cruzada tangencial de pequeno porte, acamamento flaser e clastos de argila retrabalhados	Extensas áreas planas, recortadas por canais de marés, com “sand waves”, (mega) ondulações e barras expostas durante a maré baixa	Inundado regularmente pela maré semidiurna	_____
<b>Barra em Pontal</b>	Areias quartzosas, finas, cinza muito claro, intercaladas com lama, formando estrutura heterolítica inclinada...	Forma lunada	Constantemente inundados	_____
<b>Dunas Costeiras</b>	Areias quartzosas, muito fina, amarelo pálido, com estratificação cruzada tabular de grande porte e estratificação oblíqua	Dunas longitudinais e piramidais	_____	Arbustiva
<b>Ilhas Barreiras</b>	Areias quartzosas cinza amarelado a cinza muito claro, finas a muito finas, com estrutura mosqueada no topo e cruzada de médio porte na base	Cordões com cristas irregulares e cordões com cristas alongadas, limitados por manguezais	Inundado somente no período chuvoso	Arbustiva
<b>Praia</b>	Areias quartzosas finas, com fragmentos de conchas, cinza muito claro, com estratificação plano-paralela	Extensas áreas planas, inclinadas 2° numo ao mar, recortadas por sistema de calha e crista (“ridge e runnel”)	Inundado regularmente pela maré semidiurna	_____

Adaptado de Souza Filho & El-Robrini, 1996; Souza Filho *et al.*, 2006.

### 3.2.1 Planície Aluvial

É representada pelos depósitos sedimentares associados ao Rio Caeté. Estende-se ao sul do limite da maré na planície estuarina à altura de Bragança, abrangendo uma área 3.1 km<sup>2</sup>, sendo subdividida em três unidades (Souza Filho, 1995b; Souza Filho & El-Robrini, 1996): **Canal Fluvial**, canal meandrante, com depósitos de barras em pontal e longitudinais, encaixados no Planalto Costeiro. **Planície de Inundação**, limitada por diques marginais (“levees”) e pelo Planalto Costeiro, sendo colonizadas por campos herbáceos, inundados somente durante os períodos de grandes cheias, quando o transbordamento dos canais permite acumulação dos sedimentos mais finos. **Diques Marginais (“levees”)**: elevações longitudinais construídas 50 cm acima da planície de inundação, adjacente ao canal fluvial, vegetados por mangues e *Eleocharis* sp, sendo rompidos durante os períodos de grandes cheias, no momento do transbordamento.

### 3.2.2 Planície Estuarina

Limitada a sul pela planície aluvial no limite superior da influência das marés e ao norte pela zona de predominância dos processos marinhos. É margeada pela planície costeira em sua porção distal e pelo Planalto Costeiro na proximal, ocupando uma área de 462 km<sup>2</sup>. Segundo Souza Filho (1995b) e Souza Filho & El-Robrini (1996) três unidades morfológicas são observadas e caracterizadas: **Canal Estuarino**, varia da porção distal para a proximal, refletindo progressivamente a influência das marés ao longo do canal. É compartimentado em quatro padrões morfológicos distintos (funil estuarino, segmento retilíneo, segmento meandrante e canal de curso superior); **Córregos de Maré**, recortam a planície costeira e apresentam forma de meandrante à retilínea, com largura máxima de 100 m. Em direção ao continente, são bifurcados, rasos, estreitos e com substrato lamoso; em direção ao mar, os mesmos são singulares e largos, com fundo arenoso. São frequentes barras em pontal. **Planície de Inundação**, ocorre ao longo do funil estuarino e dos segmentos retilíneos e meandantes, onde são observados depósitos lamosos. No canal de curso superior, as planícies de inundação são constituídas por sedimentos pelíticos fitoturbados, ricos em matéria orgânica. Às margens desse trecho, ocorrem estreitas franjas de manguezal, seguidas por gramíneas e palmeiras que colonizam a planície de inundação e desaparecem quando entram em contato com o Planalto Costeiro.

### 3.2.3 Planalto Costeiro

Corresponde ao embasamento da Planície Costeira Bragantina, sendo constituído por sedimentos do Grupo Barreiras. Representa uma superfície plana arrasada, suavemente ondulada e fortemente dissecada, com cotas entre 50 e 60m, que diminuem progressivamente em direção à planície costeira, a norte (Costa *et al.*, 1993). Este contato é marcado por uma mudança litológica (sedimentos areno-argilosos avermelhados do Grupo Barreiras e lamosos da planície costeira), vegetacional (floresta secundária e mangue) e morfológica brusca (falésias mortas de até 1m de altura) (Souza Filho & El-Robrini, 1996).

### 3.2.4 Planície Costeira

É o mais extenso dos domínios morfológicos, abrangendo uma área de 615,7 km<sup>2</sup>. É limitada ao sul por falésias mortas de 1 a 2 m de altura, esculpida no Planalto Costeiro e a norte pela zona onde predominam os processos marinhos. Compreende desde as amplas planícies de maré até os cordões duna-praia, dominados pelos processos oceanográficos. Seis unidades foram identificadas nesse domínio (Souza Filho, 1995b; Souza Filho & El-Robrini, 1996; Souza Filho *et al.*, 2006): **Pântano Salino**, os pântanos salinos ou “Campos de Bragança” ocupam uma área de 82,7 km<sup>2</sup>. Estão sob influência do domínio de supramaré e encaixados em uma rede de drenagem colmatada, alimentada principalmente por sedimentos finos fluviais e oriundos da planície de maré lamosa; **Manguezais**, constituem extensas planícies lamosas de até 20 km de largura, situadas entre os níveis de maré alta de sizígia e a média das marés, ocupando uma área de 466,8 km<sup>2</sup>. São constituídos por sedimentos lamosos colonizados por três espécies típicas de mangue: *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (Acanthaceae) e *Laguncularia racemosa* (Combrethaceae) (Matni *et al.*, 2006). Baseado nas marés, altimetria relativa e porte da vegetação de mangue, estes depósitos foram divididos em: a) Manguezal de supramaré, topograficamente mais elevado, com menos porte arbóreo e influenciado pelas marés somente durante os períodos de sizígia; e b) Manguezal de intermaré, topograficamente mais baixo, maior porte arbóreo, com frentes de progradação colonizadas por mangues jovens que bordejam a planície costeira;. **Ilhas-Barreira**, são compostas de areia quartzosa fina, bem ordenada, arredondada, branca e marrom (resposta aos processos de oxidação), com fragmentos de conchas esparsas. São geralmente compostas por três subfácies, que são fácies de dunas, praias e “washover”. Três gerações de ilhas-barreira foram reconhecidas na planície; **Planície Arenosa**, localiza-se na

porção distal da planície costeira (49 km<sup>2</sup>), margeando os depósitos de manguezal e dunas costeiras. Esta área é dominada por baixios arenosos a partir do limite das marés baixas de quadratura até a zona de inframaré. Geralmente, esta área apresenta um gradiente baixo (1:100), que por vezes, é quebrado pela presença de barras arenosas de até 3 m de altura. As areias formam megaondulações, ondulações de cristas retas, lunadas, rombóides e lingóides, além de “sand waves” e fundos planos; **Dunas Costeiras**, são limitadas ao sul por manguezais de intermaré e ao norte pela planície arenosa, perfazendo uma área de 6,4 km<sup>2</sup>. Os cordões de dunas mais frequentes são formados por dunas fixadas por campos arbustivos, que constituem cristas paralelas à linha de costa, produzidas pela estabilização de dunas longitudinais e piramidais de aproximadamente 7 e 5 m de altura, respectivamente. As dunas são o resultado do retrabalhamento dos sedimentos arenosos da zona de intermaré, que expostos durante a maré baixa, são transportados pelo vento, causando a migração destes depósitos em direção aos manguezais. Atualmente estão sendo erodidas por ondas e correntes de marés e/ou dissipadas, constituindo falésias ao longo da linha de costa; **Praia**, as praias bordejam a planície de maré lamosa (manguezal de intermaré), sendo recortada pelos canais de maré. São representadas por cordões arenosos (“beach ridges”) lineares, que migram em direção ao continente sobre depósitos de manguezais, constituindo uma costa retrogradacional. É subdividida em: a) Pós-praia: com 200 m de extensão, é limitada em direção ao mar pelo nível de maré alta (escarpa de praia) e, em direção ao continente, por dunas costeiras. É representada por uma superfície aproximadamente horizontal, sobre a qual se desenvolvem pequenas dunas; e b) Estirâncio: representa a face de praia propriamente dita e está limitada pelos níveis de maré alta e baixa, correspondendo à zona de intermaré. Constitui uma zona levemente inclinada em direção ao mar (2 - 3°), muito extensa (~ 700 m), onde se observa um sistema de cristas e calhas (“ridges e runnels”), dispostas paralelamente à linha de costa e interligados por canaletas (“gaps”).

### 3.3 VEGETAÇÃO

A península bragantina é colonizada principalmente por manguezais com árvores até 30 m de altura que se encontram sobre a planície costeira e limitada por paleo-falésias de 1 - 2 m de altura esculpida no planalto costeiro (Souza Filho & El-Robrini, 1996; Cohen & Lara, 2003).

Ao norte, os manguezais são limitados por dunas onde atualmente estão ocorrendo os processos marinhos (Souza Filho & El-Robrini, 1996). A tabela 2 mostra as distribuições topográficas das unidades de vegetação na península de Bragança.

**Tabela 2 - Distribuição topográfica das unidades de vegetação na península de Bragança.**

Unidade de Vegetação	Vegetação	Área (Km <sup>2</sup> )	Topografia e Maré (elevação acima do nível médio do mar – m)	Sedimento
Floresta Costeira Amazônica	<i>Coccoloba latifolia</i> , <i>Himatanthus articulata</i> , <i>Anacardium occidentale</i> , <i>Protium heptaphyllum</i> , <i>Ouratea castanaefolia</i> , <i>Ouratea microdonta</i> , <i>Tapirira guianensis</i> , <i>Myrcia fallax</i> , <i>Myrcia sylvatica</i> , <i>Eugenia patrisii</i> .	1	> 3.0 (nunca inundado pela maré)	Areia
Restinga	<i>Chrysobalanus icaco</i> , <i>Anacardium occidentale</i> , <i>Byrsonima crassifolia</i> .	2	> 3.0 (próximo ao litoral)	Areia
Planície Herbácea	<i>Sporobolus virginicus</i> (Poaceae) <i>Eleocharis geniculata</i> (Cyperaceae)	7	2.4 – 3.0 (supramaré)	Lama-Areia
Manguezal degradado	Raízes e troncos mortos de <i>Avicennia</i> e <i>Rhizophora</i>	3	2.2 – 2.5 (Inundado apenas pelas marés de sizígea)	Lama
Manguezal	<i>Rhizophora mangle</i> , <i>Avicennia germinans</i> e <i>Laguncularia racemosa</i> .	168	1.0 – 2.4 (entre o nível do mar médio e a média da maré alta de sizígea)	Lama

Fonte: Cohen *et al.*, 2005a.

A vegetação da península encontra-se representada pela floresta costeira Amazônica (> 3 m acima do nível médio do mar), restinga (~ 3 m acima do nível médio do mar, próximo ao litoral), planície herbácea (entre 3 e 2,4 m) e manguezais que se encontram topograficamente distribuídos entre as cotas de 2,4 m, limitados pela planície herbácea e 1 m acima do nível médio do mar, limitado por sedimentos mais arenosos da zona de intermaré (Cohen *et al.*, 2005a).

A vegetação de manguezal é a mais abundante das vegetações da região. Sendo 87% da península dominada por 3 espécies de manguezal: *Rhizophora mangle* (mangue Vermelho), *Avicennia germinans* (mangue Preto) e *Laguncularia racemosa* (mangue Branco) (Krause *et al.*, 2001). A distribuição das espécies de mangue está relacionada à frequência de inundação (Lugo & Snedacker, 1974). Em geral *R. mangle* desenvolve-se melhor em áreas de frequente inundação, enquanto *A. germinans* é capaz de sobreviver em áreas pouco inundadas (Tomlinson, 1986).

Na península de Bragança, *R. mangle* e *A. germinans* são as espécies mais abundantes, havendo a prevalência de *R. mangle* (Reise, 1999; Krause *et al.*, 2001; Mehlig, 2001; Reise, 2003; Matni *et al.*, 2006; Menezes *et al.*, 2008; Mehlig *et al.*, 2010). Este cenário é condizente com a dominância esperada para os estuários amazônicos (Almeida, 1996), bem como ao longo de toda a região costeira do Brasil (Prance *et al.*, 1975; Lacerda *et al.*, 2002). *L. racemosa* ocorrem em bordas de florestas, clareiras e áreas de recolonização (Berger *et al.*, 2006). Em Bragança, *L. racemosa* desenvolvem-se em bordas de rio, formando grupos de pequeno porte e quase sempre monoespecíficos (Harum, 2004).

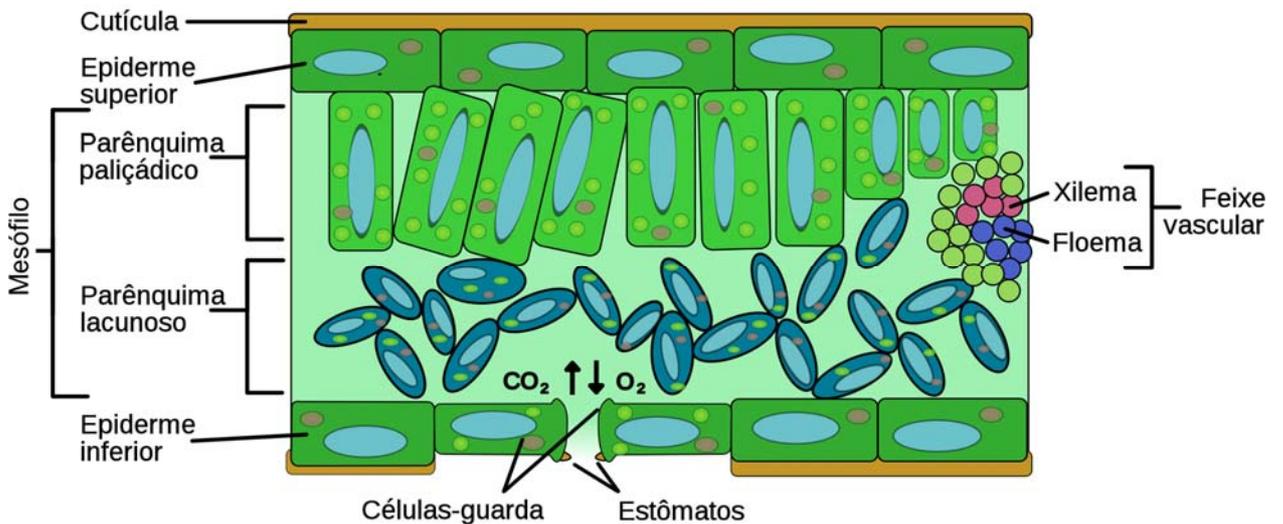
De acordo com Menezes *et al.* (2008) os seguintes tipos de florestas de manguezal podem ser distinguidos na península: 1) **Florestas de *Avicennia germinans* anãs**, média de altura das árvores <2,5 m (Reise, 1999; 2003), colonizam áreas topograficamente mais elevadas (acima do nível médio das marés de sizígia, frequência de inundação < 28 dias/ano, salinidade intersticial de 90-100); 2) **Florestas de *A. germinans* de baixa estatura**, média de altura das árvores de 6 m (com média de 5 cm de DAP) (Reise, 1999), predominam em áreas inundadas apenas durante as marés de sizígia normais (28-78 dias/ano), salinidade da água intersticial de 90-50; 3) **Florestas altas dominadas por *A. germinans***, florestas mistas altas, média de 11,8 m de altura, com média de 19,2 centímetros DAP (Menezes *et al.*, 2003), inundados por cerca de 175 dias/ano, salinidade intersticial de 23-58; 4) **Florestas mistas altas de *R. mangle/A. germinans***, média de 12 m de altura, com média de 31 cm DAP; (Menezes *et al.*, 2003), composto por *R. mangle*, *A. germinans* e *L. racemosa*, mas dominado

por *R. mangle*, colonizam os níveis médios da maré, normalmente bem inundados (até 233 dias/ano), salinidade intersticial de 20-60; 4a) Uma **variedade de floresta do tipo mista alta de *R. mangle/A. germinans***, ocorre em condições salobras, tem propriedades estruturais semelhantes, mas apresenta um maior número de espécies associadas de sub-bosque (Menezes *et al.*, 2003; Berger *et al.*, 2006). A faixa de salinidade intersticial é de 10-17 e frequência de inundação de cerca de 140 dias/ano. Estas florestas ocupam partes internas do estuário, com marcante influência do escoamento superficial de água doce.

## 4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL

### 4.1 REFLECTÂNCIA EM FOLHAS INDIVIDUAIS

Para a individualização de alvos vegetais a partir da utilização do sensoriamento remoto, as folhas são os elementos vegetais de principal interesse, pois determinam por meio de características morfológicas e bioquímicas, os comprimentos de onda absorvidos, refletidos e transmitidos (Affonso, 2004). Basicamente a anatomia foliar apresenta três tecidos: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular ou feixe (Figura 3).



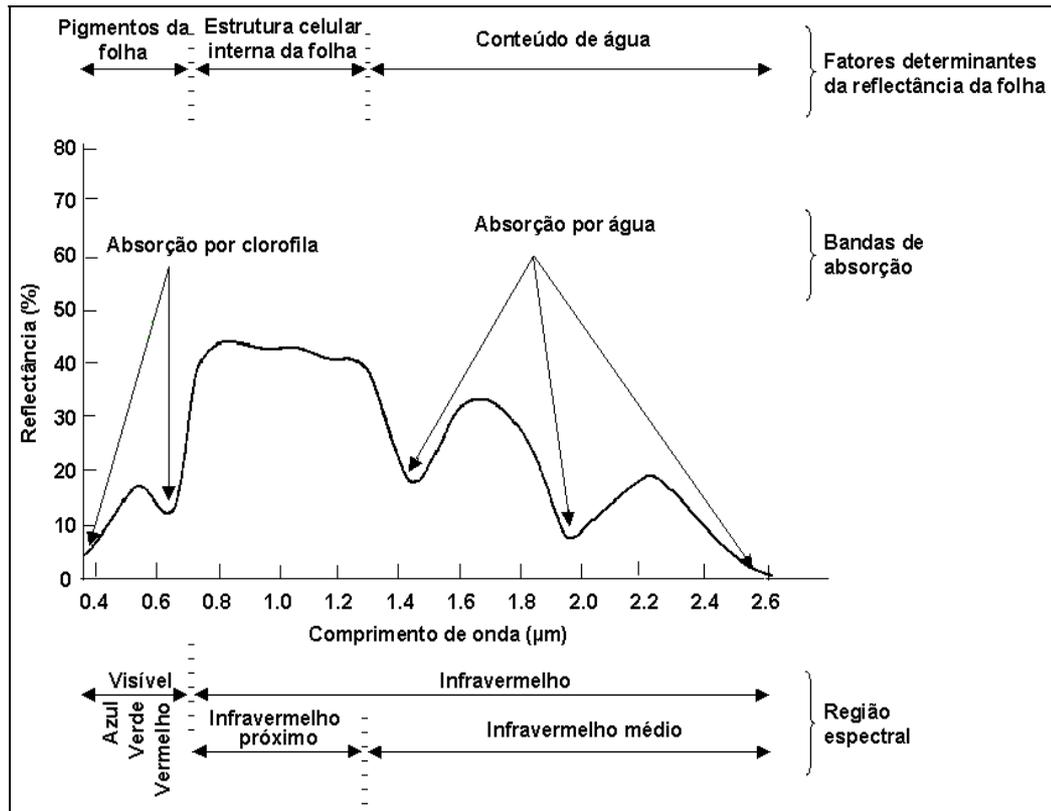
**Figura 3 - Anatomia foliar básica.**

Fonte: Modificado de McKenna (2007).

Quando comparamos os comprimentos de onda da radiação e o tamanho das estruturas internas foliares, notamos que as últimas apresentam dimensões maiores e, portanto capazes de promover desvios na trajetória da energia radiante, caracterizando um espalhamento no interior da folha. Os constituintes foliares que influenciam na reflectância são a celulose, os pigmentos, as estruturas celulares e os espaços ocupados pela água e ar.

Ao incidir sobre a folha, uma pequena parte da energia radiante é refletida pela epiderme enquanto uma maior porção é transmitida para o mesófilo onde, dependendo do ângulo de incidência, os raios são refletidos nas paredes celulares.

A figura 4 representa o comportamento de uma folha verde sadia com relação aos intervalos do espectro eletromagnético fornecido pela radiação incidente.



**Figura 4 – Comportamento espectral de uma folha verde sadia.**

Fonte: Affonso (2004).

Com base na figura 4, será descrito a seguir o comportamento espectral de uma folha sadia em três intervalos da radiação incidente: visível (0,4 – 0,7 μm), infravermelho próximo (0,7 – 1,3 μm) e infravermelho médio (1,3 – 2,6 μm).

Os valores de reflectância são relativamente baixos na região do visível, com um único pico próximo a 20% no intervalo entre 0,5 e 0,6 μm correspondente à cor verde. A curva possui ainda duas depressões nas faixas do azul (0,4 – 0,5 μm) e vermelho (0,6 – 0,7 μm) que representam a absorção da radiação por pigmentos fotossintéticos (clorofilas *a* e *b*, carotenos e xantofilas). Nesta seção, o comportamento espectral da folha é governado pela fotossíntese.

Na passagem para o infravermelho próximo, ocorre um aumento considerável da reflectância que se mantém quase constante durante todo o intervalo. Isto se deve a dois fatores: o primeiro é a ausência de pigmentos capazes de absorver a radiação eletromagnética nestes comprimentos de onda e o segundo diz respeito ao espalhamento interno sofrido pela radiação eletromagnética (REM) em função da disposição da estrutura morfológica foliar (Gates *et al.*, 1965).

Segundo Affonso (2004), o conteúdo de água presente na folha é responsável pelo comportamento espectral na região do infravermelho médio, sendo as depressões apresentadas (1,45 e 1,95  $\mu\text{m}$ ), locais com grande concentração do líquido.

Para Ponzoni (2001), ainda existem outros fatores que influenciam na interação com a radiação eletromagnética, como a maturação, o estresse da planta e o déficit hídrico.

A capacidade para a realização da fotossíntese aumenta desde a emergência até a fase de maturidade fisiológica da planta, a partir desse ponto ocorre um declínio da taxa fotossintética até a maturação completa do vegetal. Devido à íntima relação existente, a absorvância também é reduzida no estágio completo de maturação, favorecendo a reflexão na faixa do visível. Para o infravermelho próximo, esse fenômeno também é evidente, pois as folhas velhas apresentam grande quantidade de estruturas celulares internas que refletem a REM (Ponzoni, 2001).

Quanto às situações de estresse, estas podem estar relacionadas com o ataque de pragas, poluição ou outros agentes capazes de modificar o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, ocasionarem necroses, introduzir substâncias estranhas no organismo ou provocarem desequilíbrio hídrico foliar (Ponzoni, 2001).

Quando a planta é submetida a um déficit hídrico, uma série de reações ocorre em seu interior para restaurar a estabilidade, sendo uma delas o fechamento dos estômatos. Essa situação proporciona uma menor perda hídrica e conseqüentemente a diminuição da taxa fotossintética em razão da menor absorção de  $\text{CO}_2$  do meio. A redução da fotossíntese faz com que parte da energia que deveria ser absorvida passe a ser refletida, favorecendo assim o estudo da resolução espectral (Ponzoni, 2001).

## 4.2 REFLECTÂNCIA SOBRE O DOSSEL

As seções anteriores tratavam apenas do comportamento espectral em folhas individuais, onde toda radiação emitida pela fonte interage unicamente com o alvo de estudo, caracterizando um ambiente ideal. Entretanto, é necessário reforçar que o comportamento espectral de dosséis está sujeito a fatores de natureza geométrica (iluminação e visada) e biofísica [índice de área foliar (IAF) e distribuição angular da folha (DAF)], além das propriedades espectrais das folhas em si (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

A reflectância obtida com amostras de folhas isoladas é estimada pelo fator de reflectância hemisférica, diferentemente daquela emitida por dosséis, onde prevalece o fator bidirecional (Ponzoni, 2002). No caso de imagens geradas em sensores orbitais, o fator de reflectância bidirecional passa a ser denominado fator de reflectância aparente ou simplesmente fator aparente, devido à interferência atmosférica.

Tanto as amostras individuais de folhas quanto do dossel apresentam a mesma curva padrão para o comportamento espectral alterando somente a intensidade da reflectância, que assume valores maiores nas folhas.

Segundo Asrar (1989), os principais fatores que afetam a resposta espectral de um dossel em relação a sua arquitetura são: 1) a distribuição espacial da vegetação; 2) o índice de área foliar (IAF); 3) distribuição angular das folhas (DAF); e 4) distribuição dos elementos da vegetação.

O dossel vegetal é constituído por elementos da própria vegetação, como folhas, galhos, frutos, flores, etc. Logo, o fluxo de radiação incidente sobre qualquer um destes elementos estará sujeito a dois processos: espalhamento e absorção (Ponzoni, 2002). A distribuição espacial desses constituintes, assim como suas densidades e orientações definem a arquitetura da vegetação. Para alguns modelos de reflectância, o dossel pode ser formado por subdosséis arranjados regularmente ou aleatoriamente seguindo uma orientação específica (Ponzoni, 2001).

Quando o dossel ou subdossel é dito homogêneo, sua densidade é considerada uniforme sendo definida pelo índice de área foliar (IAF), obtido da relação entre a área que o vegetal ocupa e a área disponível (solo). Esse índice é um dos principais parâmetros da vegetação, sendo requerido para modelos de crescimento vegetal e evapotranspiração, podendo ser ainda relacionado à biomassa (Ponzoni, 2002).

A distribuição angular das folhas (DAF) influencia na resposta espectral do dossel devido aos diferentes fatores, tais como a proporção de sombras sobre diferentes folhas, a disposição predominantemente horizontal e a diferença na reflectância das partes dorsais e ventrais das mesmas. O ângulo de inserção foliar regula o grau de penetração da radiação no interior da copa da planta e de acordo com esse parâmetro, as plantas são classificadas em: erectófitas, o ângulo de inserção é mais ou menos paralelo ao caule; planófila, o ângulo se aproxima de 90° em relação ao caule; e intermediária, onde parte das folhas possui ângulos de ambas as inserções anteriores (Moreira, 2003).

Ainda vale ressaltar que cada dossel possui características próprias e desenvolve-se sobre diferentes tipos de solo em condições ambientais diversas. Logo, como ocorre com qualquer outro objeto de estudo, as técnicas de sensoriamento estão sujeitas as chamadas ambiguidades, onde os efeitos ocasionados por fatores ou parâmetros distintos podem atribuir valores iguais de reflectância, dando uma mesma “aparência” às imagens, mesmo se tratando de coberturas diferentes (Ponzoni, 2001). Por esse motivo ressalta-se o conhecimento da área por meio de amostras coletadas em campo, no sentido de validar os dados obtidos com o processamento digital.

### 4.3 EFEITO DA SALINIDADE SOBRE A RESPOSTA ESPECTRAL

Manguezais são florestas de intermaré que colonizam substrato salino ao longo de litorais tropicais e subtropicais. As espécies de manguezal são diferentemente distribuídas no espaço, seguindo um padrão de orientação e zonação, paralelo à costa (Duke *et al.*, 1998). Estas zonas são em geral monoespecíficas ou fortemente dominadas por uma ou duas espécies, e sujeitas à frequência de inundação e a um tempo de imersão relativo à maré.

A característica mais notável das espécies de manguezal é a habilidade de tolerar o sal (NaCl) (Parida *et al.*, 2003). Espécies de manguezal respondem morfo-, fenó- e fisiologicamente diferente à salinidade, e as diferenças entre as espécies são responsáveis pela zona particular que elas ocupam dentro do ecossistema de manguezal (Ball, 1996). Assim, exclusões competitivas ao longo de gradientes de salinidade tendem a ocorrer entre as espécies de manguezal (Duke *et al.*, 1998).

O crescimento de várias espécies pode ser afetado por ausência ou excesso de NaCl no substrato (Downton, 1982; Clough, 1984; Burchett *et al.*, 1989; Pezeshki *et al.*, 1990; Ball & Pidsley, 1995). Alta salinidade causa estresse hiperiônico e hiperosmótico e as consequências destes podem ser a morte da planta e/ou diminuição da produtividade (Hasegawa *et al.*, 2000). Já é reconhecido, através de estudo comparativo, que há uma relação direta entre alta concentração de sal e a diminuição do crescimento vegetal, da atividade fotossintética, do transporte de elétrons e do conteúdo de clorofila (Parida *et al.*, 2003).

Logo, a colonização de uma dada região por um grupo vegetal e, portanto, a prevalência de um sinal espectral característico, é também limitada pela salinidade intersticial. Na península de Bragança *A. germinans* é reconhecidamente mais tolerantes à elevadas salinidades que *R. mangle* (Reise, 2003).

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE IKONOS II

O IKONOS é um satélite de alta resolução espacial operado pela Empresa GeoEye. O primeiro satélite da série IKONOS, o IKONOS-I, não obteve sucesso no lançamento, em abril de 1999. Em decorrência desta falha, o projeto do satélite IKONOS-II foi adiantado e entrou em órbita em setembro de 1999.

Em janeiro de 2000 o IKONOS tornou-se o primeiro Satélite de Observação da Terra a oferecer imagens de alta resolução para uso comercial, com ampla aplicabilidade científica fornecendo informações detalhadas da superfície terrestre.

O IKONOS possui sensores que operam no visível e infravermelho próximo e obtém imagens pancromáticas e multiespectrais com resolução espacial de 1 e 4 metros, respectivamente. Características mais detalhadas estão dispostas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Características do Satélite IKONOS II.**

<b>IKONOS</b>	<b>GEOEYE</b>	
<b>Instituição Responsável</b>	Estados Unidos	
<b>País / Região</b>		
<b>Satélite</b>	<b>IKONOS-I</b>	<b>IKONOS-II</b>
<b>Lançamento</b>	27/4/1999	24/09/1999
<b>Local de Lançamento</b>	Base da Força Aérea de Vandenberg	
<b>Veículo Lançador</b>	Athena	Athena
<b>Situação Atual</b>	Falha no Lançamento	Ativo
<b>Órbita</b>	Polar, circular, heliossíncrona.	
<b>Altitude</b>	681 km	
<b>Inclinação</b>	98,1°	
<b>Tempo de Duração da Órbita</b>	98 min	
<b>Período de Revisita</b>	3 dias	
<b>Tempo de Vida Projetado</b>	8,5 anos	
<b>Instrumentos Sensores</b>	PAN e MS	

Fonte: Embrapa, 2004

Os sensores a bordo do IKONOS operam no modo pancromático e multiespectral (Ver tabela 4). Adicionalmente, há a possibilidade de fusão de imagens pancromáticas com dados multiespectrais para a geração de imagens coloridas, o que pode facilitar a interpretação visual e substituir em muitos casos, o uso de fotografias aéreas. O período máximo de revisita oferecido pelo sensor é de três dias para latitudes próximas a 40°, mas o período de revisita pode ser menor em latitudes superiores. O sensor também é capaz de realizar visitas inclinadas e laterais para obter imagens de forma mais ágil e também possibilitar a geração de pares estereoscópicos.

**Tabela 4 - Características dos sensores a bordo do Satélite IKONOS II.**

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica
<b>(PAN)</b> <b>Pancromático</b>	PAN	0,45 - 0,90 $\mu\text{m}$	1 metro	2,9 dias	
	AZUL	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$			
<b>(MS)</b> <b>Multiespectral</b>	VERDE	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$			11 bits
	VERMELHO	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$	4 metros	1,5 dia	
	INFRAVERMELHO				
	PRÓXIMO	0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$			

**Fonte: Embrapa, 2004**

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 AMOSTRAGEM DE CAMPO PARA ANÁLISE ESPECTRAL DE FOLHAS

Os locais de amostragem de folhas de *Rhizophora*, *Avicennia* e *Laguncularia*, para extração de suas características espectrais, foram selecionados com base nos resultados do processamento das imagens de satélite. Para cada ponto de coleta foram delimitadas parcelas de 30 x 30 m de acordo com o gradiente topográfico. Em cada compartimento foi registrado o posicionamento GPS da parcela, a distribuição das espécies de manguezal presentes na área e a retirada de amostras de folhas da copa das árvores.

As amostras de folhas foram retiradas dos galhos superiores, mais expostos ao sol, de diferentes árvores, sempre evitando coletar folhas de uma mesma árvore. As árvores foram selecionadas seguindo o critério de representatividade de cada indivíduo para com o conjunto vegetacional analisado. Desta forma, foram evitadas árvores que apresentassem, mesmo que de forma isolada, algum grau de degradação que não correspondesse ao conjunto da vegetação em estudo. No geral, as amostras consistiam em folhas verdes inteiras, com ausência de manchas. Tais folhas foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas em caixas de gelo. Ao todo foram amostradas 84 folhas de espécies de manguezal (42 folhas de *Avicennia*, 29 folhas de *Rhizophora* e 13 de *Laguncularia*).

Baseado na pesquisa de Mochel & Ponzoni (2007), a definição do número mínimo de amostras para a caracterização espectral segue a seguinte fórmula:

$$n = \frac{t^2 CV^2}{d^2}$$

Onde:

n = número mínimo de folhas;

t = valor obtido pelo Teste t (Student), considerando o grau de liberdade obtido por meio do N amostral de cada espécie e 10% de significância;

CV = coeficiente de variação entre os valores de refletância em cada espécie obtidos a partir da relação entre o desvio padrão e a média da reflectância para uma determinada faixa de comprimento de onda;

d = mínima diferença a ser corrigida. No caso do trabalho de Mochel & Ponzoni (2007), essa diferença foi de 10%.

Segundo a fórmula acima, considerando a península de Bragança, o número mínimo de folhas para se obter uma análise estatística satisfatória é de 27 *Avicennia*, 20 *Rhizophora*, 11 de *Laguncularia*. No total, a análise espectral envolveu as três espécies de manguezal da península; *Avicennia* (42 folhas), *Rhizophora* (29 folhas), *Laguncularia* (13 folhas). A tabela 5 mostra as espécies amostradas e o número de folhas coletadas.

**Tabela 5 – Total de folhas, espécies e unidades vegetais analisadas.**

<b>Unidade Vegetal</b>	<b>Espécies</b>	<b>Nº de Folhas</b>
<i>Manguezal</i>	<i>Avicennia Germinans</i>	<b>42</b>
	<i>Rhizophora Mangle</i>	<b>29</b>
	<i>Laguncularia Racemosa</i>	<b>13</b>
<b>TOTAL</b>		<b>84 Folhas</b>

Todas as medidas de reflectância foram realizadas em no máximo 8 horas após a amostragem. Ponzoni & Shimabukuro (2007), mostrou que as folhas mantêm suas características espectrais pelo menos até 10 h após a sua retirada.

Os índices de reflectância das amostras foram obtidos através do espectrofotômetro Spectrolino, Gretag MacBeath (Gretagmacbeth, 1999). O aparelho opera na faixa espectral de 380 a 730 nm, com resolução física de 10 nm, possuindo três modos de medida: reflexão, emissão e transmissão, e uma superfície de referência (cor branca, 100% de reflectância) para a calibração do aparelho.

## 5.2 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA, FUSÃO E MOSAICO DE IMAGENS

O pré-processamento das imagens IKONOS, com três bandas multiespectrais e uma pancromática, todas de mesma data (22 de setembro de 2003) envolveu 3 etapas: correção atmosférica, fusão e mosaico de imagens. O produto IKONOS adquirido conta com referenciamento geométrico prévio, obtido através das efemérides do satélite, com precisão  $CE \leq 15$  m (Gisplan, 2003).

Com o intuito de corrigir os efeitos atmosféricos sobre as imagens IKONOS, foi utilizado o aplicativo *Atmospheric Correction* (ATCOR) para o ambiente IDL. O aplicativo se

baseia no código MODTRAN-4 para minimizar os efeitos de espalhamento e absorção dos gases da atmosfera. Os parâmetros utilizados nesta etapa podem ser vistos na Tabela 6.

**Tabela 6 – Parâmetros utilizados para a correção atmosférica, ATCOR plug-in.**

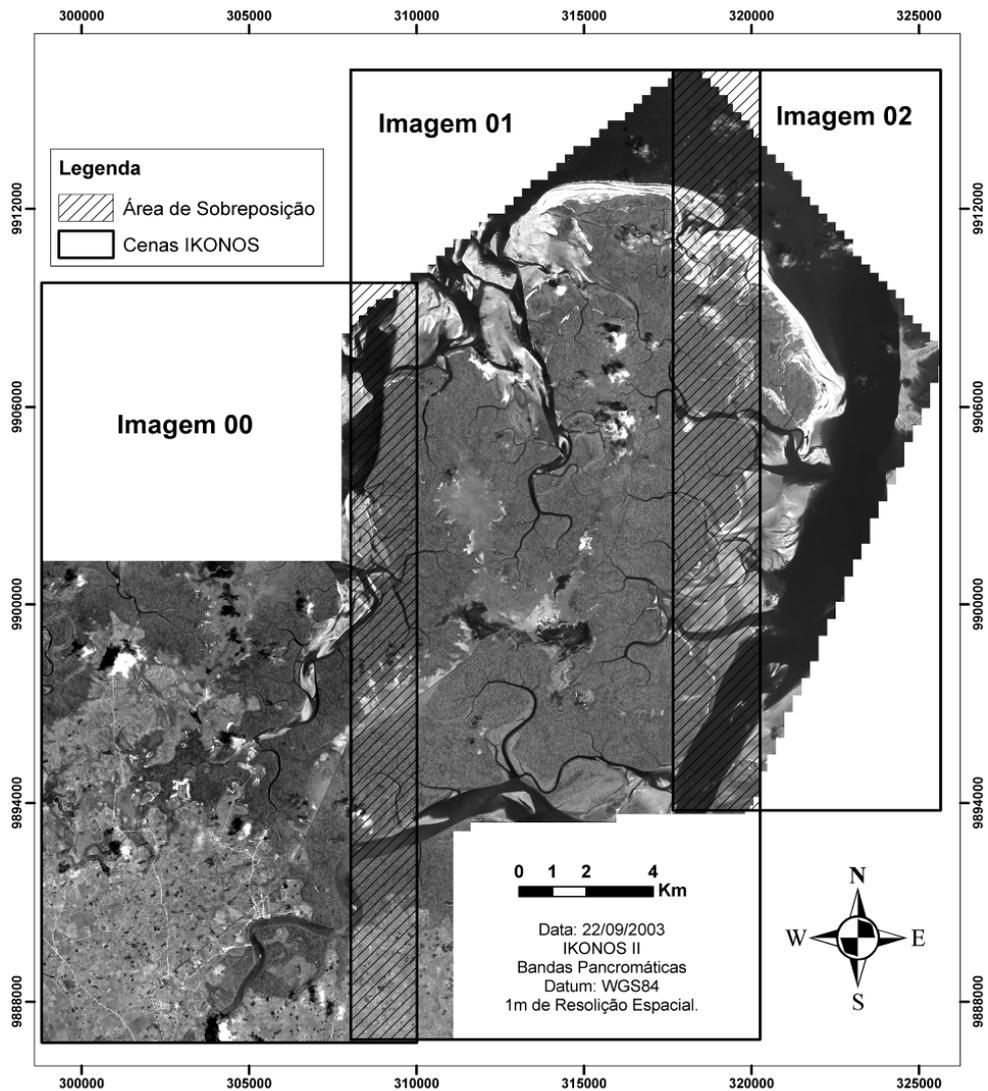
	<b>Imagem 02</b>	<b>Imagem 01</b>	<b>Imagem 00</b>
	Pan e MS	Pan e MS	Pan e MS
<b>Scale factor reflectance</b>	10	10	10
<b>Solar zenith</b>	18.6°	18.5°	18.5°
<b>Solar azimuth</b>	86.3°	86.4°	86.5°
<b>Sensor tilt</b>	10.1°	22.2°	29.3°
<b>Sensor view azimuth</b>	9.4°	8.8°	8.1°
<b>Relative azimuth</b>	76.9°	77.6°	78.4°
<b>Input visibility</b>	60 km	60 km	60 km

Para se evitar a perda de informação espectral devido às mudanças radiométricas durante o processamento, a imagem final mantém propositalmente os mesmos **16 bits** da imagem **IKONOS** original, ver Tabela 7.

**Tabela 7 - Características Temporais e Radiométricas das Imagens IKONOS**

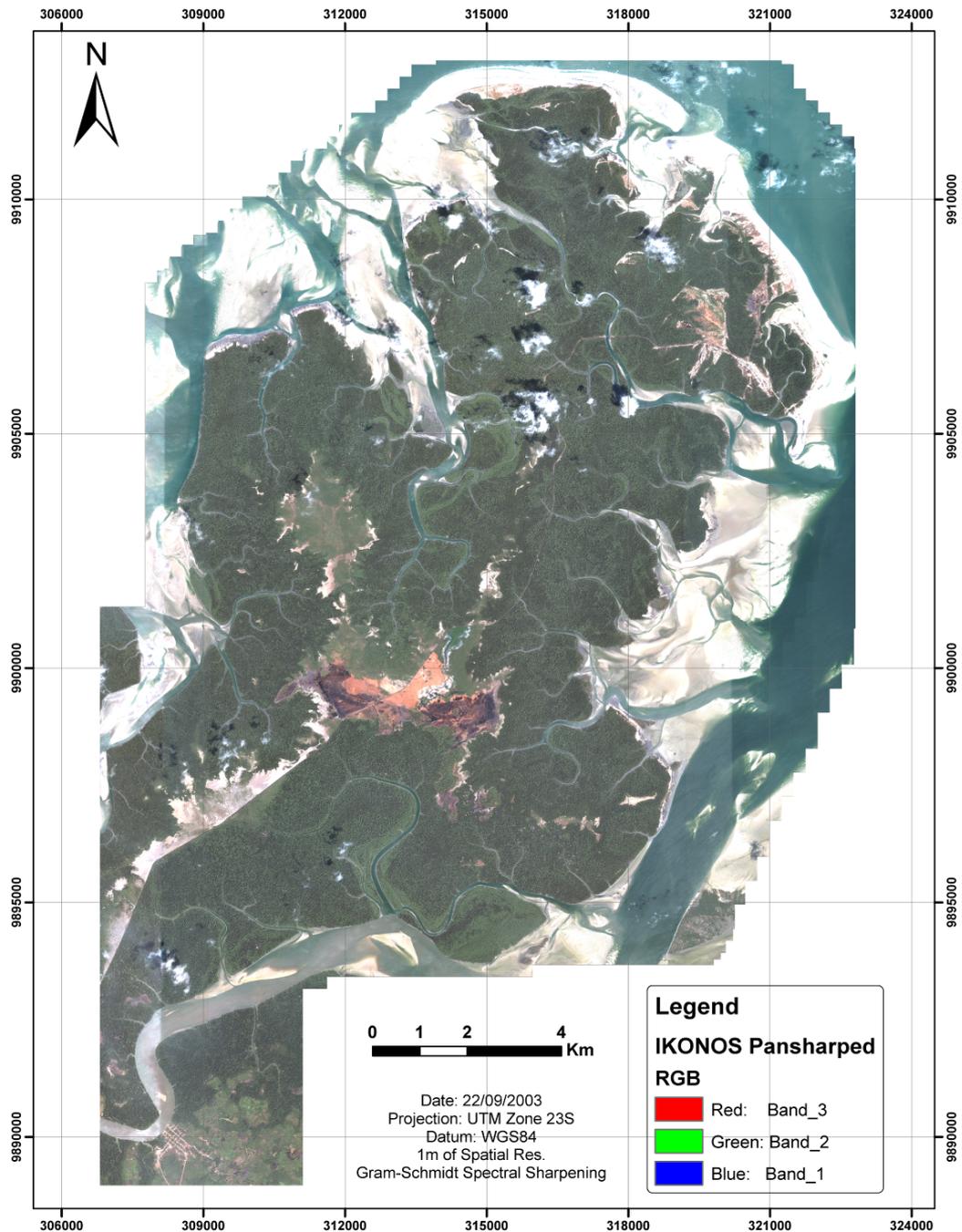
	<b>Imagem 02</b>	<b>Imagem 01</b>	<b>Imagem 00</b>
<b>Sensor</b>	Ikonos-2	Ikonos-2	Ikonos-2
<b>Data</b>	22/09/2003	22/09/2003	22/09/2003
<b>Hora</b>	13:45:17	13:44:56	13:44:29
<b>Bandas</b>	1,2,3,4 e pan	1,2,3,4 e pan	1,2,3,4 e pan
<b>Res. Radiométrica:</b>			
<b>Imagem Original</b>	16 bits	16 bits	16 bits
<b>Imagem Corrigida</b>	16 bits	16 bits	16 bits

Após a correção atmosférica as imagens foram **fundidas** e então agrupadas em um **mosaico**, ver figura 5.



**Figura 5 – Mosaico da península de Bragança, imagens 00, 01, 02**

Como fonte adicional de informação, as imagens corrigidas tiveram suas bandas pancromáticas e multiespectrais fundidas pelo método Gram-Schmidt Spectral Sharpening, disponível no software ENVI 4.x, configurando produtos híbridos de 1 m de resolução espacial permitindo a visualização de feições não discriminadas nas bandas isoladas e melhorando o desempenho dos procedimentos de classificação. O resultado da fusão pode ser visto na figura 6.



**Figura 6 – Imagem IKONOS de 22/09/2003, mosaico de três cenas, atmosféricamente corrigidas e fundidas pelo método Gram-Schmidt Spectral Sharpening (GSSS).**

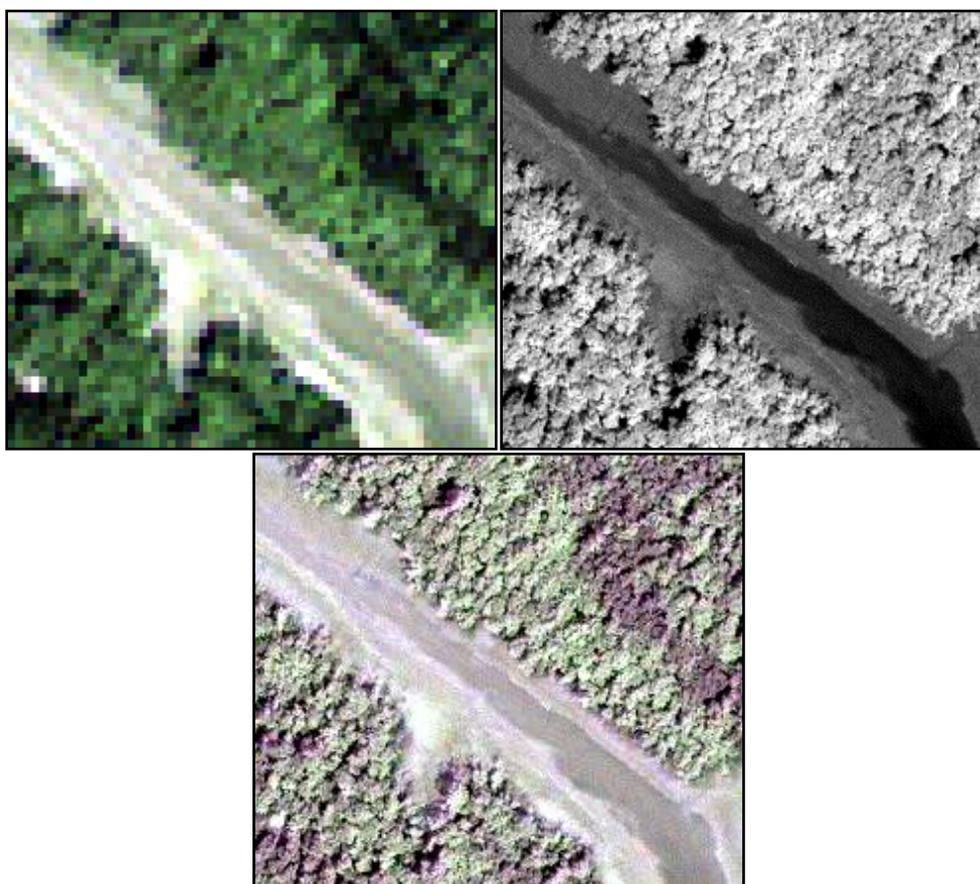
O desempenho estatístico (Índice de Qualidade Espectral) e visual da fusão pode ser visualizado na Tabela 8 e Figura 7, respectivamente.

O Índice de Qualidade Espectral é uma forma de avaliar a degradação das propriedades espectrais das bandas, devido ao processo de fusão. Normalmente, o método Gram-Schmidt resulta em índices de qualidade espectral maiores que os observados na fusão Brovey. O algoritmo calcula um coeficiente de correlação de brilho e contraste entre as

bandas de entrada e saída. A perfeita correlação espectral resultaria em um valor de 1 (ENVI 4.7, 2010).

**Tabela 8 - Índice de Qualidade Espectral. O algoritmo gera um coeficiente de correlação de brilho e contraste entre as bandas de entrada e saída.**

	<b>Imagem 02</b>	<b>Imagem 01</b>	<b>Imagem 00</b>
<b>Banda 1</b>	0.6258	0.5902	0.6842
<b>Banda 2</b>	0.6317	0.6317	0.6937
<b>Banda 3</b>	0.6594	0.5811	0.6373
<b>Banda 4</b>	0.9094	0.8712	0.6418



**Figura 7 - Esquerda: Imagem Multiespectral (True Color), resolução espacial, 4 m; Direita: banda pancromática, 1 m de resolução; Centro: Fusão GSSS, True Color e 1m de resolução espacial. A análise visual mostra um ótimo desempenho da fusão GSSS, não apresentando inversões de brilho ou cor.**

Apesar da avaliação visual e estatística mostrar um bom desempenho da fusão GSSS é importante reforçar que este método somente deve ser utilizado, em condições "single dated/single sensed" e seus resultados podem variar dependendo do conjunto de dados (Ehlers, 2008). Para dados multitemporais e multisensoriais o algoritmo de Ehlers deve ser privilegiado.

Para a determinação dos limites de cada unidade vegetal e posterior classificação da imagem foi utilizado a segmentação multiresolução e classificação por amostras, ambos os processos disponíveis no software Definiens Developer 8.

### 5.3 SEGMENTAÇÃO

Por motivos computacionais, tempo de máquina, memória RAM e espaço em disco, a imagem foi dividida em 6 quadrantes iguais, de 8000 x 8000 metros (Figuras 8 e 9). Cada quadrante foi segmentado e classificado em separado, pelo software e-cognition Definiens 8.

Por fim, o resultado das 6 análises foi integrado, gerando uma imagem única da península de Bragança.

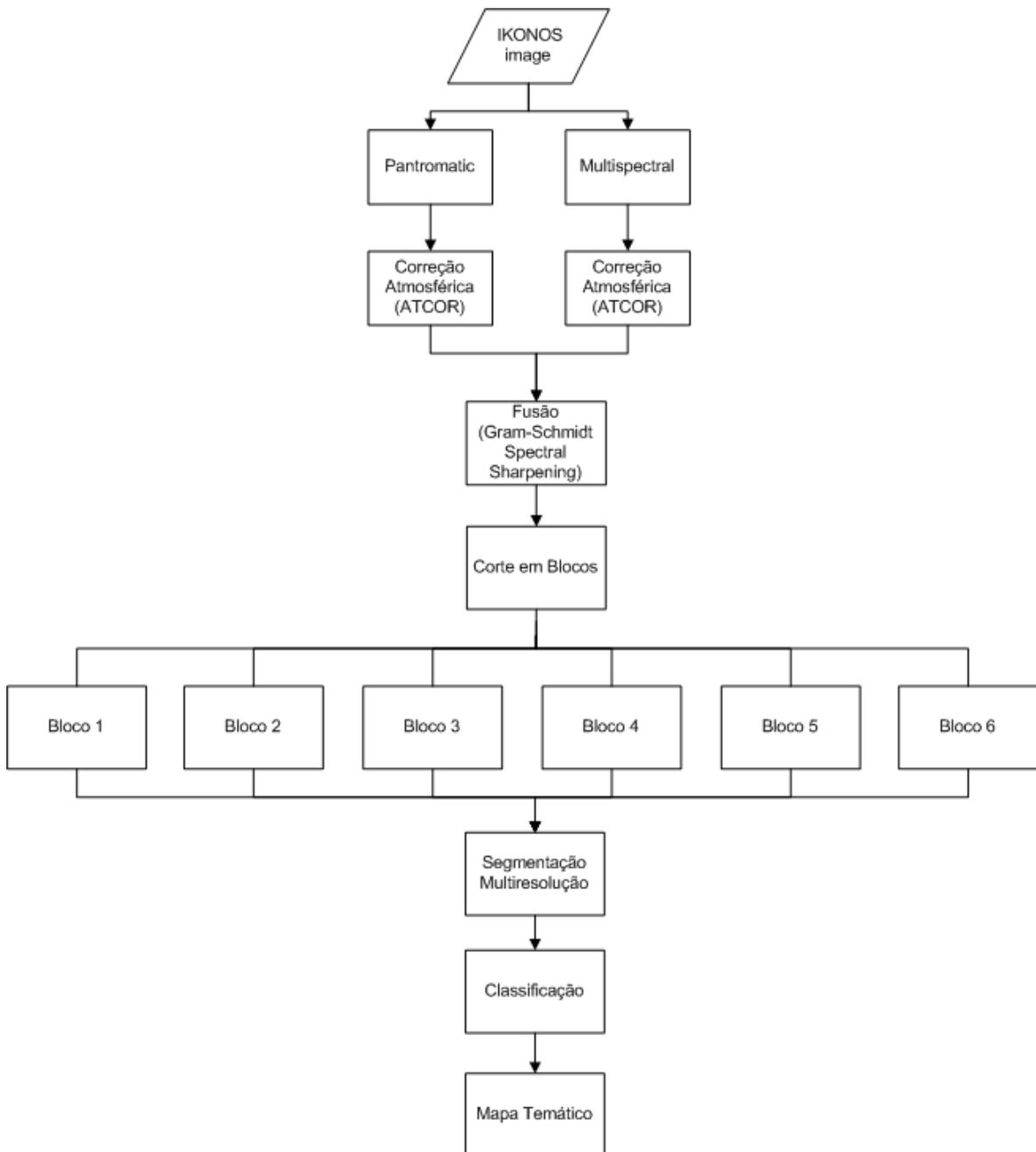


Figura 8 - Estrutura do Processamento Digital.

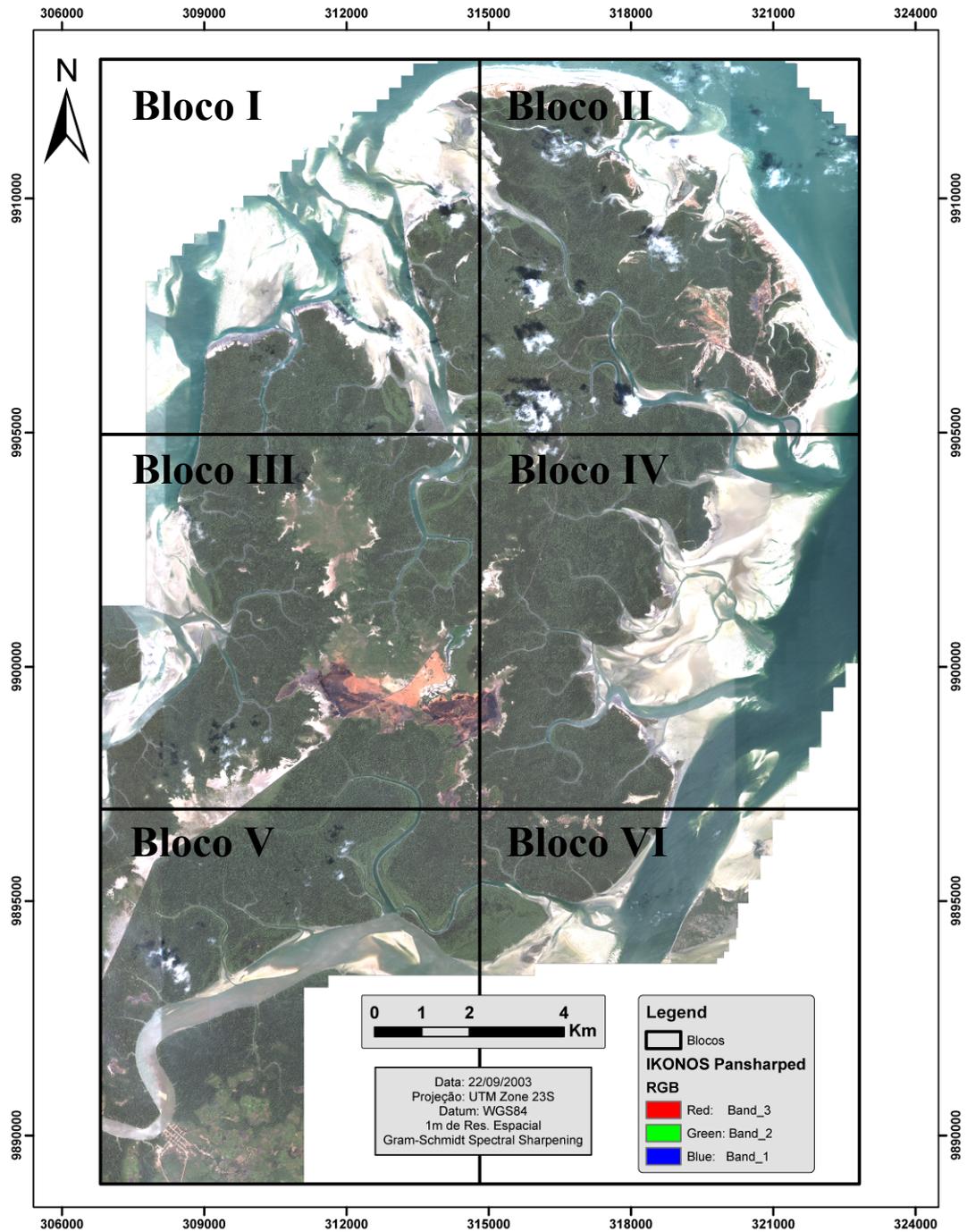


Figura 9 - Imagem processada, dividida em 6 blocos iguais, de 8000 x 8000 metros.

A segmentação de imagens é o processo de agrupamento de pixels em regiões que partilham propriedades comuns (espectrais, espaciais ou texturais). É um processo fundamental no reconhecimento de padrões, uma vez que processamentos posteriores serão dependentes dos resultados da segmentação (Zouagui *et al.*, 2004).

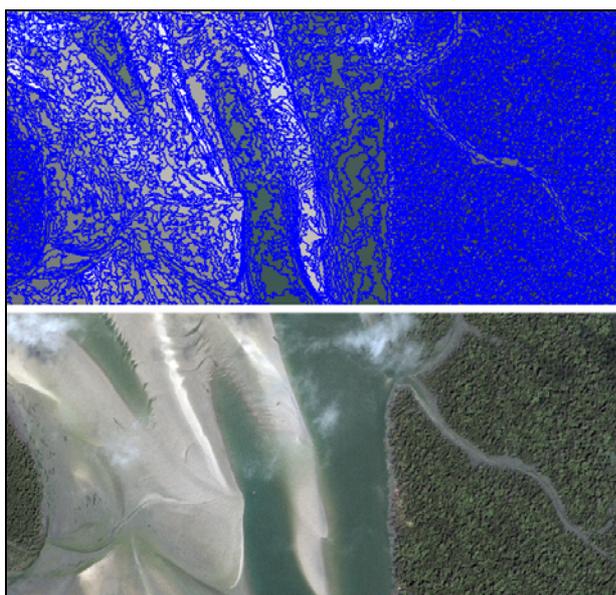
Nas últimas duas décadas, várias técnicas de segmentação foram desenvolvidas para incorporar informações contextuais e de vizinhança ao processo de classificação. O software eCognition (Definiens, 2005) reúne várias destas abordagens contextuais e orientadas ao objeto, atingindo resultados promissores para a análise de imagem de alta resolução (Van Der Sande *et al.*, 2003).

A segmentação multiresolução, método utilizado neste estudo, extrai objetos da imagem por meio de uma segmentação. Os segmentos são posteriormente classificados de acordo com as combinações de informações espectrais e espaciais (Baatz & Schäpe, 2000).

Na tabela 9 e figura 10, estão disponíveis respectivamente, os parâmetros utilizados na segmentação e a visualização dos polígonos criados como resultado deste processo.

**Tabela 9 - Parâmetros usados na segmentação multiresolução, Definiens, 2008**

<b>Parâmetros</b>		<b>Bandas espectrais</b>	<b>Peso</b>
Escala	<b>20</b>	Red	<b>1</b>
Layer Temático	<b>Sim</b>	Green	<b>1</b>
Cor	<b>0.09</b>	Blue	<b>1</b>
Forma	<b>0.01</b>	NIR	<b>1</b>
Compacidade	<b>0.04</b>		
Suavidade	<b>0.06</b>		



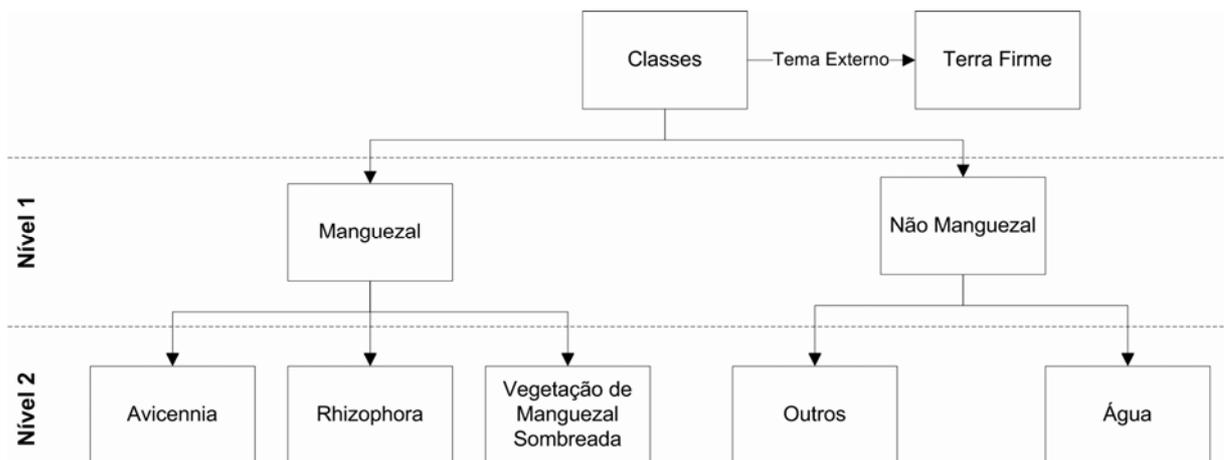
**Figura 10 – Resultado da Segmentação. Na imagem superior, polígonos gerados pela segmentação multiresolução. Na imagem inferior, trecho não segmentado.**

#### 5.4 DEFINIÇÃO DE CLASSES

De acordo com Definiens (Definiens, 2005), a base de conhecimento é criada por meio de mecanismos de herança, conceitos, métodos da lógica fuzzy e modelagem semântica.

Os segmentos estão ligados em rede, para um mesmo nível, bem como entre diferentes níveis de resolução. Esta abordagem hierárquica permite considerar as relações de vizinhança dos segmentos em um nível e de dependência entre os níveis.

Com base no conhecimento de campo e no processamento de dados, foi criada a estrutura hierárquica mostrada na figura 11. Esta rede explicita os relacionamentos entre as classes, permite o uso de operadores lógicos (*and*, *or* e *not*) e guarda a estrutura básica para a classificação. De tal forma que cada classe é hierarquicamente posicionada na rede, ocupando diferentes níveis. Isto permite que níveis hierárquicos mais baixos herdem as características dos níveis mais elevados.



**Figura 11 – Organização da Rede Hierárquica, com dois níveis hierárquicos e um tema externo.**

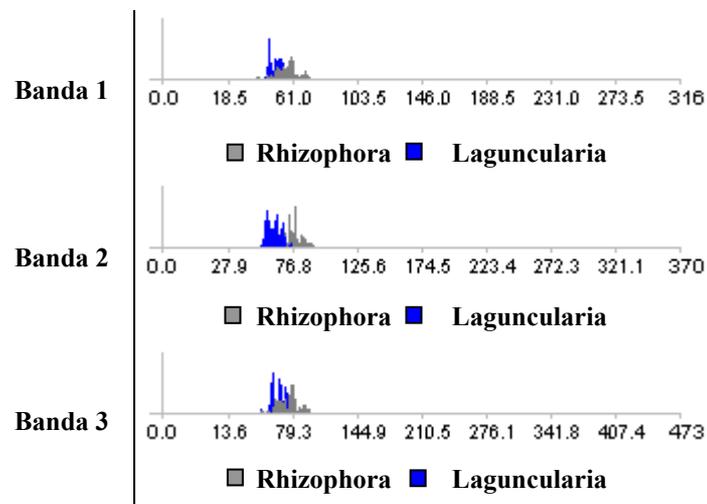
A estrutura foi elaborada visando individualização entre as árvores de *Rhizophora* e *Avicennia*, objetivo principal deste trabalho. Desta forma água, outras unidades vegetais e geobotânicas existentes na península, bem como a presença de nuvens, estão enquadradas no Nível 1, como Não Manguezal e no Nível 2 distinguem-se entre as classes “Outros” e “Água”. Krause & Bock (2010) e Souza Filho & Paradella (2002), classificaram com maior detalhamento as unidades vegetais e geobotânicas que aqui estão definidas como “Não Manguezal”.

Por motivos de semelhança espectral, a cobertura vegetal formada por *Laguncularia* e *Rhizophora* não puderam ser automaticamente separadas. Testes de classificação mostraram haver grande sobreposição espectral entre *Rhizophora* e

*Laguncularia*, superior a 30% para todas as bandas do sensor IKONOS, exceto para a banda 4, que apresentou 9% de sobreposição. Como consequência disto, a classe Manguezal (Nível 1) não contém no seu nível hierárquico mais baixo (Nível 2) a subclasse *Laguncularia*.

Na tabela 10 é mostrada a confusão espectral entre *Rhizophora* e *Laguncularia* para as bandas 1, 2, e 3. Maior detalhamento da semelhança espectral entre estas espécies será dado no capítulo de resultados e discussões.

**Tabela 10 – Confusão Espectral entre *Laguncularia* e *Rhizophora* para as banda 1, 2 e 3**



## 5.5 SELEÇÃO DE AMOSTRAS E CLASSIFICAÇÃO

O software Definiens eCognition pode realizar classificações por amostras e classificações por conhecimento (“knowledge based”) ou uma combinação de ambas. Este trabalho utiliza uma abordagem combinada, empregando tanto classificação por amostras quanto a classificação por conhecimento.

Para determinar a classe de um grupo de segmentos, através da classificação por amostras, é necessário coletar objetos amostrais (figura 12), que nos permitam conhecer os valores de intensidade de suas propriedades.



**Figura 12 – Seleção de Amostras. Em verde claro, amostras de Avicennia, em verde escuro, amostras de Rhizophora e em branco, amostras de Vegetação de Manguezal Sombreada.**

São consideradas as propriedades: média das bandas espectrais, brilho e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A tabela 11 mostra o número de objetos amostrados e suas distribuições por classe.

Tabela 11 - Número de objetos amostrados e suas distribuições por classe.

Classes	Número de Amostras
<i>Manguezal</i>	0
<i>Avicennia</i>	45
<i>Rhizophora</i>	46
<i>Vegetação de Manguezal Sombreada</i>	41
<i>Não Manguezal</i>	0
<i>Água</i>	0
<i>Outros</i>	0
<b>TOTAL</b>	<b>132</b>

A classificação por amostras utiliza a lógica Fuzzy aplicada sobre o método de vizinho mais próximo. Essa abordagem detecta segmentos similares, analisando amostras de treinamento (Tóvári, 2006). As expressões Fuzzy geram valores de pertinência, que podem variar de 0 a 1. Um valor de pertinência 1 (um) indica que a objeto selecionado enquadra-se perfeitamente a classe em questão.

Assim sendo, é possível estimar a distribuição de probabilidades de cada classe, permitindo avaliar qual a probabilidade de uma região “x” pertencer a cada uma das classes, de tal forma que a região será atribuída à classe de maior probabilidade (Santos *et al.*, 2007).

A classificação baseada em conhecimento atua sob as regras fuzzy (Zadeh, 1978; Buckner *et al.*, 2001; Neukermans, 2005). Estas regras podem ser determinadas *a priori*, apoiadas no conhecimento do usuário, permitindo a criação de limiares para as classes desejadas. Os limiares e conjuntos de regra fuzzy podem ainda ser combinados com os operadores lógicos *and*, *or* e *not*.

## 5.6 ESTRATÉGIA DE CLASSIFICAÇÃO

Para classes que contenham objetos amostrais, a classificação tem por base os valores de intensidade da média das bandas espectrais, índices de brilho (BI e SBI), permitindo o agrupamento de segmentos similares através da análise das amostras de treinamento.

Em classes sem objetos amostrais a inserção de limiares junto ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o uso de operadores lógicos, do tipo *not*, *or* e *and*, são os parâmetros responsáveis pela classificação. A classe Terra Firme foi gerada através da importação de um arquivo externo.

A figura 13 mostra detalhadamente os mecanismos de herança, limiares, regras fuzzy e a modelagem semântica utilizados nesta etapa.

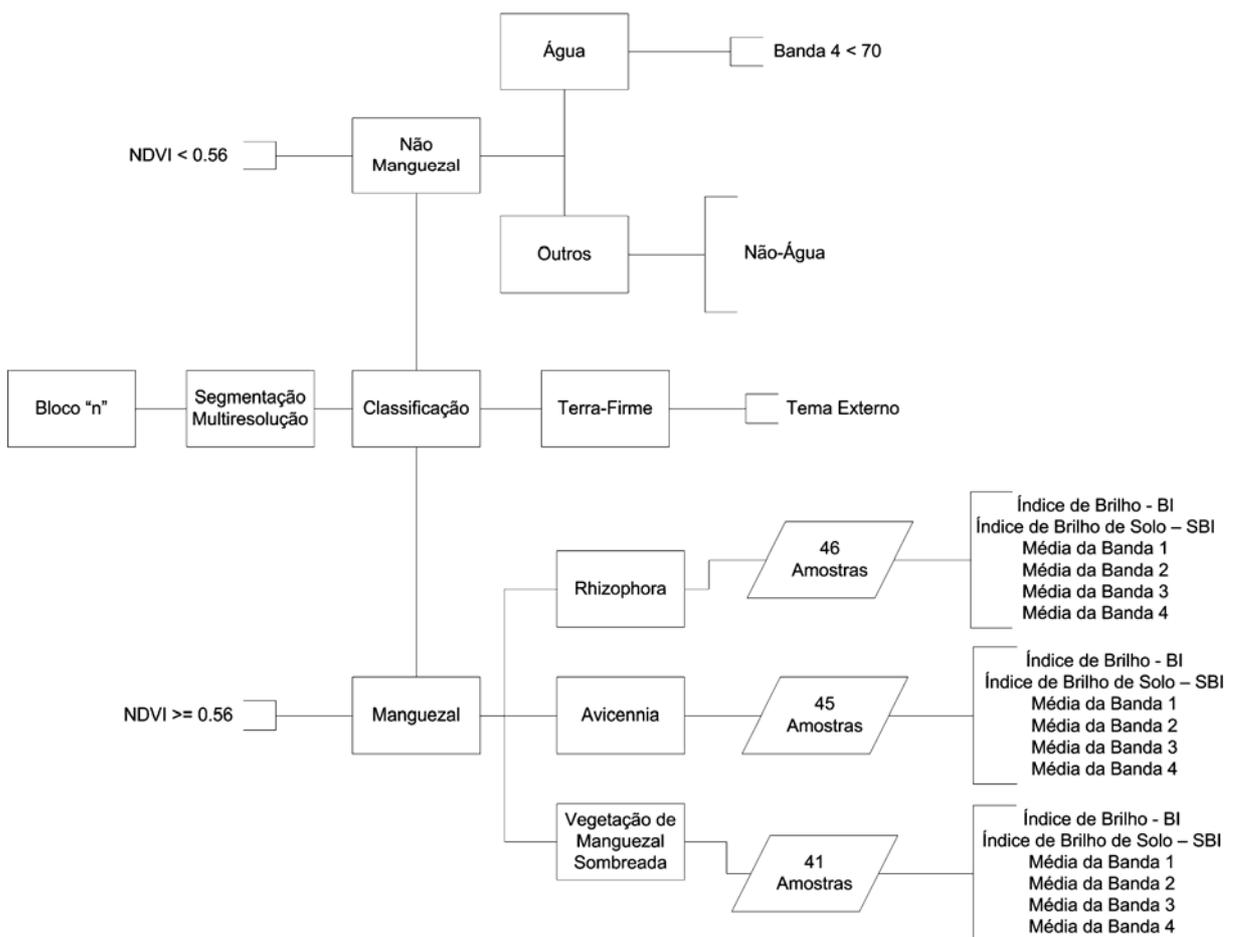
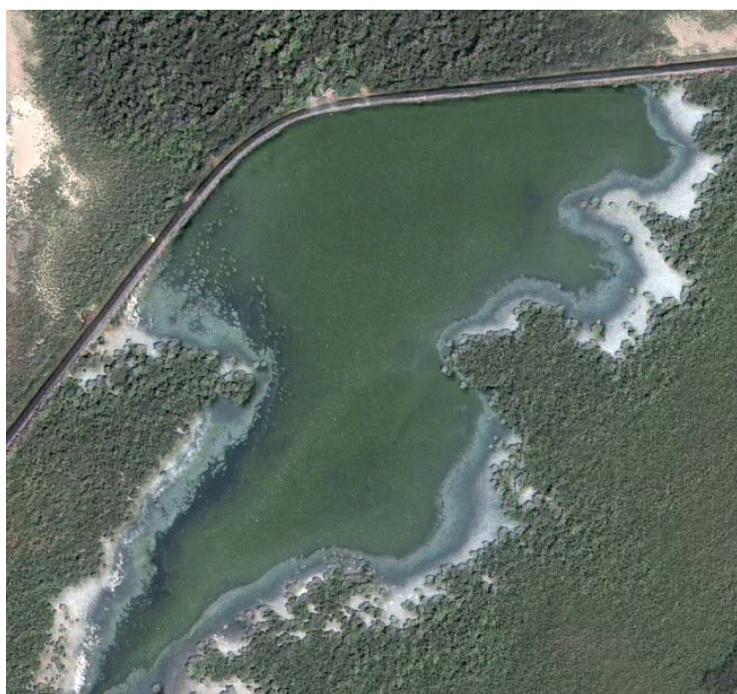


Figura 13 – Estrutura dos mecanismos de herança, limiares, regras fuzzy e a modelagem semântica.

É importante mencionar que no trecho superior da árvore de decisão, na superclasse Não-Manguezal,  $NDVI < 0.56$  (Figura 13), de acordo com a estratégia de classificação adotada, os mecanismos de herança fazem com que a classe Outros agregue para si todos os alvos que não contenham características espectrais de água límpida. Isto decorre da utilização do operador *not* (não). Este operador define semanticamente que todos os alvos da superclasse “Não-Vegetação”, que não se enquadram na classe Água (Banda 4  $< 70$ ), sejam agrupados na classe Outros (Não-Água). Portanto, as planícies herbáceas, solo exposto, estradas, nuvens e superfícies aquosas não-límpidas, seja pela existência de um grande volume de material sedimentar, caso de canais de maré e trechos de rios pouco extensos ou por grande quantidade de material fotossintetizante, caso da Lagoa Salina no momento da aquisição da imagem (Figura 14), estarão todas enquadradas na classe Outros.



**Figura 14 – Tom esverdeado da Lagoa Salina, provavelmente devido à grande concentração de material fotossintetizante, a fez ser enquadrada na classe Outros.**

Outra importante menção refere-se à classe Vegetação de Manguezal Sombreada. Apesar de ser possível inferir que se trata de bosques de manguezais sombreados, visto que campos herbáceos, e terra firme são enquadrados em outras classes, a existência de sombras sobre a vegetação de manguezal impede a identificação detalhada das características espectrais das copas, impossibilitando, para estas regiões, a distinção entre *Avicennia* e *Rhizophora*. Logo, o cálculo total da vegetação de manguezal na península será conhecido pela soma dos valores de *Avicennia*, *Rhizophora* e Vegetação de Manguezal Sombreada.

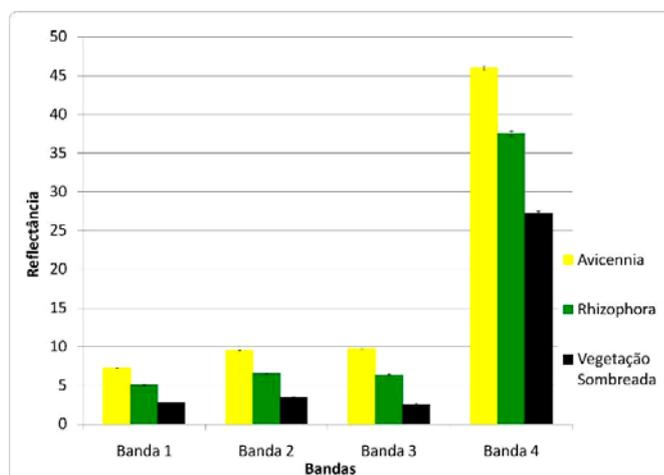
## 5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE CONCORDÂNCIA KAPPA

A fim de verificar a significância estatística dos dados de reflectância e confirmar a distinção espectral entre as classes, os valores de reflectância média, em percentagem (média  $\pm$  erro padrão), por banda, por classe e por bloco, passaram por testes de análise de variância. Por tratar-se de dados paramétricos, foi utilizado o teste ANOVA, um critério Tukey. Os testes estatísticos foram executados no programa BioEstat 5.0.

Na tabela 12 e na figura 15 estão expostos os valores de reflectância média, em percentagem (média  $\pm$  erro padrão) por banda, por classe, por bloco.

**Tabela 12 - Valores de reflectância média, em percentagem (média  $\pm$  erro padrão), por banda, por classe e por bloco.**

<b>Banda 1</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Manguezal Sombreado</b>	<b>Banda 2</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Manguezal Sombreado</b>
Bloco 1	7,376	5,136	2,788	Bloco 1	9,814	6,696	3,679
Bloco 2	7,174	5,009	2,668	Bloco 2	9,468	6,482	3,453
Bloco 3	7,307	5,170	2,887	Bloco 3	9,747	6,726	3,738
Bloco 4	7,171	4,989	2,501	Bloco 4	9,443	6,393	3,235
Bloco 5	7,216	5,170	2,906	Bloco 5	9,425	6,517	3,578
Bloco 6	7,174	5,009	2,668	Bloco 6	9,468	6,482	3,453
<b>Média da Classe</b>	7,236	5,081	2,736	<b>Média da Classe</b>	9,561	6,549	3,523
<b>Erro Padrão</b>	$\pm 0,035$	$\pm 0,035$	$\pm 0,063$	<b>Erro Padrão</b>	$\pm 0,070$	$\pm 0,054$	$\pm 0,075$
<b>Banda 3</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Manguezal Sombreado</b>	<b>Banda 4</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Manguezal Sombreado</b>
Bloco 1	9,966	6,431	2,637	Bloco 1	45,073	36,857	26,648
Bloco 2	9,754	6,333	2,587	Bloco 2	46,557	38,056	27,724
Bloco 3	9,949	6,576	2,868	Bloco 3	44,885	36,387	26,524
Bloco 4	9,732	6,266	2,254	Bloco 4	46,526	38,229	27,935
Bloco 5	9,629	6,350	2,732	Bloco 5	46,180	37,630	27,104
Bloco 6	9,754	6,333	2,587	Bloco 6	46,557	38,056	27,724
<b>Média da Classe</b>	9,797	6,382	2,611	<b>Média da Classe</b>	45,963	37,536	27,277
<b>Erro Padrão</b>	$\pm 0,054$	$\pm 0,045$	$\pm 0,084$	<b>Erro Padrão</b>	$\pm 0,318$	$\pm 0,306$	$\pm 0,247$



**Figura 15 – Reflectância média total e erro padrão por banda, por classe.**

O estimador estatístico *Kappa* é aqui utilizado para estimar a concordância dos dados de sensores remotos e seus correspondentes produtos temáticos. Erros de concordância podem ser acumulados desde a aquisição pelo sistema sensor, pré-processamentos empregados até a execução do algoritmo de classificação. Estes erros podem resultar em informações que em pouco, ou nada, representam a realidade terrestre mapeada.

O coeficiente de concordância *Kappa* é um estimador de precisão para classificações e pertence ao conjunto de análise multivariada discreta (Rosenfield & Fitzpatrick-Lins, 1986).

O primeiro conjunto para revelar informações de acurácia para classificações temáticas é a Matriz de Erros. Esta matriz faz referência ao conjunto de pixels classificados no produto temático e a um conjunto de amostras de referência representando a realidade terrestre. É avaliada a precisão individual para cada classe, por meio de erros de comissão, quando ocorrer inclusão equivocada da área em determinada categoria, e erros de omissão, quando ocorrer exclusão de área para uma determinada categoria (Congalton & Green, 1999).

A Matriz de Erros sumariza os erros de comissão e omissão permitindo obter: (i) a acurácia global, que representa o total de acertos divididos pelo total de amostras; (ii) acurácia do produtor, que confere para determinada classe o conjunto de amostras corretas divididas pelas amostras de referência na classe avaliada; e (iii) acurácia do usuário, que representa as amostras corretamente classificadas divididas pelo total de elementos classificados na categoria avaliada (Landis & Koch, 1977).

A Matriz de Erros subsidia o coeficiente de *Kappa*, o qual mede a probabilidade de concordância e expectativa de discordância com a verdade terrestre. Necessariamente o estimador obtém o coeficiente pela diferença entre a concordância (diagonal principal) e avalia as chances de concordância (somatório de linhas e colunas), ver tabela 13.

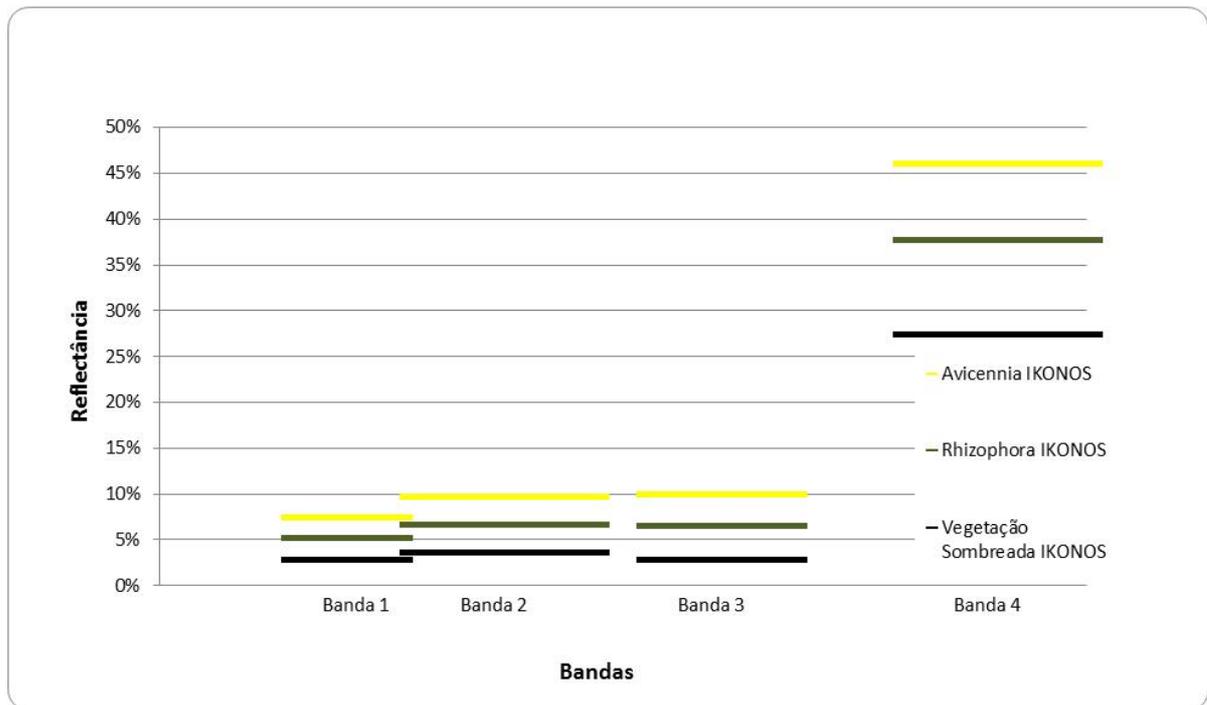
**Tabela 13 - Estimador estatístico Kappa e sua qualificação dos resultados.**

<b>Índice de <i>Kappa</i></b>	<b>Qualidade da Classificação</b>
<b>&lt;0,00</b>	Péssimo
<b>0,00 – 0,20</b>	Ruim
<b>0,20 – 0,40</b>	Razoável
<b>0,40 – 0,60</b>	Boa
<b>0,60 – 0,80</b>	Muito Boa
<b>0,80 – 1,00</b>	Excelente

**Fonte: adaptado de Landis & Koch (1977).**

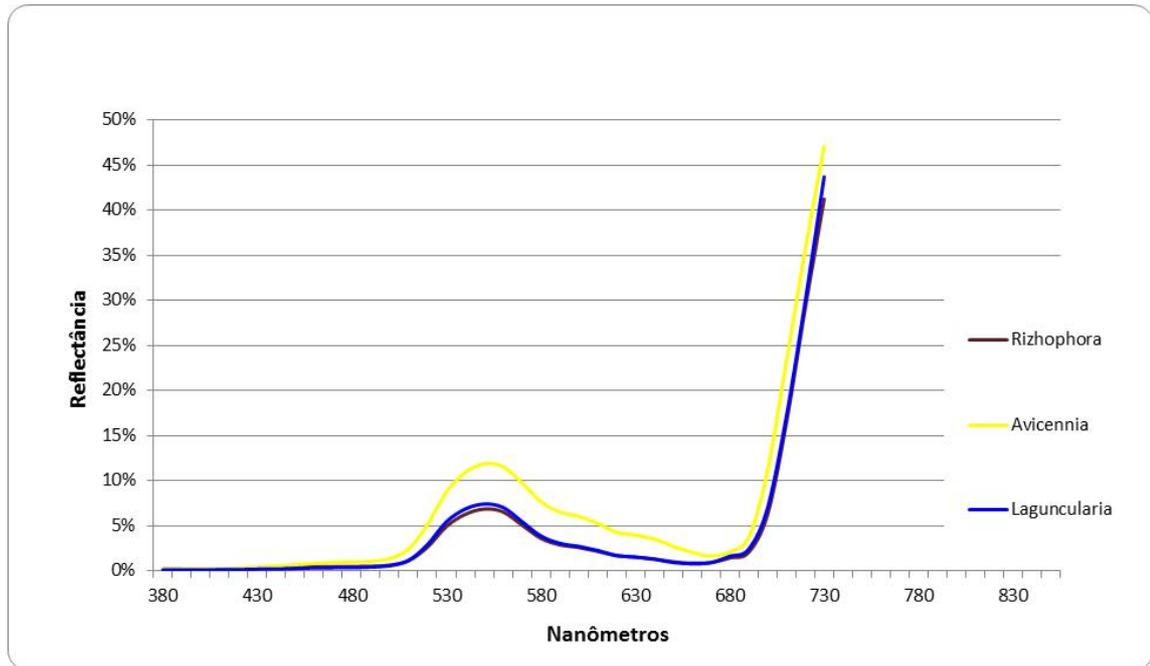
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Valores de refletância obtidos a partir de imagens de satélite (Figura 16) e diretamente das folhas na península de Bragança (Figura 17) permitem comparar as características espectrais de diferentes gêneros e caracterizar a vegetação de manguezal com base em seu comportamento espectral.



**Figura 16 - Valores médios de refletância (%) obtidos a partir de imagens de satélites para as classes Avicennia e Rhizophora e para Vegetação de Manguezal Sombreada.**

A unidade manguezal apresentou valores de refletância em faixas facilmente identificáveis. As curvas de refletância obtidas em campo indicam que os tipos vegetais amostrados podem ser individualizados com base em suas refletâncias na faixa do comprimento de onda entre 500 e 580 nm (Figura 17).

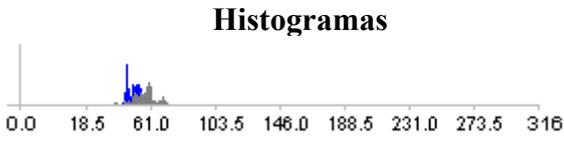
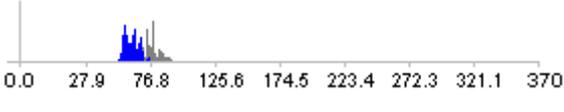
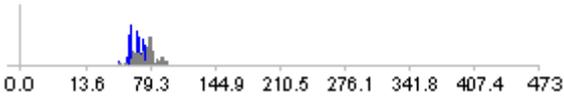
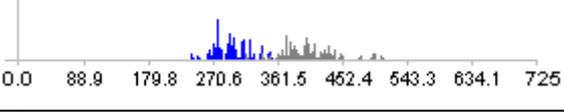
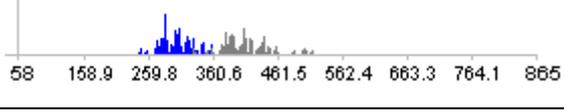
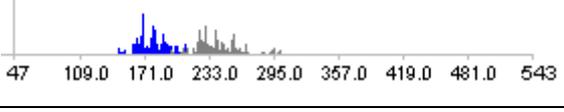


**Figura 17 – Comportamento espectral (reflectância média em %) obtido diretamente das folhas das espécies de manguezal (*Rhizophora*, *Avicennia* e *Laguncularia*).**

Na faixa espectral de 530 a 580nm, as espécies de manguezal apresentam os seguintes picos de reflectância : *Rhizophora* (~6%), *Laguncularia* (~7%) e *Avicennia* (12%). Porém, dentro desta mesma unidade vegetal há uma grande similaridade entre as classes *Rhizophora* e *Laguncularia*, onde suas curvas espectrais permanecem sobrepostas (Figura 16). Comportamento espectral semelhante foi encontrado para os manguezais do estado do Maranhão (Mochel & Ponzoni, 2007).

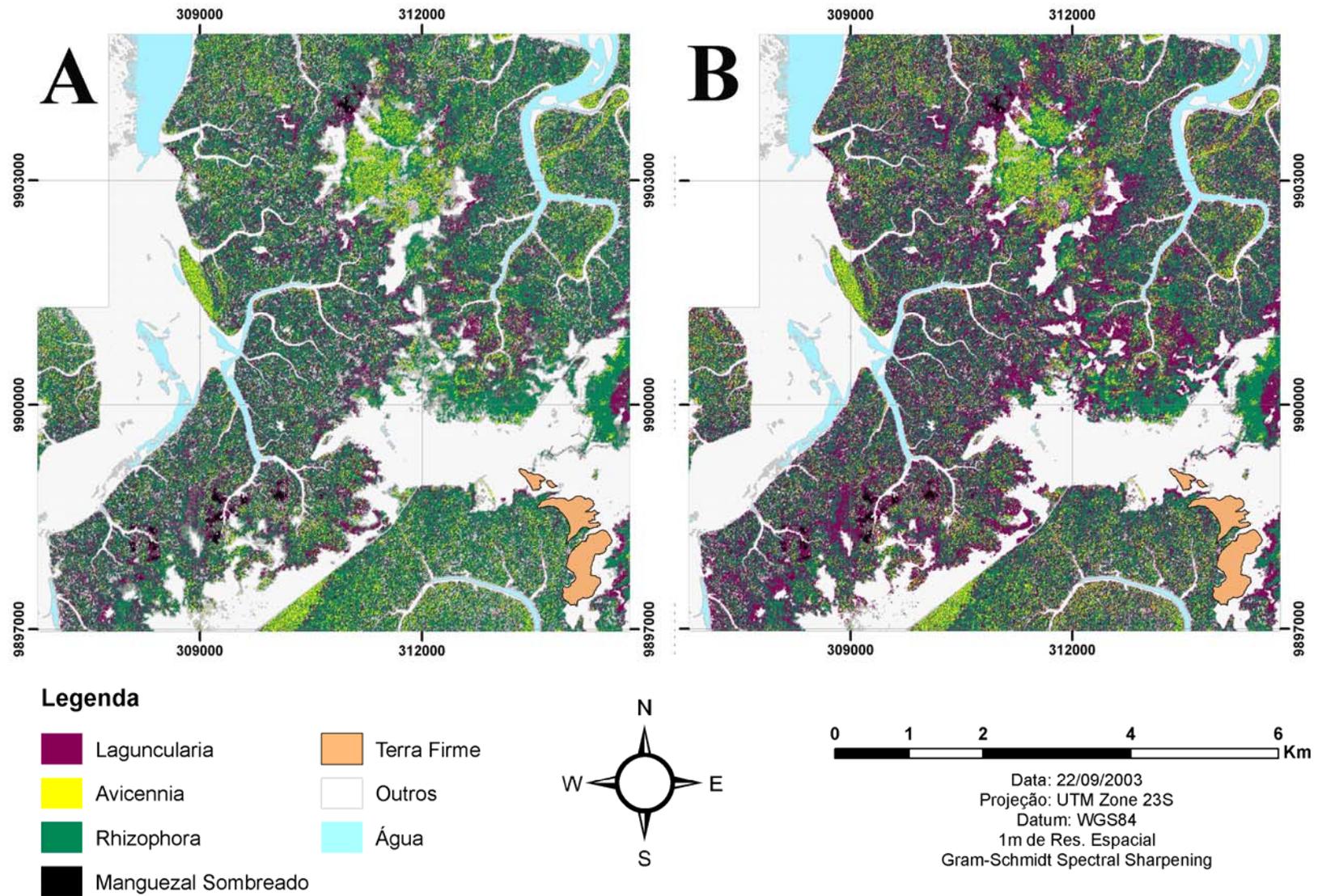
Para verificar quais os efeitos desta similaridade espectral na classificação de *Rhizophora* e *Laguncularia*, foram realizados dois testes de classificação em uma porção da península bragantina (Bloco III). Esses testes consistem em comparações entre as características de *Rhizophora* e *Laguncularia* para as bandas 1, 2, 3, 4 e os índices SBI e BI. As amostras de *Laguncularia* para o treinamento do classificador foram adquiridas sobre as áreas previamente mapeadas por Mehlig *et al.* (2010) onde foram identificadas bosques desse gênero.

Tabela 14 – Confusão Espectral entre *Laguncularia* e *Rhizophora* para as bandas 1, 2, 3, 4, e para os índices SBI e BI

	Histogramas	Sobreposição
<b>Banda 1</b>		40 %
<b>Banda 2</b>		38%
<b>Banda 3</b>		42%
<b>Banda 4</b>		9 %
<b>SBI</b>		6 %
<b>BI</b>		5%
	■ <b>Rhizophora</b> ■ <b>Laguncularia</b>	

Na tabela 14 podemos observar que é notória a semelhança espectral entre *Rhizophora* e *Laguncularia*, havendo sobreposição de seus histogramas para todas as propriedades utilizadas, sendo a Banda 4, SBI e BI os índices de menor sobreposição.

A sobreposição de características espectrais cria um cenário estatisticamente semelhante, o que aumenta os níveis de confusão do classificador na tarefa de distinguir *Laguncularia* e *Rhizophora*. Sob estas condições de confusão, a classe “*Laguncularia*” agruparia para si uma grande quantidade da vegetação de *Rhizophora*. Com objetivo de avaliar visualmente esta confusão *Rhizophora/Laguncularia*, a figura 18A e B expõem testes de classificações contendo estes dois gêneros.

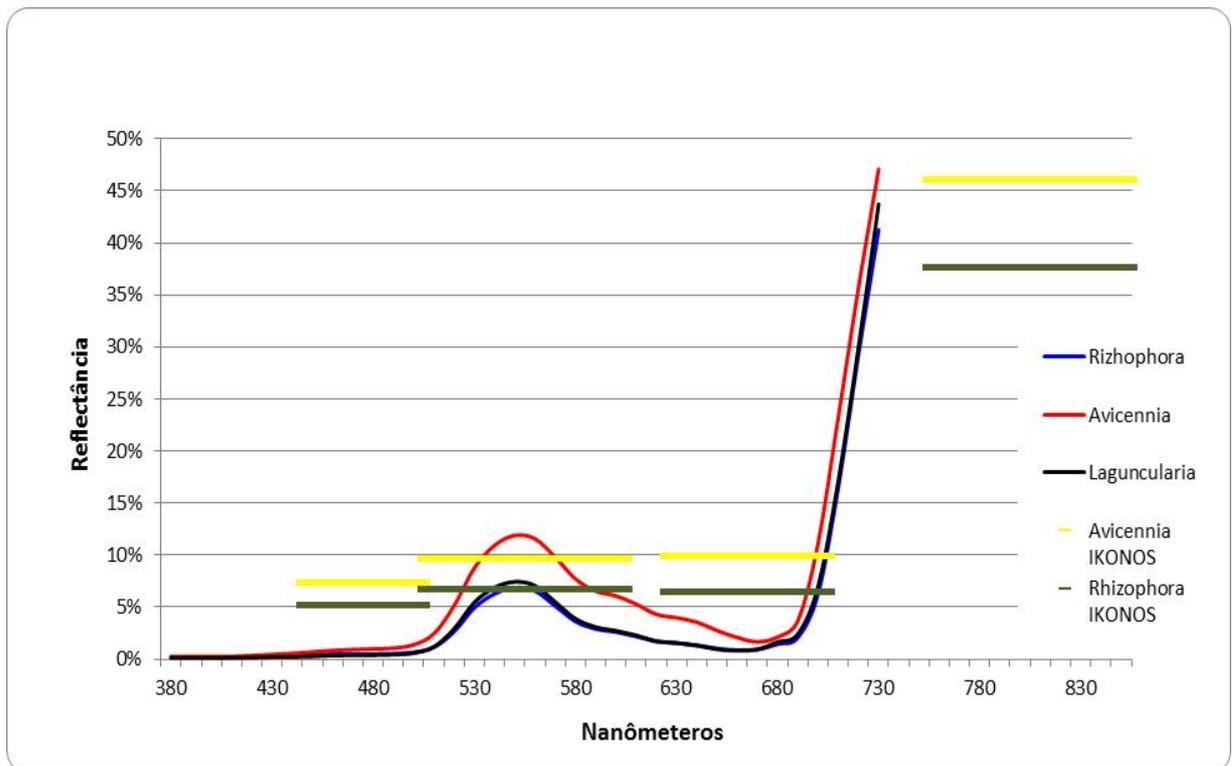


**Figura 18 – Teste de classificação de *Laguncularia*.** Em A, foram utilizados como parâmetros de classificação; Média das Bandas 1,2,3 e 4 e os índices SBI e BI. Em B, foram utilizados apenas os parâmetros de menor sobreposição espectral; Média da Banda 4 e os índices SBI e BI.

O resultado visualizado em 18A considera todas as propriedades de mapeamento, média das bandas 1, 2, 3, 4, e índices SBI, BI, nota-se claramente uma superestimação da quantidade de cobertura de *Laguncularia* em relação ao mapeado por Mehlig *et al.* (2010), onde boa parte da vegetação classificada como *Laguncularia* trata-se na verdade de *Rhizophora*. Na figura 18B, foram considerados apenas as propriedades de menor sobreposição espectral, média da Banda 4, SBI e BI, há uma ainda maior superestimação de *Laguncularia*, sobrepujando erroneamente o gênero *Rhizophora*, dominante na península bragantina (Reise, 1999; Krause *et al.*, 2001; Mehlig, 2001; Reise, 2003; Matni *et al.*, 2006; Menezes *et al.*, 2008; Mehlig *et al.*, 2010). Desta forma, baseando-se apenas nas técnicas empregadas neste trabalho, a similaridade espectral dificulta a separação automática entre *Rhizophora* e *Laguncularia*. Krause & Bock (2010) encontraram resultados semelhantes, optando por agrupar *Laguncularia* e *Rhizophora* em uma mesma classe.

Para melhor discriminar estas espécies, sugere-se a utilização de espectroradiômetros para extração das assinaturas espectrais, a utilização de dados hiperespectrais aliados aos dados de alta resolução espacial ou a utilização de produtos multiespectrais com um maior número de bandas, ex WorldView-2, com 8 bandas espectrais. A aplicação dessas técnicas forneceria maior amplitude espectral tanto para análises de campo quanto para o processamento digital, onde o aumento da quantidade de bandas e a redução da largura das mesmas permitiriam um maior detalhamento das características espectrais. Esses fatos combinados contribuiriam para uma maior discriminação entre *Rhizophora* e *Laguncularia*.

Entretanto, considerando-se as duas espécies mais abundantes, *Avicennia* e *Rhizophora*, o manguezal apresenta uma clara variação nos níveis de refletância, tanto para os valores obtidos em campo quanto para os valores digitais (Figura 19).



**Figura 19 - Comparação entre o comportamento espectral das espécies de manguezal, obtidos diretamente nas folhas e dos valores obtidos na imagem IKONOS.**

A diferença espectral presente nas imagens IKONOS segue a tendência obtida em campo, característica facilmente observável nas bandas 2 e 4, sendo esta diferença a principal responsável na distinção entre *Avicennia* e *Rhizophora*. Resultados semelhantes foram encontrados por Diniz & Cohen (2008) e Krause *et al.* (2004) utilizando-se respectivamente de imagem Landsat TM5 e fotografias aéreas.

Na tabela 15 estão expostos os valores de reflectância média, em percentagem (média  $\pm$  erro padrão) por banda, por classe, por bloco. A análise estatística, ANOVA um critério Tukey,  $p < 0.0001$ , confirma a diferença espectral entre as classes.

Os resultados indicam que para todas as bandas e em todos os blocos, as três classes analisadas *Avicennia*, *Rhizophora* e Vegetação de Manguezal Sombreada são, de fato, espectralmente distintas entre si.

Tabela 15 – Valores Médios de Reflectância, em porcentagem, por banda, por classe, por bloco. Valores de p e F, obtidos a partir de ANOVA um critério, Tukey.

<b>Banda 1</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Vegetação Manguezal Sombreada</b>	<b>Banda 2</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Vegetação Manguezal Sombreada</b>
Bloco 1	7,376	5,136	2,788	Bloco 1	9,814	6,696	3,679
Bloco 2	7,174	5,009	2,668	Bloco 2	9,468	6,482	3,453
Bloco 3	7,307	5,170	2,887	Bloco 3	9,747	6,726	3,738
Bloco 4	7,171	4,989	2,501	Bloco 4	9,443	6,393	3,235
Bloco 5	7,216	5,170	2,906	Bloco 5	9,425	6,517	3,578
Bloco 6	7,174	5,009	2,668	Bloco 6	9,468	6,482	3,453
<b>Média da Classe</b>	7,236	5,081	2,736	<b>Média da Classe</b>	9,561	6,549	3,523
<b>Erro Padrão</b>	0,035	0,035	0,063	<b>Erro Padrão</b>	0,070	0,054	0,075
<b>F(2,15) = 2355.683</b>				<b>F(2,15) = 2041.01</b>			
<b>p &lt; 0.0001</b>				<b>p &lt; 0.0001</b>			
<b>Banda 3</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Vegetação Manguezal Sombreada</b>	<b>Banda 4</b>	<i>Avicennia</i>	<i>Rhizophora</i>	<b>Vegetação Manguezal Sombreada</b>
Bloco 1	9,966	6,431	2,637	Bloco 1	45,073	36,857	26,648
Bloco 2	9,754	6,333	2,587	Bloco 2	46,557	38,056	27,724
Bloco 3	9,949	6,576	2,868	Bloco 3	44,885	36,387	26,524
Bloco 4	9,732	6,266	2,254	Bloco 4	46,526	38,229	27,935
Bloco 5	9,629	6,350	2,732	Bloco 5	46,180	37,630	27,104
Bloco 6	9,754	6,333	2,587	Bloco 6	46,557	38,056	27,724
<b>Média da Classe</b>	9,797	6,382	2,611	<b>Média da Classe</b>	45,963	37,536	27,277
<b>Erro Padrão</b>	0,054	0,045	0,084	<b>Erro Padrão</b>	0,318	0,306	0,247
<b>F(2,15) = 3256.7586</b>				<b>F(2,15) = 1028.9346</b>			
<b>p &lt; 0.0001</b>				<b>p &lt; 0.0001</b>			

A etapa de validação de campo permite o cruzamento da verdade de campo com o mapa produzido. Na tabela 16, é possível verificar as coordenadas de localização, o EPE (Estimated Position Error), o gênero dominante na validação e classe mapeada.

**Tabela 16 – Coordenadas, EPE, Espécies Dominantes na Validação e Classe Mapeada em cada ponto; Datum: WGS84.**

<b>ID</b>	<b>Norte-Sul</b>	<b>Leste-Oeste</b>	<b>EPE<sup>1</sup> (m)</b>	<b>Validação</b>	<b>Classe Mapeada</b>
1	9902618.05615920	311845.96118613	2	<i>Avicennia</i> Anã	<i>Avicennia</i>
2	9899851.85220373	312964.20737788	2	<i>Avicennia</i> Anã	<i>Avicennia</i>
3	9899986.33395915	313777.90818736	3	Campo	Outros
4	9897792.44298154	310380.64912687	4	Área Degradada	Outros
5	9896139.26065704	308312.48483167	5	Área Degradada	Outros
6	9897012.53127841	310081.63984760	2	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
7	9895077.89673720	315351.71846205	5	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
8	9906875.11276331	316820.34109813	6	<i>Rhizophora</i>	<i>Rhizophora</i>
9	9903306.56688110	316026.96659452	3	<i>Rhizophora</i>	<i>Rhizophora</i>
10	9901713.11363984	315769.68844538	3	<i>Rhizophora</i>	<i>Avicennia</i>
11	9899736.49908905	311958.58995339	7	Campo	Outros
12	9899172.55585120	312148.94946547	5	Campo	Outros
13	9899402.28232234	313364.23137933	3	Campo	Outros
14	9903464.68375465	311383.00447703	4	<i>Avicennia</i> Anã	<i>Avicennia</i>
15	9898727.63834972	314009.11643694	5	Terra Firme	Outros
16	9896720.31892497	313389.70641281	6	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
17	9896167.00398379	312499.50108868	4	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
18	9894620.58269872	315950.78224052	4	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
19	9894288.52470222	315283.10224853	3	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
20	9893845.99895642	314838.08808972	3	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
21	9894590.01134286	313508.30560139	2	<i>Avicennia</i>	<i>Avicennia</i>
22	9899378.39636075	311713.02483166	4	Campo	Outros
23	9899992.28077946	312569.11020504	3	<i>Avicennia</i> Anã	<i>Avicennia</i>
24	9900875.68325713	314359.74389281	8	Lagoa Salina	Outros
25	9899389.34076385	312924.77527599	4	Campo	Outros
26	9897026.77352590	308439.96695292	5	Área Degradada	Outros
27	9895625.21629237	312689.18082706	5	Laguncularia	<i>Rhizophora</i>
28	9909418.83368905	320821.23694275	3	Praia	Outros
29	9907084.49592648	319714.91189652	5	Antiga Ilha Barreira	Outros
30	9906757.11577719	319826.20220934	6	Antiga Ilha Barreira	Outros
31	9907909.69767672	321849.43950061	3	Praia	Outros

<sup>1</sup> EPE (Estimated Position Error) - O EPE é uma medida de erro de posição horizontal em pés ou metros com base em uma variedade de fatores, incluindo Diluição de Precisão (DOP) e qualidade do sinal de satélite. **Fonte: GARMIM, 2011. disponível em: <http://www8.garmin.com/aboutGPS/glossary.html>**

A etapa de validação baseou-se na análise prévia da imagem da península. Os pontos foram escolhidos preferencialmente em áreas extensas e homogêneas, seja para os representantes da classe manguezal (*Avicennia* e *Rhizophora*), ou representantes da classe não manguezal, casos de “Água” e “Outros”, buscando englobar todas as classes mapeadas. Para cada ponto foi obtida a documentação fotográfica e posicionamento GPS. A validação de campo apoiou-se em 31 pontos distribuídos ao longo da península (Figura 20).

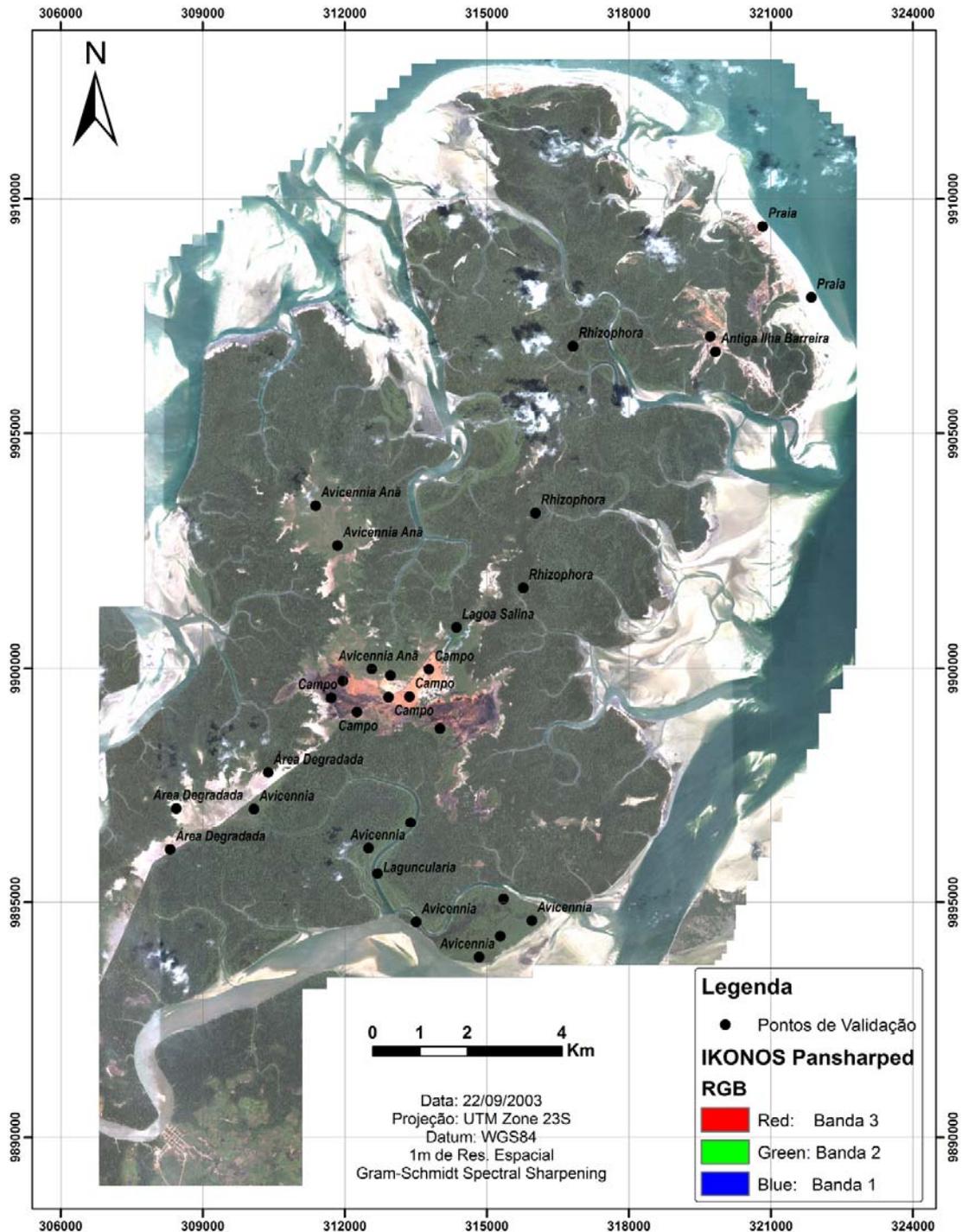


Figura 20 – Distribuição dos pontos de Validação na península Bragançina.

A necessidade de se privilegiar áreas extensas e homogêneas decorre da utilização de um sistema de localização GPS, com erro geométrico acima da resolução espacial da imagem. Desta forma, a aquisição de pontos de validação busca afastar-se de bosques mistos, sem claras tendências de dominância vegetal, seja para *Rhizophora* ou para *Avicennia*, e de áreas pontuais. Esta abordagem foi utilizada como uma alternativa para validação dos dados. Já que Imagens IKONOS não-ortoretificadas e pontos de controle de terreno adquiridos por meio de GPS de navegação (Garmin GPSmap 60CSx), por possuírem elevados erros geométricos, 15 e 20 metros respectivamente, impossibilitam a validação de áreas pontuais e bosques muito heterogêneos. Para validação fidedigna de dados de alta resolução é necessário a ortoretificação dos dados sensorizados, reduzindo o erro geométrico até o máximo de 2 metros (CE90<sup>2</sup>) e utilização em campo de GPS diferencial, com erro geométrico menor que 1 metro.

Dentre os 31 pontos escolhidos pode-se observar incoerência nos pontos 10 e 27, onde as classes mapeadas como *Avicennia* e *Rhizophora* tratam-se respectivamente de árvores de *Rhizophora* e *Laguncularia*. Portanto, a validação de campo indicou um erro de 6,45%. Esses fatos corroboram com os resultados espectrais e com esperada dificuldade na validação de bosques sem claras tendências de dominância.

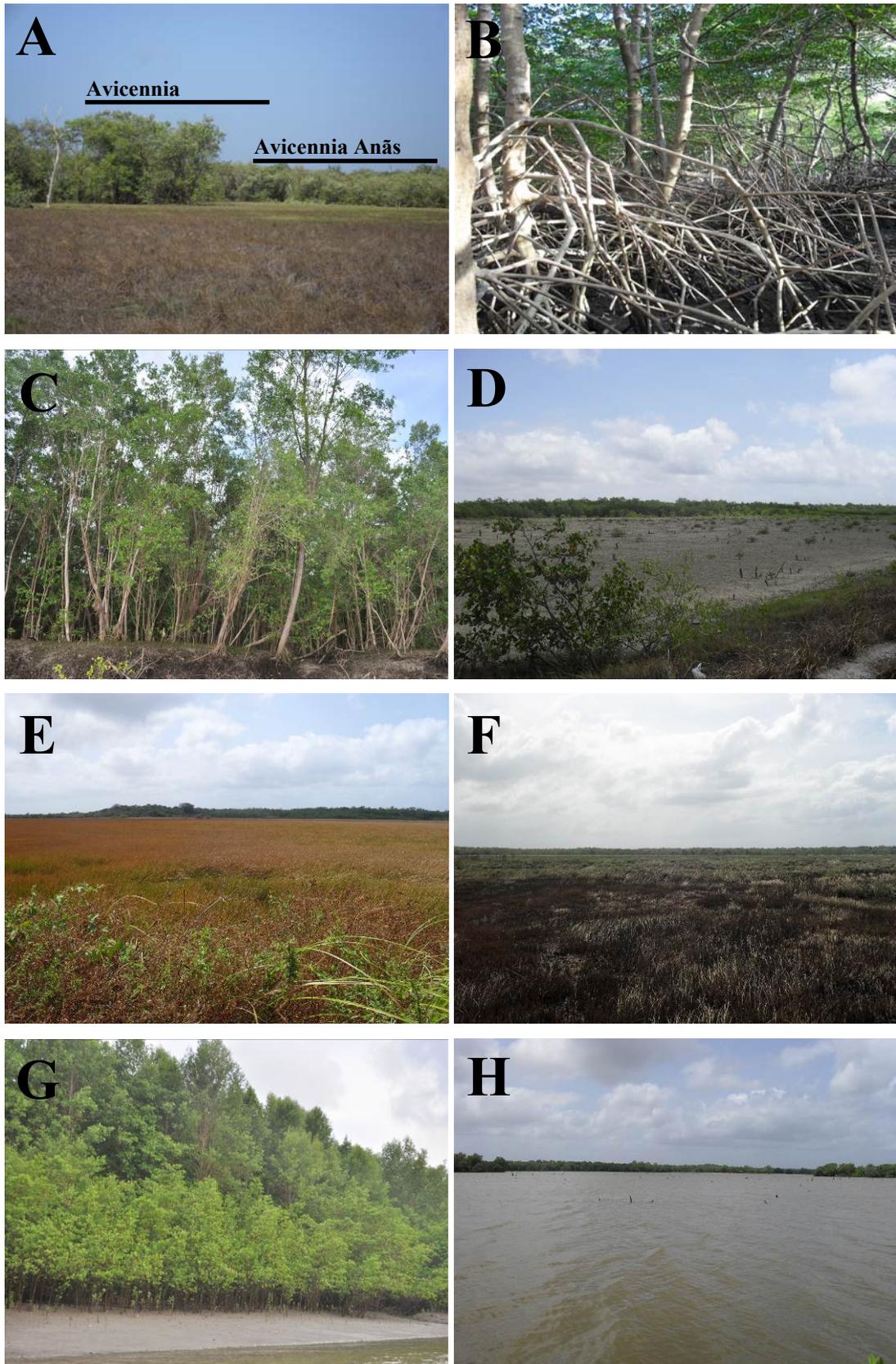
O pequeno porte arbóreo das comunidades de *L. racemosa*, pequena extensão de seus bosques e sua similaridade espectral com *Rhizophora*, dificulta o desempenho do classificador no mapeamento de *Laguncularia*, ao passo que a validação de bosques mistos só é possível com a aplicação de técnicas com posicionamento de maior precisão geométrica.

Segundo Mehlig *et al.* (2010), bosques de *Laguncularia* representam 3% (2,4 km<sup>2</sup>) da vegetação de manguezais da península de Bragança. Deve-se mencionar que o autor utilizou diferente metodologia de mapeamento, apoiada na edição manual de polígonos auxiliada por uma vasta quantidade de pontos de localização GPS dentro de bosques homogêneos de *Laguncularia*, diferente resolução espacial (4m) e menor área de mapeamento (125km<sup>2</sup>), não fazendo distinção de vegetação de manguezal sombreada. Todas estas características diferem das utilizadas no presente trabalho.

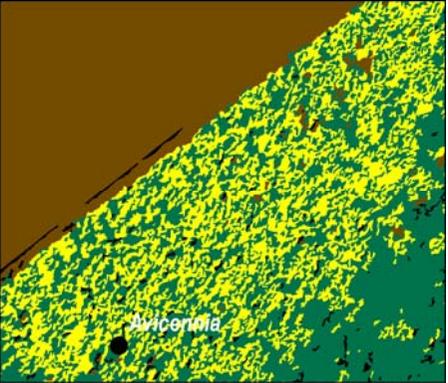
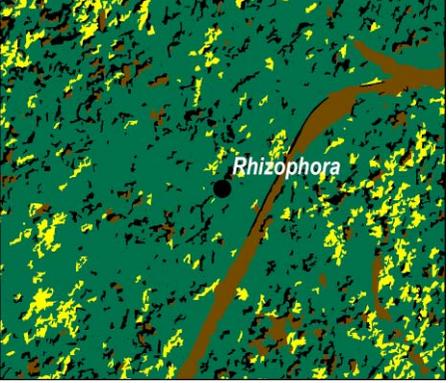
A figura 21 expõe parte da documentação fotográfica da validação de campo. Nos blocos de A-H pode-se visualizar os bosques das três espécies de manguezal, campos herbáceos, áreas degradadas, lagoa salina e recentes cicatrizes de fogo. Na tabela 17 são apresentadas comparações entre trechos da imagem IKONOS e o produto classificado.

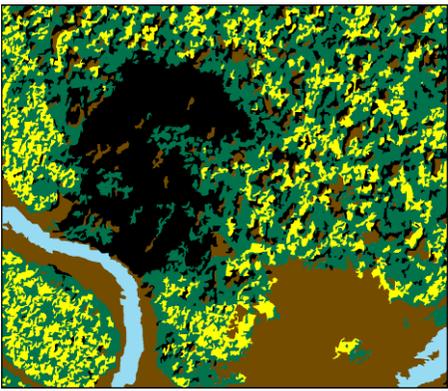
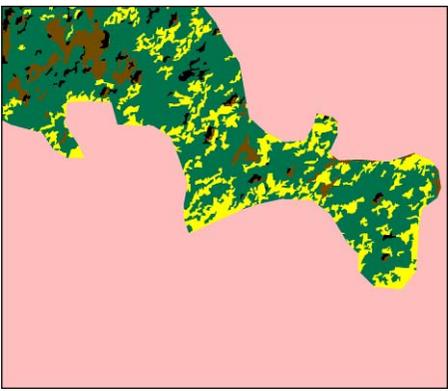
---

<sup>2</sup> CE90 - precisão planimétrica que indica a confiabilidade de um objeto identificado na imagem estar situado dentro de um raio equivalente à medida de precisão estabelecida. Fonte: **SPACE IMAGING**



**Figura 21 - Documentação fotográfica dos pontos de validação; A - bosques de Avicennia e Avicennia Anã; B - Bosques de Rhizophora; C - Bosques de Avicennia; D - Área Degradada; E - Campo Herbáceo; F - Campo Herbáceo Queimado; G - Laguncularia; H - Lagoa Salina.**

Classe	Descrição	Imagem	Classificação	Fotografia
<i>Avicennia</i>	Bosques com clara tendência de dominância por <i>Avicennia</i>			
<i>Rhizophora</i>	Bosques com clara tendência de dominância por <i>Rhizophora</i>			
			<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; margin-right: 5px;"></span> Rhizophora</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></span> Avicennia</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: pink; margin-right: 5px;"></span> Terra Firme</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></span> Vegetação de Manguezal Sombreada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: brown; margin-right: 5px;"></span> Outros</li> </ul>	

<p>Vegetação de Manguezal Sombreada</p>	<p>Vegetação sombreada no momento do imageamento.</p>			
<p>Terra Firme</p>	<p>Vegetação típica de Terra-Firme, classe importada de um tema externo.</p>			
		<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></span> Rhizophora</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></span> Avicennia</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: pink; margin-right: 5px;"></span> Terra Firme</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></span> Vegetação de Manguezal Sombreada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: brown; margin-right: 5px;"></span> Outros</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; margin-right: 5px;"></span> Água</li> </ul>		

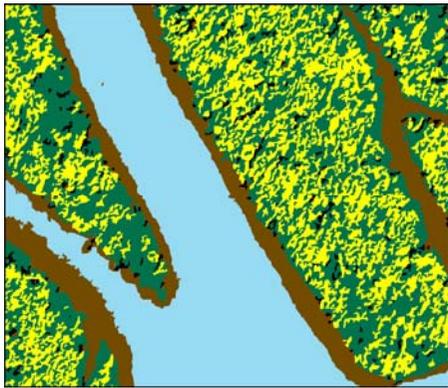
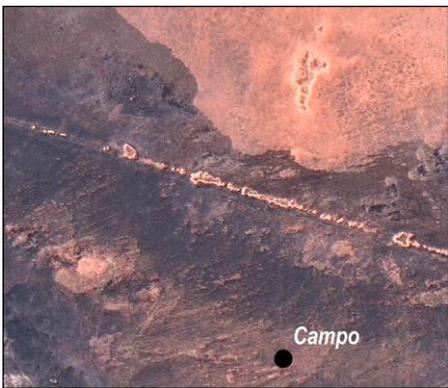
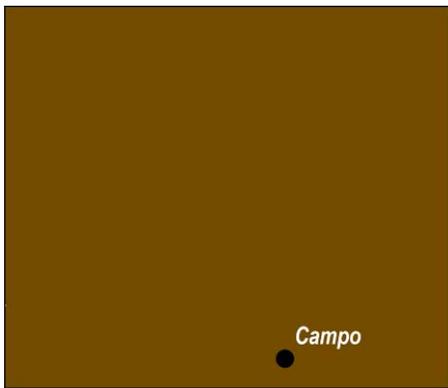
<p>Água</p>	<p>Engloba todos os representantes de massas d'água; rios, lagoa, canais, etc.</p>			
<p>Outros</p>	<p>Incorpora todos os alvos não pertencentes às classes anteriores; área degradada, nuvens, solo exposto, planícies herbáceas e etc.</p>			
		<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #006400; margin-right: 5px;"></span> Rhizophora</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #FFFF00; margin-right: 5px;"></span> Avicennia</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #FFB6C1; margin-right: 5px;"></span> Terra Firme</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000000; margin-right: 5px;"></span> Vegetação de Manguezal Sombreada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #8B4513; margin-right: 5px;"></span> Outros</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ADD8E6; margin-right: 5px;"></span> Água</li> </ul>		

Tabela 17 – Comparação entre a Imagem IKONOS, classificação e fotografia de campo.

Na tabela 18 está exposta a matriz de confusão, índice de exatidão global e o coeficiente Kappa. O teste Kappa é largamente utilizado para avaliar a concordância entre duas observações, neste caso, entre a classificação e conhecimento de campo. Admite-se que alguma proporção do grau de concordância surja simplesmente ao acaso. O emprego do teste Kappa busca minimizar a influência do acaso na interpretação dos dados de concordância.

**Tabela 18 - Matriz de confusão, exatidão global e coeficiente Kappa.**

Matriz de Confusão (%)	Manguezal						Terra Firme	Σ Linha	Comissão
	Avicennia	Rhizophora	Sombreado	Outros	Água	Água			
Avicennia	<b>55.00</b>	0.54	0.07	0.00	0.00	0.46	56.07	1.41	
Rhizophora	37.87	<b>93.06</b>	0.00	0.00	0.04	0.27	131.24	19.00	
Manguezal Sombreado	1.95	5.93	<b>91.72</b>	0.00	0.00	1.96	101.56	48.18	
Outros	4.54	0.30	7.98	<b>99.83</b>	23.45	2.38	138.48	10.42	
Água	0.00	0.17	0.23	0.17	<b>76.51</b>	0.00	77.08	0.59	
Terra Firme	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>94.93</b>	95.57	0.00	
Σ Coluna	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
Omissão	45.00	6.94	8.28	0.17	23.49	5.07			
Acurácia do Produtor	<b>55.00</b>	<b>93.06</b>	<b>91.72</b>	<b>99.83</b>	<b>76.51</b>	<b>94.93</b>			
Acurácia do Usuário	<b>98.59</b>	<b>51.82</b>	<b>81.00</b>	<b>89.58</b>	<b>99.41</b>	<b>100.00</b>			
Exatidão Global	<b>87.52</b>								
Coeficiente Kappa	<b>0.83</b>								

Diante da impossibilidade de utilização direta dos pontos de GPS adquiridos em campo (erro geométrico do sistema acima da resolução da imagem). As amostras para o teste Kappa foram geradas a partir da aquisição de regiões de interesse (ROI), no software ENVI 4.x. Ao todo foram coletas 40 amostras para cada classe mapeada.

Os índices de acurácia atingiram valores excelentes, exatidão global - 87.5 e coeficiente Kappa – 0.83, mostrando satisfatória correlação entre o mapeamento e a verdade de campo. Entretanto, é importante ressaltar que, apesar do coeficiente Kappa apontar 0.83 de correlação, há ainda confusão entre árvores de *Rhizophora* e *Avicennia*. Seguindo-se a matriz de confusão, pode-se notar omissão na classificação de *Avicennia*, onde 37.27% (14 amostras) de alvos verdadeiramente *Avicennia*, podem ter sido confundidas com *Rhizophora*. Esta confusão pode estar atrelada tanto ao espaço amostral utilizado no treinamento do classificador, 45 amostras para *Avicennia*, 46 para *Rhizophora*, 41 para vegetação de manguezal sombreada quanto nas quantidades de ROI utilizados no teste Kappa. O aumento

do espaço amostral tanto para o treinamento do classificador quanto para a aquisição dos ROIS podem solucionar com maior precisão a confusão entre *Avicennia* e *Rhizophora*. A utilização de sistemas de posicionamento de maior precisão podem também contribuir para análises de acurácia mais precisas, sem a necessidade de aquisição de ROI e talvez com menores valores de confusão entre classes. A utilização de produtos multiespectrais com um maior número de bandas, ex WorldView-2, com 8 bandas espectrais e dados hiperespectrais, podem contribuir para uma solução de maior precisão no mapeamento de *Rhizophora/Avicennia* e talvez permitam o detalhamento espectral necessário para o mapeamento de *Laguncularia*.

Os resultados obtidos permitem uma melhor localização e quantificação das classes de Manguezal, Terra Firme, Sombra, Água e Outros. Além disso, os dados admitem a separação entre coberturas de árvores de *Avicennia* e *Rhizophora* na península de Bragança. Na tabela 19, é apresentada a quantificação, em quilômetros quadrados, de cada classe mapeada. A figura 22 mostra a distribuição espacial de cada uma das classes mapeadas.

**Tabela 19 – Área das classes mapeadas, valores em km<sup>2</sup>.**

<i>Classes</i>	<i>Área (km<sup>2</sup>)</i>
<i>Rhizophora</i>	104.91±1,59
<i>Avicennia</i>	18.76±3,61
Vegetação de Manguezal	17.72
Sombreada	5.85
Terra Firme	96.55
Outros	49.09
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>292.88</b>

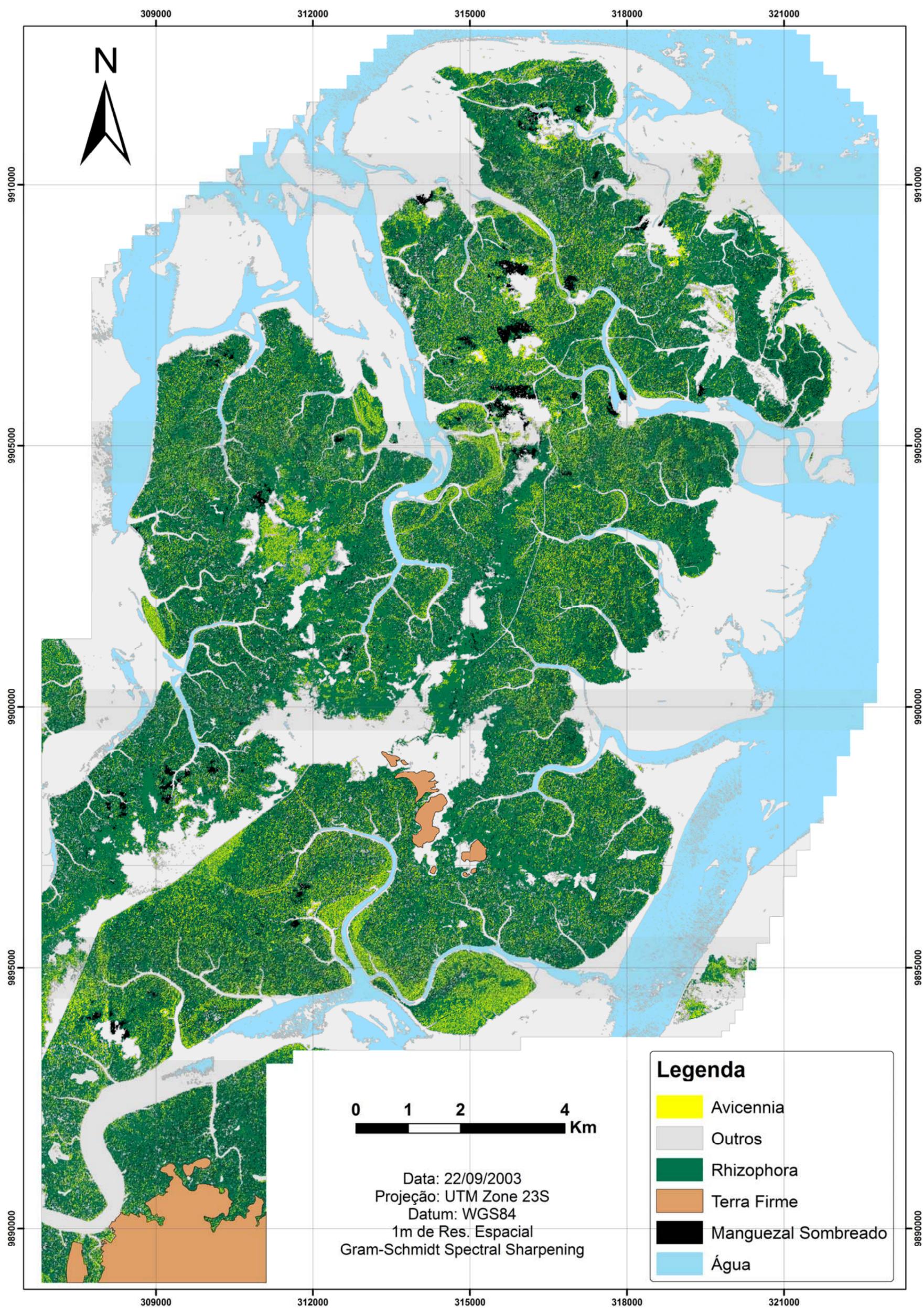


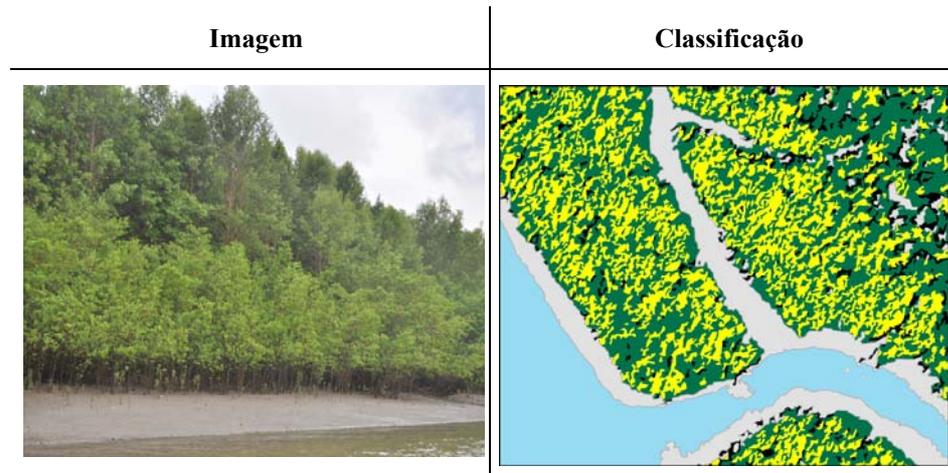
Figura 22 – Mapa Temático da península de Bragança.

É importante ressaltar que os valores de reflectância obtidos da análise de folhas individuais não apresentam a mesma intensidade da resposta espectral emitida pela imagem, isto se deve a uma combinação de diferentes fatores físicos, biológicos e geométricos, como por exemplo, perdas atmosféricas, maturidade vegetal, interações ambientais, angulação foliar e presença de galhos e/ou outros alvos que possam interferir no imageamento.

A realização da correção atmosférica reduz, mas não garante a eliminação da totalidade dos efeitos de absorção ou espalhamento atmosférico. Esses processos, que afetam tanto o fluxo incidente como o refletido, são causados pela interação da energia eletromagnética com gases, aerossóis e moléculas, subtraindo ou adicionando radiação a um feixe em uma dada direção (Antunes *et al.*, 2003).

O grau de maturidade dos bosques e fatores ambientais, tais como ataques de pragas, poluição e desequilíbrio hídrico podem interferir no nível de reflectância das folhas (Ponzoni, 2001; Jensen, 2009). No contexto dos bosques de mangue de Bragança, de acordo com dados de palinologia, o estabelecimento contínuo desses manguezais tem ocorrido há pelo menos 2 mil anos (Cohen *et al.*, 2005a; Cohen *et al.*, 2005b), e as idades máximas obtidas para as árvores dos manguezais da península são as seguintes: *Avicennia*: 223, 346 e 127 anos; *Rhizophora*: 120, 114, 83 anos; e *Laguncularia*: 67 anos (Menezes *et al.*, 2003; Mehlig *et al.*, 2010). Portanto, deve haver condições ambientais necessárias para a renovação das gerações de bosques dentro de uma situação de maturidade das florestas de *Avicennia* e *Rhizophora*.

A ocorrência esporádica e baixa idade máxima de *Laguncularia* sustentam a opinião de que esta espécie é luz-exigente e pioneira na colonização de clareiras e bordas de canal (ver Figura 23) (Ball & Pidsley, 1995; Berger *et al.*, 2006; Mehlig *et al.*, 2010). Entretanto, *L. racemosa* não encontra meios para sobrepujar as outras espécies. Assim, em setores localizados na margem dos canais, onde ocorre a formação de novos manguezais com o predomínio geralmente de *Laguncularia*, teríamos a situação de dosséis jovens, menos densos, com pequeno porte arbóreo, baixos valores de IAF (índice de área foliar), maior interferência do sinal de solo e, portanto, baixos valores reflectância. Estas características amplificam a dificuldade no mapeamento desta espécie na península.



**Figura 23** – Esquerda: bosques jovens de *Laguncularia*. Direita: classificação em bordas de canais apontando presença de *Avicennia* e *Rhizophora*. Em amarelo *Avicennia*, verde para *Rhizophora*, cinza pra Outros, preto para Vegetação de Manguezal Sombreada, azul para Água.

Considerando o estresse ambiental, que pode modificar o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes nos setores topograficamente mais elevados da península, com baixa frequência de inundação da maré e uma ampla transição manguezal/planícies herbáceas, existe o desenvolvimento de bosques de *Avicennia* anãs resultado de um estresse hídrico/salino (Cohen & Lara, 2003). Esse fator tem comprometido o pleno desenvolvimento dessas árvores através, por exemplo, do fechamento dos estômatos que proporciona uma perda menor de água, ocasionando a diminuição da taxa fotossintética em razão da menor absorção de CO<sub>2</sub> do meio (Yan & Guizhu, 2007). Essa redução da fotossíntese faz com que parte da energia que deveria ser absorvida passe a ser refletida, ocasionando assim elevados níveis de reflectância (Figura 24).

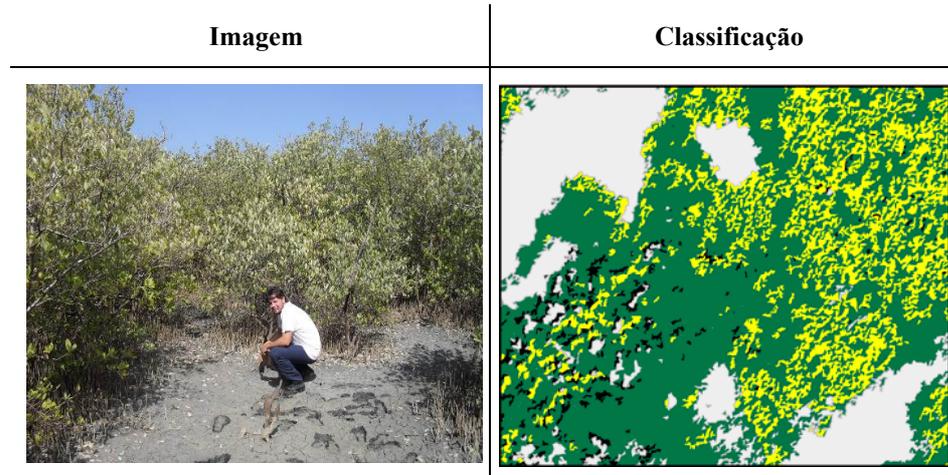


Figura 24 – Esquerda: *Avicennia* Anãs resultado do stress hídrico/salino. Direita: classificação em áreas de transição manguezal/planícies herbácea. Em amarelo *Avicennia*, verde para *Rhizophora*, cinza pra Outros, preto para Vegetação de Manguezal Sombreada.

Além disso, variáveis geométricas e complexidade de alvos também influenciam na diferença entre a espectrofotometria e as características espectrais da imagem. Os valores obtidos pelo espectrofotômetro consideram apenas a existência das folhas como componentes formadores da assinatura espectral da vegetação, com a análise espectral sendo feita, sempre, em uma angulação plano-paralela em relação ao sensor. *In situ*, este cenário é mais complexo e, para o sensor remoto, galhos, angulação das folhas e abertura de dosséis são variáveis importantes para a formação da assinatura espectral de grupo vegetal, por interferirem diretamente na direção e intensidade da energia refletida.

Ponderando as variáveis descritas acima, a aplicação da combinação de métodos espectrofotométricos desenvolvidos durante esse trabalho em áreas de manguezal, revelou ser uma eficaz ferramenta para o mapeamento detalhado de bosques de *Avicennia* e *Rhizophora*, com a possibilidade de subsidiar futuros estudos de densidade relativa de bosques de manguezal em uma escala regional, estimativas de biomassa, dinâmica do desenvolvimento de florestas de mangue, análise ambiental e capacidade de resiliência dos bosques da península bragantina.

## 7 CONCLUSÃO

O sensoriamento remoto de alta resolução mostrou-se uma ferramenta importante para o mapeamento de vegetações costeiras, em especial de florestas de manguezais, onde há baixa diversidade de espécies. A classificação de imagens, particularmente as classificações orientadas ao objeto, por permitirem o abandono do pixel como unidade exclusiva de classificação, promove uma valorização da informação fornecida por atributos espaciais (ex: forma, textura e outros) devendo ser considerada um dos caminhos mais adequados para o mapeamento e monitoramento de manguezais.

Baseado nesse estudo, a península de Bragança apresenta em torno de 141,39 km<sup>2</sup> de cobertura de manguezal formada predominantemente por árvores de *Rhizophora* (104,91 ± 1,59 km<sup>2</sup>) e *Avicennia* (18,76 ± 3,61 km<sup>2</sup>). A vegetação de Terra Firme encontra-se com 6 km<sup>2</sup>. As superfícies colonizadas por ervas foram enquadradas na classe outros, por apresentarem características espectrais semelhantes ao solo exposto e planícies arenosas.

A similaridade espectral entre *Rhizophora* e *Laguncularia* é notória, este fato dificulta a separação destas duas espécies por meio de procedimentos automáticos baseados em características espectrais. Para melhor discriminar estas espécies, sugere-se a utilização de espectroradiômetros na extração das assinaturas espectrais, utilização de produtos multiespectrais com maior número de bandas, ex. WorldView-2 com 8 bandas espectrais ou utilização combinada de dados hiperespectrais e de alta resolução espacial. A aplicação dessas técnicas forneceria maior amplitude espectral tanto para análises de campo quanto para o processamento digital. Esses fatos combinados contribuiriam para uma maior discriminação entre *Rhizophora* e *Laguncularia*.

Os resultados aqui obtidos permitem uma melhor localização e quantificação das espécies vegetais da península de Bragança-PA, individualização de árvores de *Avicennia* e *Rhizophora* e confirmam o uso de sensores orbitais de alta resolução espacial como adequados para o mapeamento efetivo das vegetações costeiras. Os procedimentos utilizados nesse trabalho podem subsidiar futuros estudos de densidade relativa de bosques de manguezal em uma escala regional, estimativas de biomassa, dinâmica do desenvolvimento de florestas de mangue, análise ambiental e capacidade de resiliência dos bosques da península bragantina.

## REFERÊNCIAS

- Affonso, A. G. *Caracterização de fisionomias vegetais na Amazônia Oriental através de videografia aerotransportada e imagens Landsat 7 ETM+*. INPE, São José dos Campos, 2004.
- Almeida, S. S. *Estrutura florística em áreas de manguezais paraenses: evidências da influência do estuário amazônico*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série: Ciências da Terra, v. 8, p. 93-100, 1996.
- Antunes, M. A. H.; Freire, R. M. B.; Botelho, A. S.; Toniolli, L. H. *Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S*. In: (Ed.). XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2003.
- Asrar, G. *Theory and applications of optical remote sensing*. New York: John Wiley, p. 770, 1989.
- Baatz, M.; Schäpe, A. *Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. In: STROBL, J., ET AL., *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. Salzburg, Karlsruhe, 2004.
- Ball, M.; Pidsley, S. M. *Growth responses to salinity in relation to distribution in two mangrove species, Sonneratia alba and Sonneratia lanceolata, in northern Australia*. *Funct Ecol*, v. 9, p. 77-85, 1995.
- Ball, M. C. *Comparative ecophysiology of mangrove forest and tropical lowland moist rainforest*. In: Mulkey, S. S. C., R.L.; Smith, A.P. (Ed.). *Tropical forest plant ecophysiology*. New York: Chapman and Hall, p.461–496, 1996.
- Batista, M. H.; Haertel, V. *Classificação Hierárquica Orientada a Objeto em Imagens de Alta Resolução Espacial Empregando Atributos Espaciais e de Contexto*. In: INPE, XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2007.
- Berger, U.; Adams, M.; Grimm, V.; Hildenbrandt, H. *Modelling secondary succession of neotropical mangroves: causes and consequences of growth reduction in pioneer species*. *Trends in Plant Science and Evolution*, v. 7, n. 4, p. 243-252, 2006.
- Buckner, J.; Stahlhut, O.; Pahl, M.; C.E., L. *Knowledge Based Automatic Image Data Analyzer for Remote Sensing Data*. ICSC Congress on Computational Intelligence Methods and Applications, Bangor, Wales, Reino Unido, 2001.
- Burchett, M. D.; Clarke, C. J.; Field, C. D.; Pulkownik, A. *Growth and respiration in two mangrove species at a ranges of salinities*. *Physiol Plant*, v. 75, p. 299–303, 1989.
- Clough, B. F. *Growth and salt balance of the mangroves, Avicennia marina (Forsk.) Vierh. and Rhizophora stylosa Griff. in relation to salinity*. *Aust J Plant Physiol*, v. 11, p. 419-430, 1984.

- Cohen, M.; Berhling, H.; Lara, R.; Smith, C. B.; Matos, H. R. S.; Vedel, V. *Impact of sea-level and climatic changes on the Amazon coastal wetlands during the late Holocene*. *Vegetation History and Archaeobotany*, p. 10-20, 2009.
- Cohen, M. C. L.; Behling, H.; Lara, R. *Amazonian mangrove dynamics during the last millennium: The relative sea-level and the Little Ice Age*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 136, p. 93-108, 2005a.
- Cohen, M. C. L.; Lara, R. J. *Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazônia: application of GIS and remote sensing techniques*. *Wetlands Ecology and Management [S.I.]*, v. 11, p. 223-231, 2003.
- Cohen, M. C. L.; Lara, R. J.; Ramos, J. F. F.; Dittmar, T. *Factors influencing the variability of magnesium, calcium and potassium in waters of a mangrove creek in Bragança, North Brazil*. *Mangroves and Salt Marshes [S.I.]*, v. 3, p. 9-15, 1999.
- Cohen, M. C. L.; Souza Filho, P.; Lara, R.; Behling, H.; Angulo, R. *A model of Holocene mangrove development and relative sea-level changes on the Bragança Peninsula (northern Brazil)*. *Wetlands, Ecology and Management [S.I.]*, v. 13, p. 433-443, 2005b.
- Congalton, R. G.; Green, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. In: (Ed.). Boca Raton: Lewis Publishers, p.137, 1999.
- Costa, J. B. S.; Borges, M. S.; Bemerguy, R. L.; Fernandes, J. M. G.; P.S., C. J.; Costa, M. L. *Evolução cenozóica da Região de Salinópolis, Nordeste do Estado do Pará*. *Geociências*, v. 12, n. 2, p. 353-372, 1993.
- Definiens. *eCognition Professional*. Munich, 2005.
- Diniz, C. G.; Cohen, M. C. L. *Avaliação Comparativa dos Índices de Reflectância dos Manguezais de Bragança PA através de Sensoriamento Remoto e Técnicas Espectrofotométricas*. IV Simpósio Brasileiro de Oceanografia, São Paulo, 2008.
- Downton, W. J. S. *Growth and osmotic relations of the mangrove, Avicennia marina, as influenced by salinity*. *Aust J Plant Physiol*, v. 9, p. 519-528, 1982.
- Duke, N. C.; Ball, M. C.; Ellison, J. C. *Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves*. *Global Ecol Biogeogr Lett*, v. 7, p. 27-47, 1998.
- Ehlers, M. *Multi-Image Fusion in Remote Sensing: Spatial Enhancement vs. Spectral Characteristics Preservation*. In: Bebis, G., R. Boyle, B. Parvin, D. Koracin, P. Remagnino, F. Porikli, J. Peters, J. Klosowski, L. Arns, Y.K. Chun, T.-M. Rhyne And L. Monroe (Ed.). *Advances in Visual Computing*: Springer Verlag, p.75-84, 2008.
- Ehlers, M. & Klonus, S. *Quality Assessment for Multitemporal and Multi Sensor Image Fusion*. In: MICHEL, U., D. L. CIVCO, M. EHLERS AND H. J. KAUFMANN (Ed.). *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology VIII, Proceedings of SPIE*. Bellingham, WA, v.7110, p.71100T1-71100T9, 2008.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÀRIA (EMBRAPA). *Satélites de monitoramento*. 2004. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/>>
- Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. *Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia*. Acta Amazônica, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.
- Gates, D. M.; Keegan, J. H.; Schleter, J. C.; Weidner, V. R. *Spectral properties of plants*. Applied Optics, p. 11-20, 1965.
- Gisplan. *Guia de Produtos IKONOS*. Gisplan, 2003
- Gretagmacbeth. *Operating Manual. CH-8105*. Regensdorf 06, p. 49, 1999.
- Harum, E. N. *Spatial Structure, Leaf Area Index and Light Reception of different Mangrove Forest Stands in Caeté Mangrove Estuary, Bragança, Pará, Northern Brazil*. (M.Sc). Thesis in International Studies in Aquatic Tropical Ecology, Bremen. 2004.
- Hasegawa, P. M.; Bressan, R. A.; Zhu, J. K.; Bohnert, H. J. *Plant cellular and molecular response to high salinity*. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant mol. Biol., v. 51, p. 463-499, 2000.
- Jensen, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres (Tradução da Segunda Edição)*. São José dos Campos, p. 598, 2009.
- Kjerfve, B. & Lacerda, L. D. *Mangroves of Brazil. In: Conservation and sustainable utilization of mangrove forest in Latin America and Africa regions. Part I - Latin America*. Okinawa, p.272 pp, 1993
- Klonus, S. & Ehlers, M. *Performance of Evaluation Methods in Image Fusion*. 12th International Conference on Information Fusion, Seattle, WA, USA. CD Publication. p.8, 2009.
- Krause, G.; Bock, M. *Mangrove Dynamics and Management in North Brazil*. Synoptic Analysis of Mangroves for Coastal Zone Management, 153-167 p, 2010.
- Krause, G.; Schories, D.; Glaser, M.; Diele, K. *Spatial patterns of mangrove ecosystems: the Bragantian mangroves of northern Brazil (Bragança, Para)*. Ecotropica, v. 7, p. 93-107, 2001.
- Krause, G. B., M.; Weiers, S.; Braun, G. *Mapping land-cover and mangrove structures with remote sensing techniques – a contribution to a synoptic GIS in support of coastal management in north Brazil*. Environmental Management, v. 34, p. 429-440, 2004.
- Lacerda, L. D.; Conde, J. E.; Kjerfve, B.; Alvarez-León, R.; Larcón, C. A.; Polanía, J. *American mangroves*. In: LACERDA, L. D. (Ed.). Mangrove ecosystems: function and management. p.1-62, 2002.
- Landis, J. R.; Koch, G. G. *The measurement of observer agreement for categorical data*. Biometrics, v. 33, n. 1, p. 159-74, 1977.

- Lugo, A. E.; Snedacker, S. C. *The ecology of mangroves*. Annual review of ecology and systematics [S.I.], v. 5, p. 39-64, 1974.
- Matni, A. S.; Menezes, M. P. M.; Mehlig, U. *Estrutura dos bosques de mangue da península de Bragança, Pará, Brasil*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais, v. 2, p. 45-54, 2006.
- Mckenna, H. *Anatomy of a Leaf*. 2007. Disponível em:  
<[http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Leaf\\_anatomy.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Leaf_anatomy.svg)>
- Mehlig, U. *Aspects of tree primary production in an equatorial mangrove forest in Brazil*. 2001. p. 155 Center for Marine Tropical ecology (zMT), University of Bremen, Bremen, Germany.
- Mehlig, U.; Menezes, M. P. M.; Reise, A.; Schories, D.; Medina, E. *Mangrove Dynamics and Management in North Brazil: Mangrove Vegetation of the Caeté Estuary*. In: (Ed.). *Ecological Studies*, v.211, 2010. cap. 6.
- Menezes, M. P. M.; Berger, U.; Mehlig, U. *Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão states, north Brazil*. Acta Amazonica, v. 38, n. 3, p. 403-420, 2008.
- Menezes, M. P. M.; Berger, U.; Worbes, M. *Annual growth rings and long-term growth patterns of mangrove trees from the Bragança's peninsula, north Brazil*. Wetlands (Wilmington), v. 11, p. 233-242, 2003.
- Mochel, F. R.; Ponzoni, F. J. *Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State*. Anais da Academia Brasileira de Ciências [S.I.], v. 79, n. 4, p. 683-692, 2007.
- Moreira, M. A. *Noções Básicas sobre vegetação e sua interação com a radiação solar*. In: UFV (Ed.). *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação*, 2003.
- Neukermans, G. *Remote sensing of mangroves in Gazi Bay (Kenya) with very high resolution QuickBird Satellite imagery: automated methods for species and assemblage identification*. In: MEES, J. E. A., VLIZ Young Scientists' Day, 2005. Brugge, Belgium. VLIZ. p.2-3.
- Parida, A. K.; Das, A. B.; Mitra, B. *Effects of NaCl stress on the structure, pigment complex composition and photosynthetic activity of mangrove *Bruguiera parviflora* chloroplasts*. Photosynthetica, v. 41, p. 191-200, 2003.
- Pezeshki, S. R.; De Laune, R. D.; Patrick, W. H. J. R. *Differential response of selected mangroves to soil flooding and salinity: gas exchange and biomass partitioning*. Can J For Res, v. 20, p. 869-874, 1990.
- Ponzoni, F. J. *Comportamento Espectral da Vegetação*. In: UNB (Ed.). *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília-DF, 2001.

- Ponzoni, F. J. In: (Ed.). *Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a Mata Atlântica*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2002.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. *Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação*. São José dos Campos: 2007.
- Prance, G. T.; Silva, M. F.; Albuquerque, B.; Araújo, I. J. F.; Carreira, L. M.; Braga, M. M.; Macedo, M.; Conceição, P. N.; Lisboa, P. L.; Braga, P. I.; Lisboa, R. L.; Vilhena, R. Q. *Revisão taxonômica das espécies amazônicas de Rhizophoraceae*. Acta Amazonica, v. 5, n. 1, p. 5-22, 1975.
- Reise, A. *Untersuchungen zum Streufall und Streuumsatz als Basis zur Charakterisierung des Stoffflusses in verschiedenen strukturierten Mangrovenwäldern Braganças/Nordostbrasilens*. p. 81, University of lüneburg, lüneburg, Germany. 1999.
- Reise, A. *Estimates of biomass and productivity in fringe mangroves of North-Brazil*. p. 196 Center for Marine Tropical ecology (zMT), University of Bremen, Bremen, Germany. 2003.
- Rosenfield, G. H.; Fitzpatrick-Lins, K. *A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 52, n. 2, p. 223-227, 1986.
- Santos, J. C.; Oliveira, J. R. F.; Dutra, L. V.; Sant'anna, S. J. S.; Rennó, C. D. *Seleção de atributos usando algoritmos genéticos para classificação de regiões*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007.
- Silva, J. Q. *Estudo comparativo dos índices de reflectância da vegetação de manguezal e várzea-de-maré do litoral paraense através de sensoriamento remoto e técnicas espectrofotométricas*. (Mestrado em Geologia e Geoquímica). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
- Souza Filho, P. W. M. *Influência das Variações do Nível do Mar na Morfoestratigrafia da Planície Costeira Bragantina (NE do Pará) durante o Holoceno*. Universidade Federal do Pará, Belém, 1995a
- Souza Filho, P. W. M. *A planície costeira bragantina (NE do Pará): influência das variações do nível do mar na morfoestratigrafia costeira durante o Holoceno*. (Msc). Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1995b.
- Souza Filho, P. W. M. *Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos*. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.
- Souza Filho, P. W. M.; Cohen, M. C. L.; Lara, R. J.; Lessa, G. C.; Koch, B.; Behling, H. *Holocene coastal evolution and facies model of the Bragança macrotidal flat on the Amazon Mangrove Coast, Northern Brazil*. 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC, Brazil. p.306 - 310, 2006.

- Souza Filho, P. W. M.; El-Robrini, M. *Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da planície costeira Bragantina, nordeste do Pará, Brasil*. Geonomos [S.I.], v. 4, n. 2, p. 1-16, 1996.
- Souza Filho, P. W. M.; Paradella, W. R. *Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data*. Wetlands Ecology and Management, v. 10, p. 123-132, 2002.
- Szlafsztein, C. F.; Lara, R. J.; Cohen, M. C. L. *Coastal management: some studies of the past and present of the Bragança region (Pará, Brazil). The MADAM project*. J. Int. Environ. Creation, v. 2, p. 132-139, 2000.
- Tomlinson, P. B. *The botany of mangroves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- Tóvári, D. *Segmentation Based Classification of Airborne Laser Scanner Data*. Dissertation. Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften (Fak. f. Bauing.) Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF). University of Karlsruhe, Karlsruhe, 2006.
- Van Der Sande, C. J.; De Jong, S. M.; De Roo, A. P. J. *A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 4, n. 3, 2003.
- Yan, L.; Guizhu, C. *Physiological adaptability of three mangrove species to salt Stress*. Acta Ecologica Sinica, v. 27, n. 6, p. 2208-2214, 2007.
- Zadeh, L. A. *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. Fuzzy Sets and Systems, v. 1, p. 3-28, 1978.
- Zouagui, T. H.; Benoit-Cattin; Odet, C. *Image segmentation functional model*. Pattern Recognition, v. 37, p. 1785-1795, 2004.