



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA
DA VEGETAÇÃO DE MANGUEZAL E VÁRZEA-DE-MARÉ DO
LITORAL PARAENSE ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO
REMOTO E TÉCNICAS ESPECTROFOTOMÉTRICAS**

Dissertação apresentada por:

JADSON QUEIROZ DA SILVA

**BELÉM
2009**

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

S586e Silva, Jadson Queiroz da
Estudo comparativo dos índices de reflectância da vegetação de manguezal e várzea-de-maré do litoral paraense através de sensoriamento remoto e técnicas espectrofotométricas / Jadson Queiroz da Silva; orientador: Marcelo Cancela Lisboa Cohen; coorientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho – 2009
ix, 83 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

1. Manguezal. 2. Reflectância. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Várzea-de-maré. 5. Pará. I. Universidade Federal do Pará. II. Cohen, Marcelo Cancela Lisboa, *orient.* III. Souza Filho, Pedro Walfir Martins e, *coorient.* IV. Título.

CDD 20. ed.: 583.42098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**ESTUDO COMPARATIVO DOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA
DA VEGETAÇÃO DE MANGUEZAL E VÁRZEA-DE-MARÉ DO
LITORAL PARAENSE ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO
REMOTO E TÉCNICAS ESPECTROFOTOMÉTRICAS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

JADSON QUEIROZ DA SILVA

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

Data de Aprovação: **08/10/2009**

Comitê de Dissertação:

DR. MARCELO CANCELA LISBOA COHEN
(Orientador-UFGPA)

DR. MAURÍCIO DA SILVA BORGES (UFGPA)
(Membro)

DR. MARCUS EMANUEL BARRONCAS FERNANDES (UFGPA)
(Membro)

Belém

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido o dom do conhecimento, e ter me dado força e coragem necessárias para superar obstáculos.

Aos meus pais por sempre me incentivarem durante os estudos.

Ao Prof. e Orientador: Dr. Marcelo Cohen e Ao Prof. e Co-orientador: Dr. Pedro Walfir pela ajuda na elaboração deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro e ao CPGG/UFPA pela oportunidade de concretizar mais um importante passo na minha vida profissional e acadêmica.

Ao técnico do Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido – LAIT: Lourival Gomes da Silva Junior pelo auxílio com *software* Spring.

A todos os outros professores do programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica pelos conhecimentos a mim transmitidos no decorrer do curso.

E a todos os amigos e amigas que fiz ao longo dessa jornada.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 – INTRODUÇÃO	3
1.1 – MANGUEZAL E VÁRZEA-DE-MARÉ: CARACTERÍSTICAS, COMPOSIÇÃO E DINÂMICA.....	3
1.1.1 – Manguezal	3
1.1.2 – Várzea-de-maré	6
1.2 – SENSORIAMENTO REMOTO E TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	10
1.2.1 – Aquisição de Imagens	10
1.2.2 – Propriedades Ópticas da Atmosfera	13
1.2.3 – Técnicas de Processamento Digital	14
1.3 – IDENTIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA DAS FOLHAS DA VEGETAÇÃO.....	19
1.3.1 – Estudo da reflectância em folhas individuais	19
1.3.2 – Estudo da reflectância sobre o dossel	22
2 – OBJETIVOS	25
2.1 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 – ÁREA DE ESTUDO.....	26
3.1.1 – Bragança	26
3.1.1.1 – Localização.....	26
3.1.1.2 – Aspectos Naturais.....	27
3.1.1.3 – Descrição dos pontos de Amostragem.....	29
3.1.2 – Curuçá	30
3.1.2.1 – Localização.....	30
3.1.2.2 – Aspectos Naturais.....	31
3.1.2.3 – Descrição dos pontos de Amostragem.....	32
3.1.3 – Mosqueiro	33
3.1.3.1 – Localização.....	33
3.1.3.2 – Aspectos Naturais.....	34
3.1.3.3 – Descrição dos pontos de Amostragem.....	34
3.2 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	35
3.3 – TRABALHO DE CAMPO.....	36

4 – RESULTADOS E DISCURSSÕES	41
4.1 – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS ESPÉCIES VEGETAIS ESTUDADAS NA REGIÃO DE BRAGANÇA.....	41
4.2 – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS ESPÉCIES VEGETAIS ESTUDADAS NA REGIÃO DE CURUÇÁ.....	53
4.3 – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS ESPÉCIES VEGETAIS ESTUDADAS NA REGIÃO DE MOSQUEIRO.....	57
4.4 – ANÁLISE INTEGRADA DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DOS MANGUEZAIS ESTUDADOS.....	58
4.5 – REFLECTÂNCIA EM RELAÇÃO À ALTURA DA VEGETAÇÃO.....	59
4.6 – MAPAS TEMÁTICOS DA VEGETAÇÃO DAS REGIÕES ESTUDADAS.	64
CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Principais espécies de manguezal: (A) <i>Rhizophora mangle</i> L.; (B) <i>Avicennia germinans</i> (L.) Stearn; (C) <i>Laguncularia racemosa</i> (L.) Gaertn.....	5
Figura 2 – Espécies de palmeiras encontradas em ambientes de várzea-de-maré: (A) <i>Mauritia flexuosa</i> L.f., (B) <i>Euterpe oleracea</i> Mart., (C) <i>Raphia taedigera</i> Mart. e (D) <i>Manicaria saccifera</i> Gaertn.....	9
Figura 3 – Esquema de obtenção de imagens em Sensoriamento Remoto.....	11
Figura 4 – Esquema de classificação dos sensores remotos.....	12
Figura 5 – Estrutura foliar básica.....	20
Figura 6 – Comportamento Espectral de uma folha verde sadia.....	21
Figura 7 – Localização da área de estudo 1.....	26
Figura 8 – Localização da área de estudo 2.....	30
Figura 9 – Localização da área de estudo 3.....	33
Figura 10 – Comportamento espectral médio do gênero <i>Avicennia</i>	41
Figura 11 – Comportamento espectral médio do gênero <i>Rhizophora</i>	42
Figura 12 – Comportamento espectral médio da família Poaceae.....	43
Figura 13 – Comportamento espectral médio da família Cyperaceae.....	44
Figura 14 – Comportamento espectral médio do gênero <i>Sesuvium</i>	45
Figura 15 – Comportamento espectral médio do gênero <i>Anacardium</i>	46
Figura 16 – Comportamento espectral médio da família Chrysobalanaceae.....	47
Figura 17 – Comportamento espectral médio da família Arecaceae.....	48
Figura 18 – Comportamento espectral médio da família Rubiaceae.....	49
Figura 19 – Comportamento espectral médio da família Caesalpiniaceae.....	50

Figura 20 – Comparação entre o comportamento espectral médio das folhas em gêneros de Manguezal.....	51
Figura 21 – Comparação entre o comportamento espectral médio das espécies coletadas em Bragança.....	52
Figura 22 – Comportamento espectral médio de <i>Rhizophora</i> de baixa e alta estatura do ponto 1B.....	53
Figura 23 – Comportamento espectral médio das folhas de <i>Avicennia</i> no ponto 1C.....	54
Figura 24 – Comportamento espectral médio das espécies de mangue no ponto 1.....	55
Figura 25 – Comportamento espectral médio das espécies de mangue no ponto 2.....	56
Figura 26 – Comportamento espectral médio das espécies de mangue no ponto 1.....	57
Figura 27 – Comportamento espectral médio dos gêneros de mangue nas três áreas de estudo.....	58
Figura 28 – Relação entre a reflectância obtida no ponto máximo do visível (550 nm) e a altura da vegetação para o gênero <i>Rhizophora</i>	60
Figura 29 – Relação entre a reflectância obtida no ponto máximo do visível (550 nm) e a altura da vegetação para o gênero <i>Avicennia</i>	62
Figura 30 – Mapa Temático – Bragança/PA.....	65
Figura 31 – Mapa Temático – Curuçá/PA.....	67
Figura 32 – Mapa Temático – Mosqueiro/PA.....	69
Figura 33 – Mapa Temático – Litoral Paraense.....	71

TABELAS

Tabela 1 – Categorias de áreas alagáveis existentes no bioma Amazônico modificado de Prance, (1979).....	7
Tabela 2 – Etapas e processos que constituem o PDI.....	14
Tabela 3 – Distribuição topográfica das unidades de vegetação na Península de Bragança.....	28
Tabela 4 – Informações das imagens utilizadas.....	35
Tabela 5 – Resultados da análise de regressão linear para o gênero <i>Rhizophora</i>	60
Tabela 6 – Resultados da análise de regressão linear para o gênero <i>Avicennia</i>	63
Tabela 7 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático Bragança/PA.....	66
Tabela 8 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático Curuçá/PA.....	68
Tabela 9 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático Mosqueiro/PA.....	70
Tabela 10 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático do Litoral Paraense.....	72

RESUMO

O trabalho em questão individualizou as principais vegetações litorâneas do Estado do Pará, através das diferenças nos níveis de reflectância obtidos a partir de imagens Landsat e de campo por meio de um espectrofotômetro. Esse estudo indicou que as amostras de manguezal possuem valores de reflectância menores que as demais espécies, principalmente no intervalo do espectro eletromagnético correspondente ao visível. Este fato pode estar relacionado à forte absorbância realizada pelos pigmentos fotossintetizantes das árvores do mangue. Entre as folhas de manguezal, o gênero *Avicennia* superou os valores de reflectância obtidos na *Rhizophora*. A reflectância das folhas de mangue também sofreu uma variação entre as aéreas estudadas, principalmente o gênero *Rhizophora*, que em Curuçá obteve valores mais altos. Esse fato pode estar associado às condições de estresse encontradas nos pontos referentes a Bragança e Mosqueiro, uma vez que efeitos causados por mudanças no ambiente alteram a reflectância espectral das folhas. No caso dos manguezais, condições adversas de salinidade podem dificultar o pleno desenvolvimento dessas plantas. Medidas realizadas em Mosqueiro apontaram uma baixa concentração de sal nas águas. Esse fator permite uma maior competição ecológica entre as espécies de mangue e demais vegetações, que somado ao tipo de sedimento pode aumentar o estresse, que justificaria a presença de indivíduos de baixa estatura e com valores de reflectância superiores as demais regiões. Os dados referentes à altura da planta relacionados com os valores espectrais encontrados nas amostras de *Rhizophora* e *Avicennia* sugerem uma relação inversa entre a reflectância e a estatura do vegetal. Essa associação pode ser atribuída ao desenvolvimento da clorofila nos estágios iniciais de crescimento do vegetal, que permite uma maior quantidade de energia refletida no intervalo do visível até a folha atingir sua coloração verde característica com relativamente menor reflectância. Com base nesses dados foram elaborados mapas com as unidades de vegetação: manguezal, florestas de terra firme, várzea-de-maré, zonas de transição manguezal/várzea e campo.

Palavras-chave: Manguezal. Reflectância. Sensoriamento Remoto. Várzea-de-maré. Pará

ABSTRACT

The present work delimited the main littoral vegetations of the Pará State through the differences in the reflectance levels obtained by Landsat images and *in situ* by a spectrophotometer. This study indicated that the mangrove leaves present lower values of reflectance than others vegetations, mainly in the visible interval of the electromagnetic spectrum. This may be related to the strong absorption developed by the photosynthesis pigments of the mangrove trees. Among its leaves, the *Avicennia* presented higher reflectance values than *Rhizophora*. Besides, the reflectance of mangrove leaves changed between the studied areas, mainly the *Rhizophora* that in Curuçá presented higher values. This can be associated to the stress conditions found in the Bragança and Mosqueiro, since the environmental changes affects the spectral reflectance of leaves. In the case of the mangrove, adverse salinity conditions may hinder the plants development. The tidal water salinity in Mosqueiro presents low values. This factor allows a wider ecological competition between the mangrove species and others vegetations that together with the sediment type, may produce an increase in the stress to the mangrove. It may justify the low height of the trees, and the relatively high reflectance values. Thus, the relationship between the tree height and spectral values of the *Rhizophora* and *Avicennia* indicates an inverse relation. This may be attributed to the development of chlorophyll in the initial periods of vegetation growth that allows a elevated amount of energy reflected in the visible interval until the leaves reach its typical green color with relatively lower reflectance. Based on the reflectance data was possible to elaborate maps with the following vegetation units: mangrove, terra firme vegetation, tidal varzea, transition zones mangrove/varzea and herbaceous field.

Keywords: Mangrove. Reflectance. Remote Sensing. Tidal Varzea. Pará

1 - INTRODUÇÃO

1.1- MANGUEZAL E VÁRZEA-DE-MARÉ: CARACTERÍSTICAS, COMPOSIÇÃO E DINÂMICA

1.1.1 – Manguezal

Com base em dados obtidos por sensores remotos, a costa brasileira possui a segunda maior área de manguezal contínua do mundo, estimada em 13.800 km² ao longo de aproximadamente 6.800 km (Kjerve & 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 km² (Souza Filho, 2005). Entretanto, grande parte dessa área contabilizada como manguezal pode ser vegetação de várzea, especificamente várzea-de-maré, também sujeita a pulsos de inundação diários.

Estudos ligados a quantificação e diferenciação de coberturas vegetais (Froidefond & Soriano-Sierra, 1996; Pereira et al., 1996; Coura et al., 2005; Mochel & Pozoni, 2007) indicam sutis diferenças nos índices de reflectância entre dois tipos de vegetação. A semelhança na resposta espectral, resultado da interação entre a radiação eletromagnética e a planta, em espécies de várzea e manguezal dificulta a individualização entre tais vegetações através de imagens de satélites, de radar ou da fusão de ambas.

Segundo a resolução CONAMA 303 de 2002, manguezal é definido como:

Ecosistema litorâneo que ocorre em terrenos baixos, sujeitos à ação das marés, formado por vasas lodosas recentes ou arenosas, às quais se associa, predominantemente, a vegetação natural conhecida como mangue, com influência flúvio - marinha, típica de solos limosos de regiões estuarinas e com dispersão descontínua ao longo da costa brasileira, entre os estados do Amapá e Santa Catarina (CONAMA, 2006, p. 88).

O desenvolvimento do ecossistema manguezal sofre influência de vários fatores ambientais. Em geral, as florestas de mangue apresentam melhor crescimento em locais de topografia adequada, ou seja, áreas sujeitas a grandes variações de maré e que recebem amplas contribuições de águas fluviais, pluviais e sedimento (Schaeffer-Novelli et al., 1990).

A origem dos sedimentos presentes nos manguezais pode ser tanto orgânica quanto mineral (Lugo & Snedake, 1974). O primeiro caso está relacionado com a decomposição de organismos que vivem nesses habitats ou que, de alguma forma, foram neles depositados. Já os minerais são formados pela degradação de rochas (intemperismo) seguida de erosão. Os principais tipos de

rochas relacionadas a esse processo são as Ígneas ou Magmáticas, formadas através da atividade vulcânica. Essas por sua vez são constituídas por três tipos de minerais: Mica, Quartzo e Feldspato (Leinz, 1985). Este último, mais sujeito a degradação, se decompõe formando os argilominerais, principal componente mineral da lama dos manguezais.

Os sedimentos encontrados nos manguezais da região norte (Pará e Amapá) apresentam contribuição clástica, transportada pelos rios que desembocam na linha de costa e materiais oriundos da plataforma continental especialmente nos períodos de estiagem, quando a água oceânica, rica em material em suspensão, atinge maiores extensões ao longo do estuário (Mendes, 2005).

Ao serem depositados no substrato manguezal, os sedimentos são retrabalhados e redistribuídos sofrendo alterações físicas e químicas típicas desses ecossistemas. A maioria desses materiais é compactada pelos movimentos das correntes de maré, desenvolvendo estratificação em função da ação mecânica, além de atividade química bacteriana. No decorrer desse processo, os sedimentos tornam-se gradualmente deficientes em oxigênio ou até mesmo anóxicos, devido à redução do espaço intersticial (Vannucci, 2002).

As florestas de mangue são constituídas de espécies vegetais especializadas (halófitas), principalmente arbóreas, adaptadas a flutuação da salinidade, e caracterizadas por colonizarem sedimentos lamosos, com baixos teores de oxigênio. As três principais espécies são: *Rhizophora mangle* L. (mangue vermelho), *Avicennia germinans* (L.) Stearn (mangue preto) e *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. (mangue branco) (Costa, 2000) (Figura 1).

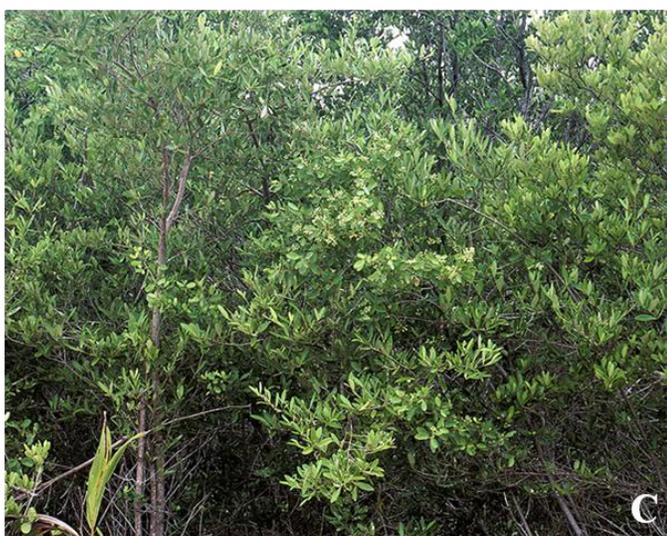


FIGURA 1 – Principais espécies de manguezal: (A) *Rhizophora mangle* L.; (B) *Avicennia germinans* (L.) Stearn; (C) *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn.
Fonte: br.viarual.com

Enquanto a *Rhizophora mangle* e a *Laguncularia racemosa* desenvolvem-se em áreas de sedimento mais lamoso, a *Avicennia germinans* é encontrada em regiões topograficamente elevadas onde a textura do sedimento é mais grosseira, com maior grau de compactação, espessa zona de oxidação, frequência e tempo de inundação reduzida. Esses fatores indicam uma maior tolerância dessa espécie a hipersalinidade (Mendes, 2005).

O funcionamento de um ecossistema está baseado na ciclagem de certos elementos químicos que existem entre os organismos e o meio físico (Pires-O'brien & O'brien, 1995). No caso dos manguezais, o depósito de nutrientes é influenciado por fatores hidrodinâmicos, como marés, correntes ou descarga de rios. Em períodos de intensidade pluviométrica, o aporte de nutrientes para o mar assume um valor absoluto maior que na estação seca, porém a taxa relativa de nutrientes diminui durante esse período. Este efeito estaria associado ao aumento da diluição. Concentrações de cátions como potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) são encontrados em quantidades significativas nos manguezais. Os íons K^+ e Ca^{2+} são provavelmente responsáveis pelo desenvolvimento da tolerância ao sal desses ecossistemas (Cohen et al., 1999).

Além de desempenhar um importante papel ecológico na ciclagem de nutrientes nos ambientes costeiros, o mangue atua como abrigo para inúmeras espécies de plantas, animais e microorganismos altamente adaptados a variações diárias de marés, representando a base de subsistência para grande parte da população humana (Costa et al., 2006). Logo, o mapeamento dos manguezais torna-se fundamental na medida em que subsidia a definição de áreas prioritárias para a conservação, bem como a avaliação da regularidade das atividades econômicas e de subsistência.

1.1.2 – Várzea-de-maré

As áreas alagadas ocupam cerca de 8% do bioma Amazônico (Ferreira et al., 2005). Pesquisas anteriores (Prance, 1979) utilizando como base o tipo de inundação, cor da água, tipo de solo, origem geológica, estrutura e composição de espécies, diferenciaram esses ambientes em sete categorias. Almeida et al. (2004) em estudos realizados na parte sul do estuário amazônico acrescentaram mais um grupo a classificação anterior totalizando oito categorias (Tabela 1).

TABELA 1 – Categorias de áreas alagáveis existentes no bioma Amazônico modificado de Prance (1979).

A. Floresta periodicamente inundada	
I. Inundação por ciclos anuais regulares de rios	
i Floresta inundada por água branca	1. Várzea sazonal
ii Floresta inundada por água preta e clara	2. Igapó sazonal
II. Inundação por movimento de maré	
i Água salgada	3. Manguezal
ii Água doce represada por marés	4. Várzea de marés
iii Água salobra	5. Várzea de estuário
III. Inundação por chuva irregular	6. Floresta de planície inundável
B. Floresta permanentemente inundada	
i Água branca	7. Floresta de pântanos
ii Água preta ou clara	8. Igapó permanente

Fonte: Almeida et al. (2004).

As áreas classificadas como várzea, de maneira geral, compreendem ambientes de depósito formados nas margens inundadas por rios de água branca ou barrenta, mais básicos e ricos em nutrientes (Pires-O'brien & O'brien, 1995). Esse ecossistema apresenta uma rica diversidade de recursos naturais, com potencial de uso de madeira, castanha, borracha, palmito, frutos, essências aromáticas, sementes oleaginosas e pescados (Ribeiro et al., 2004).

Levando em consideração o sistema hídrico, Prance (1979) divide as várzeas amazônicas em dois grupos: as várzeas sazonais (estacionais), submetidas ao ciclo natural de enchente e vazante; e as várzeas-de-maré, que assim como os manguezais, ocupam o litoral amazônico e sofrem inundações diárias. Neste caso, as enchentes e vazantes são causadas unicamente pelas marés, obedecendo às fases da lua (Pires & Koury, 1958).

Para Lima & Tourinho (1994), as marés constituem um elemento importante na hidrografia das várzeas próximas ao litoral. Elas exercem influência na direção da correnteza, na qualidade da água, na oscilação do nível das inundações, no transporte e deposição de sedimentos.

A várzea-de-maré é um ambiente inundado duas vezes por dia pela maré alta, que temporariamente bloqueia o fluxo dos rios ocasionando a cheia da floresta adjacente. Esse tipo de várzea é muito semelhante à várzea sazonal do Amazonas em sua composição de espécies e fisionomia. Esta floresta apresenta uma biomassa relativamente alta, inundada por água branca, tipo predominante nos rios e lagos da região estuarina (Prance, 1979).

Os rios de água branca apresentam uma rica quantidade de materiais em suspensão, que durante o processo de inundação, são deslocados para a várzea-de-maré. A vegetação que cobre a terra reduz a velocidade da correnteza provocando, desta forma, a sedimentação (Sioli, 1951).

O teor desses sedimentos varia de acordo com a localização das várzeas em relação ao mar, com o regime de chuvas e a intensidade das marés (Lima & Tourinho, 1994). Áreas estuarinas sujeitas às marés diárias são obviamente mais pantanosas do que as regiões inundadas somente pelas marés de sizígia, estas últimas tendendo a ser similares às várzeas sazonais.

Viera et al. (1967) em análises químicas dos solos de várzeas-de-maré encontrados na região bragantina, constataram a presença de cálcio e magnésio, principalmente deste último, com teores elevados; o potássio apresentou teores baixos e o sódio valores médios. A análise da matéria orgânica, realizada pelos autores acima citados, demonstrou teores de carbono e nitrogênio com valores médios nos dois primeiros horizontes, decrescendo consideravelmente com a profundidade do perfil.

Quanto à vegetação, existe uma considerável variação de espécies presentes nas várzeas-de-maré. As áreas dominadas por palmeiras são freqüentes neste ambiente assim como o predomínio de floresta mista. Exemplos: *Mauritia flexuosa* L.f. (Buruti) e *Euterpe oleracea* Mart. (Açaí), muitas vezes encontradas num estágio de pleno desenvolvimento, são também identificados em outros habitats. Enquanto que espécies como a *Raphia taedigera* Mart. (Jupati) e a *Manicaria saccifera* Gaertn. (Ubuçu) restringem-se às áreas influenciadas pela maré (Prance, 1979) (Figura 2).



FIGURA 2 – Espécies de palmeiras encontradas em ambientes de várzea-de-maré: (A) *Mauritia flexuosa* L.f., (B) *Euterpe oleracea* Mart., (C) *Raphia taedigera* Mart. e (D) *Manicaria saccifera* Gaertn.
 Fonte: (A) Herbário Digital; (B) Palm Base; (C) INbio e (D) Palm Talk.

Ainda segundo Prance (1979), as espécies florestais normalmente encontradas nas várzeas-de-maré incluem: *Virola surinamensis* Warb. (Nós-moscado), *Cedrelinga castanaeformis* Ducke., *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Samaúna-da-várzea) e *Mora paraensis* Ducke. (Paracuúba). Na floresta marginal, encontramos o *Machaerium lanatum* Tul., uma das espécies

mais características. Outros grupos presentes na área costeira são *Pithecolobium huberi* Ducke., *Derris latifolia* Prain., *Hymenaea comosa* (Sw.) Miers., *Inga bourgoni* DC., e *Tabebuia aquatilis* (E. Mey.) Sprague e Sandwith.

As várzeas do sistema de águas brancas influenciadas pelas marés apresentam grande variabilidade ambiental (Almeida et al., 2004). Sendo um complexo ecossistema, com imensa riqueza biológica e passível de utilização, a manutenção da vida humana nessas regiões necessita de ações que visem à conservação deste ambiente para que o mesmo não perca seus atributos originais. Somente assim será possível conservar as espécies ali presentes e, conseqüentemente, as populações que dela dependem (Surgik, 2006).

1.2- SENSORIAMENTO REMOTO E TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

1.2.1- **Aquisição de Imagens**

O sensoriamento remoto e geoprocessamento constituem técnicas freqüentemente empregadas em estudos ligados à dinâmica costeira como a quantificação e diferenciação de coberturas vegetais; dentre estas, os principais manguezais do litoral brasileiro vem sendo objeto de mapeamentos, levantamentos florísticos e monitoramento ambiental (Froidefond & Soriano-Sierra, 1996).

O sensoriamento remoto pode ser entendido como a aquisição de algum dado ou informação a respeito de um objeto ou fenômeno sem que ocorra contato direto com o mesmo. Isto ocorre devido à interação da radiação eletromagnética emitida por uma fonte de energia, no caso o sol, com as partículas que compõem o alvo (Meneses, 2001). Os dados adquiridos são coletados por sensores associados às plataformas orbitais e suborbitais que operam em diversas altitudes (Figura 3).

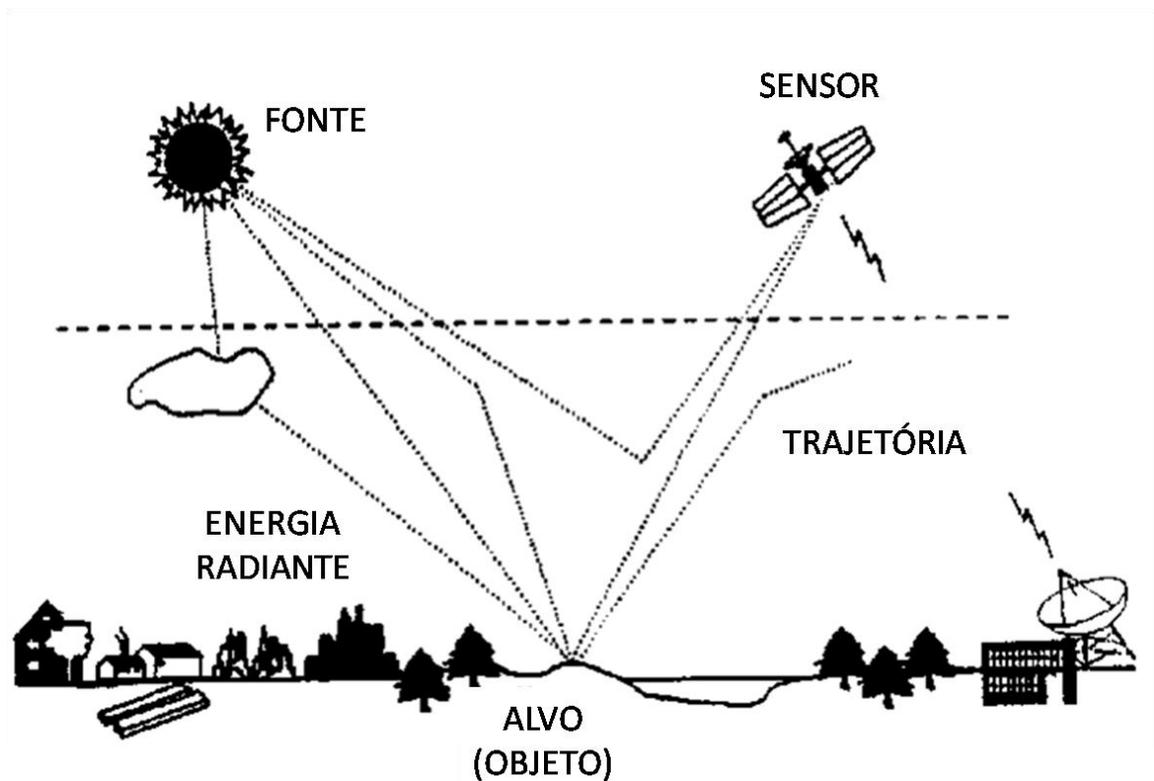


FIGURA 3 – Esquema de obtenção de imagens em Sensoriamento Remoto.
Fonte: Moreira (2003).

Diferentes feições da superfície terrestre podem ser mapeadas utilizando sistemas sensores. Esses equipamentos recebem a energia refletida proveniente do objeto, da área ou do fenômeno, convertendo-a em sinal passível a ser registrado e apresentado de forma adequada à extração dos dados. Para isso, dispõem de habilidades ópticas capazes de distinguir certos sinais que estão espacialmente próximos ou são espectralmente similares, essa capacidade é denominada **Resolução**.

Segundo Jensen (1996), para fins de sensoriamento remoto, o termo resolução divide-se em quatro parâmetros distintos: **resolução espectral**, referente ao número e dimensão de intervalos específicos existentes em todos os comprimentos de onda no espectro eletromagnético; **resolução espacial**, que corresponde à menor distância linear ou angular de separação entre dois objetos reconhecidos pelo sensor; **resolução temporal**, associada à frequência de aquisição da imagem em uma determinada área; e **resolução radiométrica**, que é definida como a sensibilidade do sensor em detectar diferenças em sinais fortes (radiações refletidas ou emitidas do terreno).

Para Moreira (2003), os sensores podem ser classificados de acordo com a fonte de energia utilizada, o princípio de funcionamento e o tipo de produto (Figura 4).

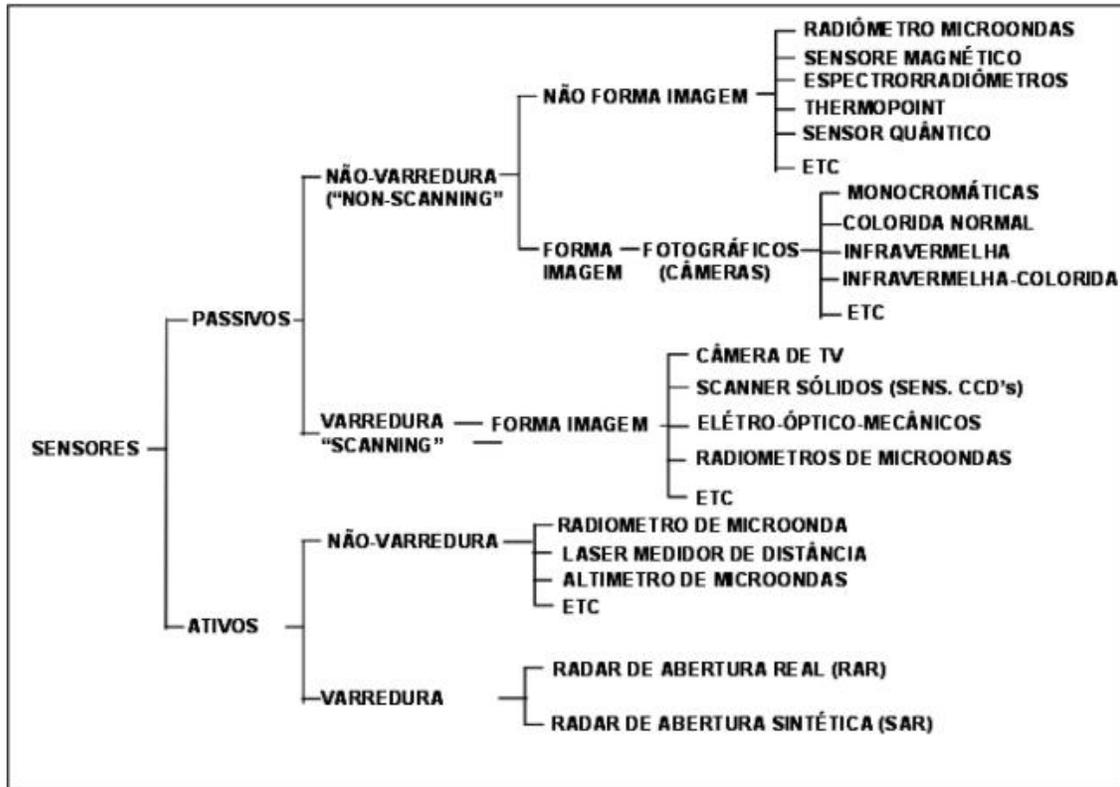


FIGURA 4 – Esquema de classificação dos sensores remotos.
Fonte: Moreira (2003).

O resultado da interação sensor/alvo pode ser dado em forma de tabelas, gráficos ou imagens. A imagem é uma representação bidimensional (2D) constituída por um arranjo de elementos que formam uma malha ou *grid*, onde cada cela ou *pixel* tem sua localização definida em um sistema de coordenadas (x,y) (Crósta, 1992).

Além das coordenadas (x,y) a imagem possui um terceiro atributo (z) que indica o nível de cinza, conhecido também pelo termo em inglês *digital number* (DN), cujo valor corresponde à média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes na área da superfície terrestre correspondente ao tamanho do pixel (Crósta, 1992).

1.2.2- Propriedades Ópticas da Atmosfera

Os sensores orbitais, durante a passagem sobre o alvo, sofrem interferências que influenciam na formação da imagem. Essas alterações, passíveis de correção, podem estar relacionadas com: a instabilidade e posição do satélite (plataforma que abriga o sensor), o movimento de rotação exercido pela terra, a curvatura do planeta e as diversas interações entre a radiação eletromagnética e as partículas presentes na atmosfera. Dentre esses fenômenos temos o **espalhamento atmosférico** e a **absorção**.

O espalhamento atmosférico muda a direção de propagação do fluxo eletromagnético dispersando-o em várias direções. Esse efeito provoca a atenuação do sinal captado pelo sensor, estando presente em todos os comprimentos de onda sem que ocorra alteração dos mesmos (Latorre et al., 2002). Considerando o tamanho da partícula, o espalhamento pode ocorrer em três tipos: molecular ou *Rayleigh*, *Mie* e *Não-Seletivo*.

No tipo molecular ou *Rayleigh* a relação entre o diâmetro da partícula e o comprimento de onda é menor que 1, gerando um espalhamento isotrópico, isto é, simétrico tanto com relação à intensidade quanto à direção da onda e à radiação incidente. Nesse caso, a quantidade de radiação dispersa (E) é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (λ), expressa na relação: $E = 1/\lambda^4$.

Quando o diâmetro da partícula aproxima-se quantitativamente do comprimento de onda, ocorre o espalhamento conhecido como *Mie*. Se a razão entre estes valores for igual a 1, então: $E = 1/\lambda^2$.

O espalhamento *Não-Seletivo* ocorre quando o tamanho das partículas deixa de influenciar na dispersão da radiação. Ou seja, o aumento do diâmetro desses materiais diminui a dependência do espalhamento quanto ao comprimento de onda incidente. Geralmente, o tamanho das partículas é muito maior do que os comprimentos das radiações eletromagnéticas.

Outra interferência gerada pela atmosfera é a absorção. Richards & Jia (2006) a definem como um processo seletivo realizado pelos constituintes atmosféricos que convertem a energia radiante em calor, ocorrendo de forma seletiva em comprimentos de onda específicos, mas abrangendo todo o espectro óptico. Entre os principais responsáveis por esse efeito estão as moléculas de gases e os vapores.

O ozônio (O₃) e o oxigênio (O₂) absorvem a radiação ultravioleta, enquanto que o vapor de água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O) entre outros atuam na região do espectro correspondente ao infravermelho e microondas. Essas substâncias influenciam na captura das imagens pelos sensores cujas bandas estejam abrangendo regiões do espectro eletromagnético em que ocorra a absorção¹.

1.2.3- Técnicas de Processamento Digital

Após a aquisição, as imagens são submetidas a técnicas de análise digital denominadas de **Processamento Digital de Imagens (PDI)** que tem como objetivo melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios destinados à sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (Fonseca et al., 2000).

A base do PDI está na análise quantitativa do atributo numérico (DN) fornecido pelo pixel, que permite caracterizar automaticamente as diversas feições encontradas na imagem. Seguindo esse princípio, Sales (2005) divide as técnicas de processamento digital em duas etapas (Tabela 2).

TABELA 2 – Etapas e processos que constituem o PDI.

Etapas	Processos
Pré-processamento	Correção Geométrica Correção Atmosférica Registro
Processamento	Realce Segmentação Classificação

Fonte: Sales (2005)

¹ Existem regiões do espectro em que a absorção não ocorre, ou seja, a atmosfera é “transparente” funcionando como uma espécie de “janela”.

Correção Geométrica e Registro

As imagens geradas por sensores remotos não apresentam precisão cartográfica no que se refere ao posicionamento de alvos ou fenômenos nela inseridos. Isto decorre das diversas distorções espaciais as quais estão sujeitas (Crósta, 1992). O processo de correção geométrica integra a imagem a um sistema de informações geográficas (SIG), e esta passa a adquirir uma propriedade de escala e projeção.

Após a correção geométrica, é realizado o registro. Esse processo tem como objetivo assegurar a correlação entre os pontos coletados na imagem e os obtidos durante as visitas de campo. Para registrar uma imagem pode-se utilizar outra imagem já georeferenciada (corrigida geometricamente e registrada), pontos de controle no terreno (utilizando GPS) ou através de cartas impressas com auxílio da mesa digitalizadora.

Correção Atmosférica

Esse processo é responsável pela retirada do efeito aditivo ocasionado pelo espalhamento atmosférico. Latorre et al. (2002) classificam os métodos de correção atmosférica em:

- a) Alternativos: Esses métodos utilizam apenas informações presentes na imagem (números digitais existentes nos pixels) e não dependem de parâmetros atmosféricos ou dados de superfície. Ex: *Internal Average Relative Reflectance (IARR)*, *Empirical Line Flat Field*, Método do Histograma² Mínimo, Subtração do pixel escuro entre outros;
- b) Físicos: São aplicados com base nas propriedades ópticas da atmosfera e a interação da radiação com o meio atmosférico e a superfície. Exemplos: os códigos: 5S, 6S, LOWTRAN e MODTRAN.

Dentre os métodos apresentados, a subtração do pixel escuro (*Dark Pixel Subtraction*), desenvolvido por Chavez (1988) é o mais utilizado devido à simplicidade e rapidez de aplicação. Segundo Gürtler et al. (2003) esse método alternativo propõe a subtração dos alvos escuros (sombras geradas por nuvens e/ou topografia) que apresentariam na imagem valores ideais de

² O histograma da imagem fornece a informação sobre quantos pixels na imagem possuem cada valor de DN (Crósta, 1992).

cinza com reflectância em torno de 1%. Porém devido ao espalhamento atmosférico, essa percentagem tende a aumentar.

Na prática, o método em questão utiliza-se do menor valor de cinza, obtido pela análise do histograma, que retrata as condições atmosféricas existentes no momento da passagem do sensor pelo alvo. O valor a ser subtraído em cada banda é calculado a partir do pixel escuro, reduzindo-o a 1% de reflectância.

Realce

Fonseca et al. (2000) afirmam que as técnicas de realce têm como função melhorar a qualidade visual das imagens, enfatizando assim, algumas características de interesse para uma aplicação específica. Os autores ainda consideram dois meios de transformação: **modificação da escala de cinza** (aumento de contraste) e **filtragem**. Vale ressaltar que ambas as técnicas de realce apresentadas não interferem na reflectância na imagem, apenas auxiliam o intérprete durante a análise.

Geralmente, as imagens de sensoriamento são adquiridas com resolução radiométrica em torno de 6 a 8 bits, portanto apresentam aproximadamente 256 níveis de cinza (DN), variando entre do preto ao branco. Como os sensores são projetados para registrar uma grande variedade de valores originados pela reflectância de todos os tipos de materiais naturais, dificilmente os dados espalham-se uniformemente ao longo do intervalo, concentrando-se em pequenas regiões (Crósta, 1992).

Com o histograma comprimido, a imagem apresenta um baixo contraste, dificultando a extração da informação pelo analista humano. O aumento de contraste redistribui os valores de cinza uniformemente por todo o intervalo, ocasionando a expansão do histograma. Essa técnica envolve uma transformação na escala de cinza, onde o novo valor atribuído ao ponto depende somente do valor antigo.

Todos os alvos registrados pelos sensores remotos interagem de forma diferente com a radiação eletromagnética. Isso leva à criação de limites para áreas com respostas espectrais distintas nas imagens. Esses limites podem ser determinados por feições de alta, média ou baixa frequência, a mistura desses fatores dificulta a interpretação de alvos específicos.

No realce dessas diferentes feições, que compõem as imagens de sensoriamento, são utilizadas técnicas de **filtragem espacial de frequências**, que ao contrário das transformações pontuais como o aumento de contraste, não dependem somente do valor do ponto, mas da diferença de intensidade entre os pixels vizinhos. Esse processo é essencial para a determinação de bordas, feições lineares de determinadas direções e padrões de textura (Crósta, 1992).

Segmentação

O processo de segmentação consiste na separação da imagem em partes ou regiões significativas (Jähne, 2005). Uma região consiste de um conjunto de pixels contíguos que apresentam as mesmas características espectrais e espaciais com relação a um determinado atributo extraído e usado posteriormente durante o processo de análise.

As técnicas de segmentação encontram-se baseadas em dois fatores principais: a **similaridade**, que envolve o agregamento de pixels em função da sua semelhança com os pixels vizinhos e a **descontinuidade**, relacionada com a mudança abrupta dos valores de cinza (Gonzales & Wintz, 1987; Jähne, 2005). Fundamentado sobre esse contexto, a segmentação de imagens pode ser realizada de três formas: crescimento de regiões, detecção de bordas e a combinação de ambas.

Na segmentação das imagens utilizadas neste estudo aplicou-se o método de crescimento de regiões, uma vez que o mesmo permite extrair um rico conjunto de atributos e selecionar amostras mais representativas de cada classe (Nascimento, 1997; Almeida Filho et al., 1998). Durante o processo, a imagem é partida em regiões homogêneas, cada uma contendo um único rótulo. A técnica é iniciada com a definição do “pixel semente”, que agrupa os demais vizinhos próximos semelhantes obedecendo a limiares como similaridade e área de pixels. Ainda segundo Nascimento (1997), a similaridade é determinada por um parâmetro de tolerância T (que representa a distância euclidiana entre os vetores associados a cada segmento), a área mínima para cada região é dada pela constante A (número de pixels).

O agrupamento de pixels deve atender aos seguintes critérios (Batista et al., 1994):

- 1) $R_i =$ vizinho mais próximo de R_j ;
- 2) $R_j =$ vizinho mais próximo de R_i ;
- 3) $\text{dist}(R_i, R_j) <$ limiar de similaridade

Onde: $\text{dist}(R_i, R_j)$ é a distância Euclidiana entre R_i e R_j .

Obedecidas as condições acima, cada região R_j (com valor de pixel menor que o limiar de área) cria um segmento $R_k = R_j \cup R_i$ onde R_i é o vizinho mais próximo de R_j . No final, tem-se a descrição da imagem com cada região possuindo um rótulo.

A definição desses parâmetros é uma etapa fundamental para o processo de segmentação; quanto maior o valor atribuído à similaridade menor será o número de distinções, ou seja, pixels representativos de diferentes regiões serão incorretamente agrupados. Caso ocorra o oposto (valores muito baixos), haverá um grande detalhamento na imagem, segmentando áreas homogêneas.

Classificação

Com as técnicas de sensoriamento remoto é possível realizar estudos sobre determinada área ou objeto sem manter contato direto com o mesmo. Partindo desse princípio, identificar feições ou atributos homogêneos nas imagens torna-se um dos objetivos principais em PDI, sendo para isso necessário a aplicação de técnicas classificatórias.

A classificação consiste em extrair da imagem informações de objetos reais (solo, água, vegetação, etc.) e agrupá-las em temas baseados no conjunto da refletância fornecida pelos materiais que compõem o pixel (Crósta, 1992). O resultado final desse processo é uma imagem temática, onde esses temas representam características da superfície. Com relação ao tipo de treinamento aplicado, a classificação pode ser **supervisionada** ou **não-supervisionada**.

A classificação **não-supervisionada** é um processo realizado por algoritmos de agrupamento em que cabe ao programa atribuir a cada pixel da imagem uma classe espectral específica, considerando padrões de similaridade (Nascimento, 1997). Para isso, o intérprete não necessita conhecer a região previamente. Já na classificação **supervisionada**, são adquiridas pelo usuário amostras significativas de feições encontradas no terreno (treinamento) e a partir delas, os pixels, que apresentam o mesmo comportamento espectral, são incorporados às classes (Fonseca et al., 2000).

Ainda os classificadores podem ser do tipo pixel a pixel ou por regiões. No primeiro caso, as informações homogêneas são identificadas apenas com base na informação isolada fornecida

pelo pixel, enquanto que no segundo tipo uma partição da imagem em regiões, utilizando a segmentação, antecede o agrupamento dessas áreas. Logo, todos os pixels presentes nestes setores serão associados à mesma classe.

1.3- IDENTIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA DAS FOLHAS DA VEGETAÇÃO

Os estudos da cobertura vegetal por técnicas de sensoriamento remoto e PDI estão baseados no **Comportamento Espectral** ou “aparência” assumida pela vegetação, caracterizando a reflectância da energia eletromagnética pelas folhas, plantas individuais ou em conjunto, formando dosséis (Ponzoni, 2001).

Ao interagir com a planta, a radiação eletromagnética (REM) origina três frações: parte dela é **absorvida** pela água ou pigmentos existentes na folha, responsáveis pelos processos fotossintéticos. Outra parte é **refletida** pelas folhas e uma terceira parte sofre um processo de **transmissão**, atravessando a superfície foliar e seus demais componentes.

Essas quantidades de energia absorvida, transmitida ou refletida pelas folhas das plantas podem diferir de uma espécie para outra ou até mesmo dentro da própria espécie, dependendo da influência exercida pelo ambiente (Moreira, 2003).

1.3.1- Estudo da reflectância em folhas individuais

Para fins de sensoriamento remoto, as folhas são os elementos vegetais de principal interesse (Ponzoni, 2001; Mochel & Ponzoni, 2007). Pois são elas que determinam, por meio de características morfológicas e bioquímicas, os comprimentos de onda absorvidos, refletidos e transmitidos (Affonso, 2004). Basicamente, a estrutura foliar apresenta três tecidos: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular, sendo o mesófilo subdividido em uma ou várias camadas de células (paliçádicas alongadas), arranjas perpendicularmente à superfície da folha formando o parênquima (Figura 5).

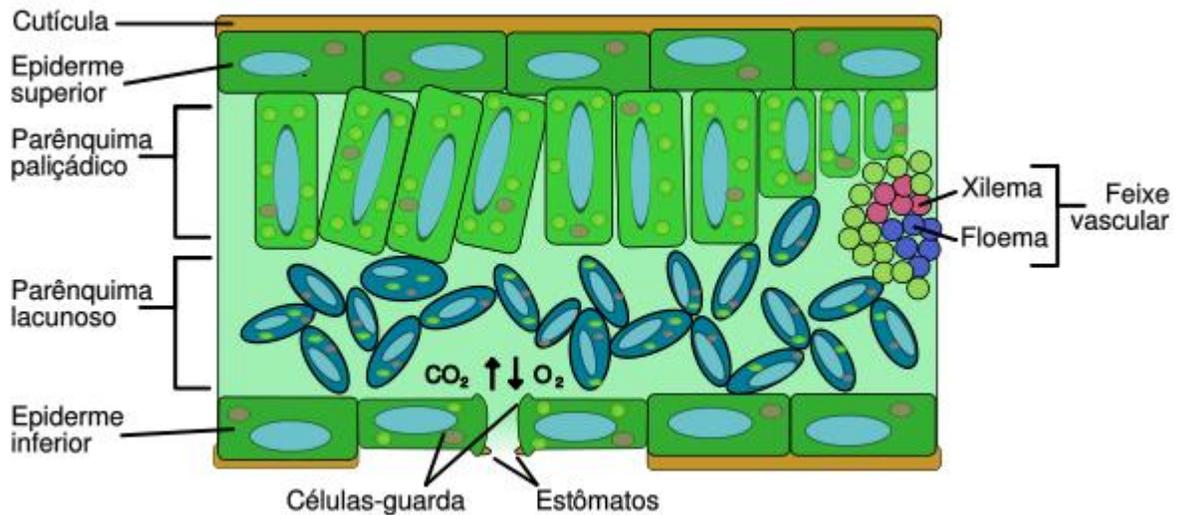


FIGURA 5 – Estrutura foliar básica.

Fonte: commons.wikimedia.org

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. Dentre esses constituintes foliares que influenciam na reflectância estão: 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 camada superficial, enquanto uma maior porção é transmitida para o mesófilo esponjoso onde, dependendo do ângulo de incidência, os raios são refletidos nas paredes celulares.

Affonso (2004) ilustra o comportamento de uma folha verde sadia com relação aos intervalos do espectro eletromagnético fornecido pela radiação incidente (Figura 6).

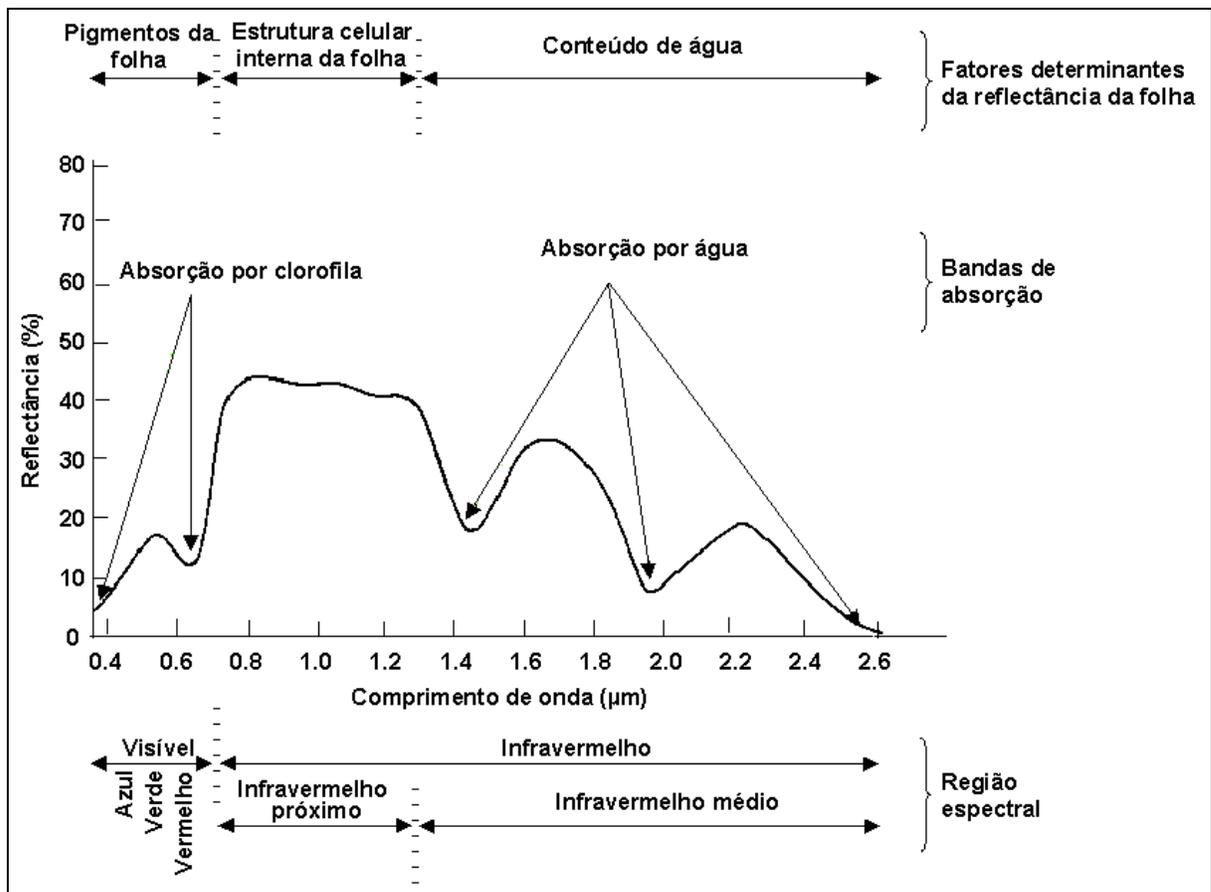


FIGURA 6 – Comportamento Espectral de uma folha verde sadia.
Fonte: Affonso (2004)

Com base na análise do gráfico, serão descritos 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 – 1,1 μm) e infravermelho médio (1,1 – 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 REM em

função da disposição da estrutura morfológica foliar (Jensen, 2000; Ponzoni, 2001; Moreira, 2003).

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 μm), locais com grande concentração do líquido.

Para Ponzoni (2001), ainda existem outros fatores que influenciam na interação com 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.

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.

Quando a planta é submetida a um déficit hídrico, uma série de reações ocorre em seu interior com o intuito de restaurar a estabilidade, uma delas é o fechamento dos estômatos. Essa situação proporciona uma perda menor de água, ocasionando a diminuição da taxa fotossintética em razão da menor absorção de 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.

1.3.2- Estudo da 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. Porém para estudar a reflectância vegetal, utilizando sensoriamento remoto, é necessário compreender o processo de interação entre a REM e os diversos tipos de dosséis (Ponzoni, 2002).

Ainda segundo Ponzoni (2002), a reflectância obtida com amostras de folhas isoladas é estimada pelo fator de reflectância hemisférica diferentemente da emitida por dosséis, onde prevalece o fator bidirecional. 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 o dossel apresentam a mesma curva padrão para o comportamento espectral (Figura 6), alterando somente a intensidade da reflectância, que assume valores maiores no conjunto vegetal.

Segundo Sousa & Ponzoni (1996); Ponzoni et al. (2002), fatores que influenciam na 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 é um arranjo de vários constituintes vegetais (folhas, galhos, frutos, etc.), que compõem a chamada copa das árvores, apresentando diversos tipos fisionômicos como florestas, culturas agrícolas, formações de porte herbáceo, etc. 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 sub-dosséis arranjados regularmente ou aleatoriamente, seguindo uma orientação específica (Ponzoni, 2001).

Quando o dossel ou sub-dossel é dito homogêneo, sua densidade é considerada uniforme sendo definida pelo índice de área foliar (IAF), obtido na relação: cobertura vegetal / unidade de área. 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: (1) a proporção de sombras sobre diferentes folhas; (2) a disposição predominantemente horizontal e (3) 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; intermediária, parte das folhas possui ângulos de ambas as inserções anteriores (Moreira, 2003).

Segundo Goel (1988), a radiação incidente ao atingir o dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e composição espectral alteradas de maneira complexa pela vegetação. Com isso, autor em questão afirma que um sistema pertinente para estudar a reflectância do dossel por meio de imagens orbitais, deve considerar os seguintes subsistemas:

- a) Fonte de radiação (a_i): na maioria dos casos representada pelo sol, envolvendo algumas propriedades como a irradiância espectral ($E\lambda$) e a localização dos ângulos zenital (θ_s) e azimutal (φ_s) solar;
- b) Atmosfera (b_i): meio composto por vários gases e partículas responsáveis pelos efeitos de absorção e espalhamento da radiação;
- c) Dossel (c_i): formado pelos componentes da vegetação, apresentando propriedades ópticas (reflectância e transmitância), estruturais (forma e posicionamento) e ambientais (temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação);
- d) Solo (d_i): que apresenta características como rugosidade, textura e umidade podendo gerar efeitos de reflectância e absorbância;
- e) Detector (e_i): responsável pela captura da imagem, possuindo uma série de parâmetros que definem sua sensibilidade espectral, abertura, calibração e posicionamento espacial.

Assim, ao atingir o topo da atmosfera, a REM emitida pela fonte pode ser espalhada ou refletida por partículas atmosféricas, parte da energia que consegue atravessar ainda pode sofrer um novo espalhamento ocasionado por elementos do dossel antes de interagir com alvo e retornar para o espaço onde o sensor realiza sua detecção. Portanto a relação entre a radiação recebida e a medida ao final do processo, definida por R_i , está em função dos subsistemas citados, segundo a equação:

$$R_i = f(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i)$$

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 às chamadas ambigüidades, nas quais efeitos de diferentes fatores/parâmetros podem assumir valores iguais de reflectância, o que implicará em uma “mesma” aparência nas imagens, mesmo em se tratando de diferentes coberturas vegetais (Ponzoni, 2001).

2 - OBJETIVOS

O estudo em questão utiliza as ferramentas do sensoriamento remoto na análise da resposta espectral emitida pelas folhas, com o objetivo de aprimorar a individualização da vegetação litorânea, principalmente os manguezais e as várzeas-de-maré, em imagens orbitais através de um estudo comparativo das características espectrais dessas unidades de vegetação.

2.1- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as faixas de reflectância das vegetações litorâneas em especial as de manguezal e de várzea-de-maré, que podem ser obtidas a partir do processamento digital de imagens Landsat 5 e 7;
- Identificar os índices de reflectância das folhas que compõem esses tipos de vegetação por meio de um espectrofotômetro Spectrolino *Gretag MacBeath*;
- Elaboração de um mapa de cobertura vegetal baseado nas características espectrais das vegetações em estudo.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- ÁREA DE ESTUDO

Para análise da reflectância em diferentes tipos vegetais, consideramos três regiões com características ambientais distintas. A primeira (Bragança) possui forte influência salina, a segunda (Curuçá) pode ser entendida como uma zona de transição e a terceira (Mosqueiro) um ambiente de domínio fluvial.

3.1.1- Bragança

3.1.1.1- Localização

A península de Bragança encontra-se no litoral paraense. Localizada entre 47° - $46^{\circ}45'$ W e 1° - $1^{\circ}15'$ S. O clima da região é o Equatorial quente e úmido com estações secas e chuvosas bem definidas, com temperatura e precipitação anual média de 25.5°C e 2.550 mm , respectivamente, e a umidade relativa de 75% entre janeiro e maio, durante a estação chuvosa (Lara et al., 2002). Esta área é coberta pela imagem órbita/ponto 222/61 do sensor TM do satélite Landsat5 (Figura 7).

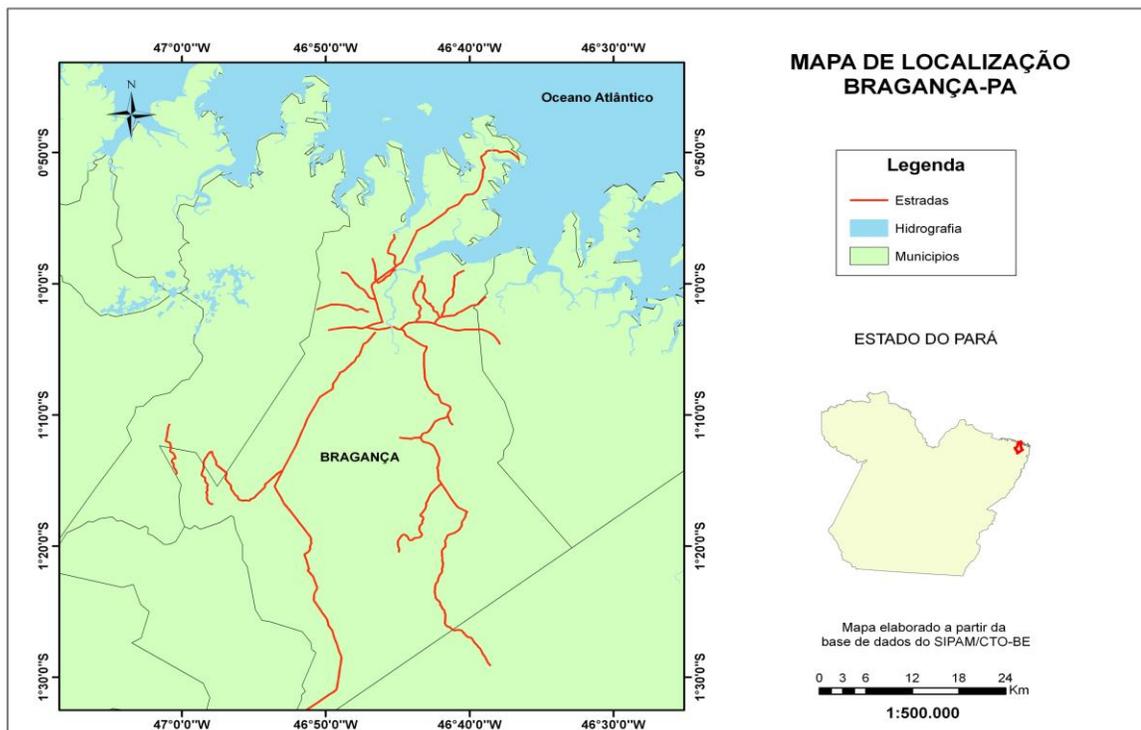


FIGURA 7 – Localização da área de estudo 1.

3.1.1.2- Aspectos Naturais

O município de Bragança apresenta, além dos sedimentos Terciários (Formação Barreiras) e Quaternários Atuais e Subatuais, rochas graníticas de idade Pré-Cambriana, exposições de rochas da seqüência carbonática, de idade Terciária (Formação Pirabas), assim como rochas do grupo Gurupi, constituídas por metassedimentos e metavulcânicas, cortadas por véus de quartzo, alguns deles auríferos. A morfologia geral corresponde à unidade morfoestrutural do Planalto Rebaixado da Amazônia (da Zona Bragantina), constituído pelas áreas tabulares (Formação Barreiras), áreas levemente colinosas (cristalino) e áreas de planície fluvio-marinha, onde se destacam as ilhas de praias e manguezais (Souza Filho & El-Robrini, 2000).

Quanto à vegetação, a península de Bragança foi selecionada para esse estudo por apresentar uma grande diversidade de unidades vegetacionais. A planície costeira na península de Bragança possui pelo menos quatro unidades vegetacionais: Floresta Amazônica Costeira (Terra Firme), Restinga, Planície Herbácea e Manguezais. Cada assembléia vegetal encontra-se em uma cota topográfica característica (Tabela 3) (Cohen et al., 2005).

As florestas de terra firme ocorrem em áreas não sujeitas a inundações. Caracterizam-se pela heterogeneidade florística com a predominância de espécies altas (com mais de 25 m), a copa fechada, muitos cipós e elevada biomassa (Pires-O'brien & O'brien, 1995).

Seguindo o conceito botânico, Amaral et al. (2008) definem restinga como a vegetação que ocorre adjacente ao oceano nas planícies costeiras arenosas quaternárias. Ainda segundo os autores, o litoral amazônico (Pará e Amapá) apresenta distinções fisionômicas, geomorfológicas e florísticas conforme o trecho litorâneo de ocorrência.

A planície herbácea, assim como a restinga, é caracterizada por apresentar plantas de pequeno porte espaçadas entre si (maiores representantes são as Gramineae e Cyperaceae), além de espécies arbustivas que ocupam áreas de solo arenoso ou dunas, próximos a linha de costa (Lara & Cohen, 2009).

O manguezal é um ambiente de transição, que ocorre em regiões estuarinas da Amazônia, onde a vegetação sofre inundações diárias pelos movimentos das marés (Prance, 1979). Neste local, as árvores são adaptadas às variações de salinidade e aos baixos teores de oxigênio presentes no sedimento lamoso.

TABELA 3 – Distribuição topográfica das unidades de vegetação na Península de Bragança.

Unidade de Vegetação	Vegetação	Área (Km ²)	Topografia e Maré ³ (m)	Tipo de Sedimento
Floresta Costeira Amazônica	<i>Coccoloba latifolia</i> Lam., <i>Himatanthus articulata</i> (Vahl) Woodson, <i>Anacardium occidentale</i> L., <i>Protium heptaphyllum</i> March., <i>Ouratea castanaefolia</i> (DC.), <i>Ouratea microdonta</i> (Dalzell) Engl., <i>Tapirira guianensis</i> Aubl., <i>Myrcia fallax</i> (Rich.) DC., <i>Myrcia sylvatica</i> (G.Mey.) DC., <i>Eugenia patrisii</i> Vahl.	1	>3.0 (nunca inundado pela maré)	Areia
Restinga	<i>Chrysobalanus icaco</i> L., <i>Anacardium occidentale</i> L., <i>Byrsonima crassifolia</i> L. Rich.	2	>3.0 (próximo ao litoral)	Areia
Planície Herbácea	<i>Sporobolus virginicus</i> (L.) Kunth. e <i>Eleocharis geniculata</i> (L.) Roem. & Schult.	7	2.4-3.0 (supra – maré)	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> L., <i>Avicennia germinans</i> (L.) Stearn. e <i>Laguncularia racemosa</i> (L.) Gaertn.	168	1.0 – 2.4 (entre o nível do mar médio e a média da maré alta de sizígea)	Lama

Fonte: Cohen et al. (2005).

³ Elevação acima do nível médio do mar.

3.1.1.3- Descrição dos pontos de Amostragem

Na região de Bragança, foram definidos oito pontos de coleta localizados ao longo da rodovia PA – 458, que conduz à vila de Ajuruteua. A campanha foi realizada no dia 22/09/2007 e teve aproximadamente 8 h de duração. A descrição dos pontos é apresentada a seguir:

O ponto 1 (coordenadas: 0°55'37"S 46°42'12"W. às 11:20 hs) corresponde a um bosque colonizado por *Avicennia*, na época sob estresse. A altura média das árvores fixava-se em torno de 8 m, com diâmetro do tronco (DAP) em torno de 15 cm e o espaçamento entre árvores variou de 2 a 4 m. O sedimento foi caracterizado como lama arenosa seca com salinidade da água intersticial por volta de 80.

O ponto 2 (coordenadas: 0°54'35"S 46°40'51"W. às 12:03 hs) foi caracterizado como Campo Herbáceo com focos isolados de *Avicennia*. A salinidade da água intersticial medida chegou a 100, o sedimento era de lama arenosa avermelhada apresentando cristais de sal na superfície.

O ponto 3 (coordenadas: 0°52'25"S 46°39'00"W. às 12:28 hs) apresentou um sedimento areno-argiloso amarelo claro com salinidade de aproximadamente 50. O local era colonizado por *Rhizophora*, com pouca *Avicennia* de grande porte. A estatura atingia cerca de 13 m.

No ponto 4 (coordenadas: 0°50'41"S 46°38'39"W. às 12:54 hs), a vegetação era semelhante ao ponto 3, porém com árvores de estaturas maiores, aproximadamente 17 m. O sedimento era lama arenosa com salinidade intersticial de 40.

Os pontos 5 (coordenadas: 0°49'54"S 46°36'36"W. às 13:36 hs) e 6 (coordenadas: 0°50'14"S 46°36'40"W) possuem as mesmas características. Ambos localizam-se na zona de Restinga, onde predomina a vegetação Herbácea, especialmente Cyperaceae que habitam um substrato formado por sedimentos arenosos.

Ao ponto 7 (coordenadas: 0°58'09"S 46°44'16"W. às 13:53 hs) podem ser atribuídos os mesmos aspectos da vegetação encontrada nos pontos 3 e 4, porém, com a ocorrência de Cyperaceae próximo à rodovia.

Por último, no ponto 8 (coordenadas: 0°58'17"S 46°44'20"W. às 14:06 hs) ocorreu o predomínio da cobertura vegetal de terra firme.

3.1.2- Curuçá

3.1.2.1- Localização

O município de Curuçá pertence à Mesorregião do Nordeste Paraense e à Microrregião do Salgado, localizada entre 00°30' - 00°45'S e 48°00' - 47°30'W. O clima insere-se na categoria Equatorial Amazônico, caracterizado pelas temperaturas elevadas, com média de 27 °C, pequena amplitude térmica, e precipitações abundantes que ultrapassam os 2.000 mm anuais, sendo os meses mais chuvosos de janeiro a junho, e menos chuvosos, de julho a dezembro (CHD & GEMC, 2004)⁴.

Esta área é coberta pelas imagens órbita/ponto 223/60 e 223/61 do sensor ETM⁺ do satélite Landsat7 (Figura 8).

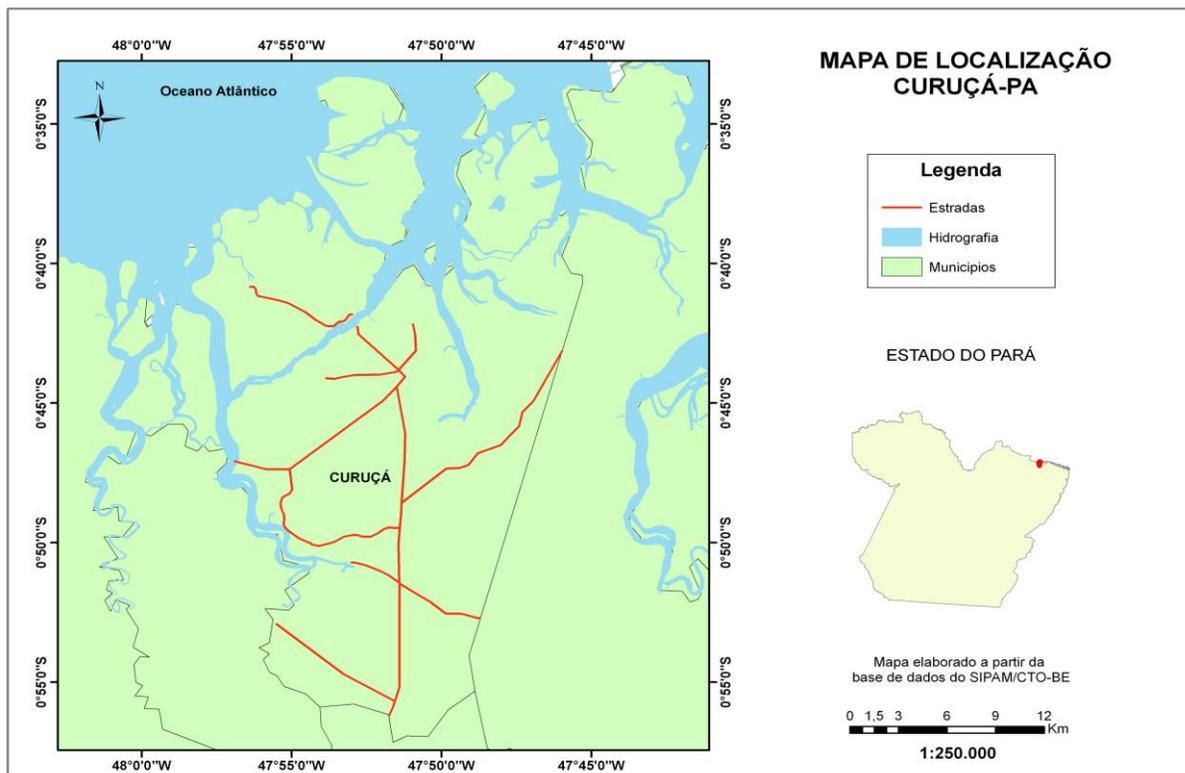


FIGURA 8 – Mapa de localização da área de estudo 2.

⁴ Cartografia, Hidrografia e Digitalização de Mapas (CHD); Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros (GEMC).

3.1.2.2- Aspectos Naturais

O município apresenta geologia baseada em sedimentos oriundos do Grupo Barreiras com idade Terciária, principal constituinte de terras mais internas. A zona litorânea é formada por sedimentos inconsolidados datados do Quaternário atual e subatual. Os resultados desta estrutura são ambientes morfologicamente pobres, incluindo planícies de inundação, terraços e esporádicos restos de tabuleiros inseridos em duas unidades morfoestruturais do relevo regional: Planalto Rebaixado da Amazônia (da zona Bragantina) e Litoral de "Rias" (Pereira, 2006).

Quanto à hidrografia, um dos rios mais importantes do município é o Mocajuba, formado pelo igarapé Pimenta e outros tributários, que atua a oeste da região como fronteira natural com a cidade de São Caetano de Odivelas. Este rio corre em direção nordeste onde forma meandros e depois segue para o norte até desembocar no Atlântico.

O rio Curuçá é o segundo corpo hídrico de maior importância, sendo a sede municipal banhada pelo seu afluente da margem esquerda (rio Baunilha). Outro curso relevante é o igarapé Araquaim, que parte da montante de um povoado homônimo e recebe, pela margem esquerda, o igarapé Cachoeira, dirigindo-se a noroeste, onde deságua numa das reentrâncias da baía de Curuçá. Na porção meridional do município, destaca-se o rio Braço Esquerdo do Marapanim, limitando Curuçá com o município de Castanhal (Pereira, 2006).

A cobertura florestal é composta basicamente por matas secundárias em virtude do desmatamento provocado pela expansão agrícola, principalmente de subsistência. Próximo à região litorânea, encontramos áreas alagadas com vegetação halófitas característica (manguezais ou floresta de mangue) que se estende por cerca de 116 km². Entre as espécies dominantes estão a *Rhizophora mangle*, seguida por *Avicennia germinans* em áreas topograficamente mais elevadas, e em pequena quantidade por *Laguncularia racemosa*. No estuário inferior, em áreas de recém acumulação de sedimento, são encontradas, em formas de manchas, 3 km² de marismas (*Spartina* spp.) (Pereira et al., 2007).

3.1.2.3- Descrição dos Pontos de Amostragem

Para a região de Curuçá, foram definidos três pontos de coleta situados às margens dos rios: Baunilha, próximo à sede municipal; Mocajuba, que banha a localidade de Murujá; e na via de acesso que liga as vilas de Candeuca e Agacaba. A campanha foi realizada no dia 15/09/2008 e teve 12 h de duração. As características dos pontos são descritas a seguir:

O ponto 1 engloba três subáreas (1A, 1B e 1C) localizadas ao longo do rio Baunilha, afluente à margem esquerda do rio Curuçá. O ponto 1A (coordenadas: 0°43'45.7"S 47°50'50.2"W às 9:41 hs) corresponde a um campo inundado dominado por *Avicennia*, cuja altura média das árvores está em torno de 7 m. A água exibia uma coloração esverdeada com valores de salinidade por volta de 30.

No ponto 1B (coordenadas: 0°43'59"S 47°50'59"W às 10:00 hs) além de *Avicennia*, foram encontradas algumas árvores de *Rhizophora*, ambas de médio a grande porte com altura média de 8 m. O sedimento foi classificado como lamoso e a salinidade intersticial chegou a 27.

O ponto 1C (coordenadas: 0°43'36.7"S 47°50'43"W às 10:30 hs) também apresentou vegetação de médio a grande porte, com predomínio de *Avicennia*. A salinidade da água intersticial ficou por volta de 30.

O ponto 2 (coordenadas: 0°47'03.9"S 47°56'58.6"W às 11:24 hs) situa-se na localidade de Murujá à margem direita do rio Mocajuba, a vegetação encontrada foi manguezal de médio porte (8 m), possuindo *Avicennia* e *Rhizophora*. A margem esquerda era colonizada por espécies de mangue com altura maior (cerca de 20 m). A água apresentava turbidez elevada (bastante sólidos em suspensão) e com salinidade de 29. O sedimento era lamoso.

O ponto 3 (coordenadas: 0°49'41.4"S 47°54'59.1"W às 12:17 hs) corresponde às margens de um pequeno córrego que corta a estrada para Agacaba, onde ocorre uma mistura de espécies de várzea e terra firme com o predomínio de *Arecaceae* (palmeiras). A salinidade medida foi de 0.

3.1.3- Mosqueiro

3.1.3.1- Localização

A ilha do Mosqueiro integra a região metropolitana de Belém e está situada na margem direita do estuário Guajará entre as coordenadas $1^{\circ}4'11''$ a $1^{\circ}13'42''$ S e $48^{\circ}19'20''$ a $48^{\circ}29'14''$ W, no nordeste paraense englobando uma superfície de 220 km^2 aproximadamente, com altitudes na média de 15 m com relação ao nível do mar. O clima é quente e úmido apresentando temperaturas em torno $25,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ com mínima de $21,9$ e máxima $31,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A região possui uma condição local de elevada umidade relativa do ar (84%) com precipitações atingindo 2.900 mm . O período mais chuvoso está entre os meses de março a maio e o de menor intensidade, de outubro a novembro (Sales, 2005).

A área é coberta pela órbita/ponto 223/61 do sensor ETM⁺ do satélite Landsat7 (Figura 9).

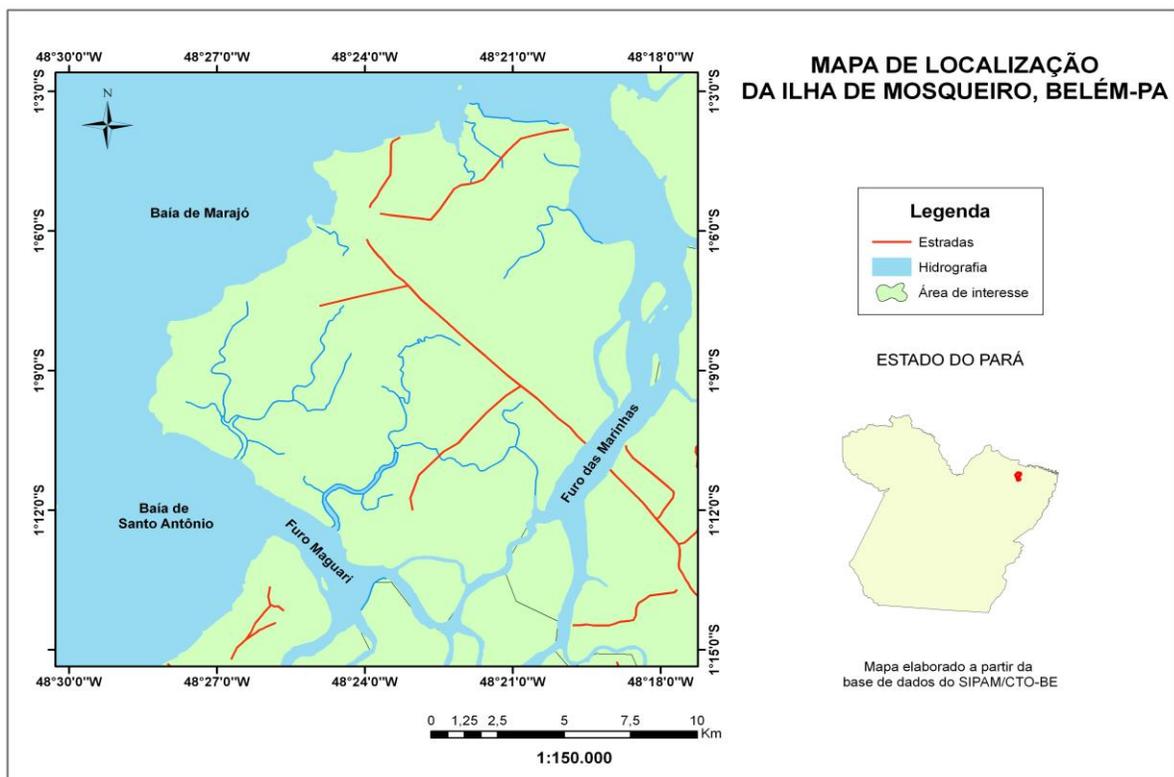


FIGURA 9 – Mapa de Localização da área de estudo 3.

3.1.3.2- Aspectos Naturais

Segundo Venturieri et al. (1998), os solos desta região são de baixa fertilidade e estão inseridos em duas seções fisiológicas distintas: Terraços Aluviais Pleistocênicos e Planície Aluvial de Inundação Holocênica. Encontram-se divididos em classes como Latossolo Amarelo textura média, Concrecionário Laterítico textura argilosa, Areia Quartzosa e Podzólico Vermelho-Amarelo textura argilosa, Podzol Hidromórfico textura arenosa, Gley Pouco Húmico textura argilosa e Hidromórficos Indiscriminados.

A Ilha do Mosqueiro é banhada: ao sul e sudeste, pelo Furo do Maguari; a sudoeste e noroeste pelas águas da Baía do Guajará; a norte, nordeste e parte do sudeste pelo Furo das Marinhas. A rede de drenagem da ilha tem como principais rios: Murubira, Pratiquera e Mari-Mari (Sales, 2005). A vegetação é caracterizada pela Floresta Ombrófila Densa, onde dois subtipos apresentam limites coincidentes com as feições fisiográficas encontradas na área, os terraços pleistocênicos são dominados pelas matas de terra firme, enquanto nas planícies aluviais, ocorrem as florestas de várzea-de-maré. E em locais de maior influência salina, há ocupação por manguezais. As principais espécies encontradas são: tamanqueiro (*Alchornea glandulosa* Endl. & Poeppig.), mangue vermelho (*Rhizophora mangle*), siriúba (*Avicennia germinans*), mangerana (*Conocarpus erectus* L.) e a mague-rama (*Laguncularia racemosa*) (Venturieri et al., 1998).

3.1.3.3- Descrição dos Pontos de Amostragem

Para a região de Mosqueiro, foram definidos quatro pontos de coleta localizados ao longo da costa. A campanha foi realizada no dia 16/09/2008 e teve aproximadamente 8 h de duração. A descrição dos pontos é apresentada a seguir.

No ponto 1 foram identificadas algumas árvores espaçadas de *Rhizophora* e *Avicennia* de baixa estatura (< 4 m) na zona de intermaré arenosa, que dividiam o substrato com espécies herbáceas. A salinidade chegou a 4.

O ponto 2 (coordenadas: 01°04'8.94"S 48°22'52.1"W. às 13:54 hs) corresponde a praia do Paraíso, ambiente de sedimentação arenosa onde predomina espécies de várzea-de-maré e terra firme. A salinidade medida na água foi de 5. Os pontos 3 e 4, localizados respectivamente na Beira-Mar e na Vila, apresentaram características semelhantes ao ponto 2.

3.2- PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Como materiais selecionados para o processamento digital de imagens citam-se:

- Microcomputador pessoal com processador Intel Core 2 Duo, 1 Gb de memória RAM, 120 Gb de disco rígido, unidade gravadora e leitora de CD/DVD;
- O software utilizado foi o Spring 4.3.3, composto por mais dois aplicativos (Scarta e Impima), obtido pelo site do INPE (<http://www.inpe.br/>);
- Imagens de Sistemas Sensores disponíveis gratuitamente pela Universidade de Maryland no site <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml> da GLCF – *Global Land Cover Facility* e através do LAIT – Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido.

As principais características das imagens utilizadas neste trabalho estão expostas na tabela

4.

TABELA 4 – Informações das imagens utilizadas.

Sensor	Cena	Bandas	Ano	Resolução Espacial	Formato	Fonte
Landsat7 ETM ⁺	223/60	3, 4 e 5	2001	28,5 m	GeoTIFF	GLCF
Landsat7 ETM ⁺	223/61	3, 4 e 5	2001	28,5 m	GeoTIFF	GLCF
Landsat5 TM	222/61	3, 4 e 5	1999	28,5 m	GeoTIFF	LAIT

Os elementos cartográficos adotados foram: Sistema de Referência – Datum Geocêntrico WGS84 com Elipsóide GRS80; Sistema de Projeção UTM (Universal Transverso de Mercator), Fuso 23S e Meridiano Central 45° W de Greenwich.

O primeiro passo foi a criação do banco de dados no ambiente Spring, onde as imagens e informações referentes ao processamento ficam armazenadas em arquivos específicos. Na fase seguinte determinou-se 3 projetos distintos, adotando as coordenadas geográficas correspondentes para cada área (Bragança, Curuçá e Mosqueiro). As imagens utilizadas no

estudo já foram adquiridas com algum tipo de pré-processamento, logo os procedimentos seguintes estão relacionados ao processamento digital propriamente dito.

As bandas inseridas foram agrupadas sob uma composição colorida (5R4G3B), definida por Souza Filho (2000) como a melhor para análise de manguezais. A partir daí iniciou-se diversos testes com o segmentador (método crescimento de regiões), adotando valores de similaridade entre 10 e 8, com área de pixels variando entre 30 e 10. Os resultados mais satisfatórios para análise das regiões de Curuçá e Bragança foram obtidos adotando 10 para similaridade e 12 para área de pixels, enquanto que em Mosqueiro os valores adotados foram de 8 e 10.

Com base em diferentes elementos de interpretação visual (cor, forma, tamanho, textura), padrões de reflectância obtidos na imagem por meio da ferramenta Modelo de Mistura presente no programa e mapas já desenvolvidos (Souza Filho, 2000), as seguintes classes temáticas foram criadas: Manguezal, Manguezal em recuperação, Várzea-de-maré, Solo Exposto/Vegetação Herbácea, Terra Firme, Bancos de Areia, Bancos de Areia Submersos, Zona de Transição e Áreas Alagadas.

Utilizando a classificação não-supervisionada – ISOSEG com limiar de aceitação (LA) 75% - na imagem já segmentada, o Spring gerou uma média de 50 classes para cada região de estudo. Na seqüência ocorreu o agrupamento dessas áreas, obedecendo aos temas pré-definidos. Por meio do aplicativo Scarta, mapas temáticos preliminares foram confeccionados. Após as campanhas, os pontos coletados serviram como amostragem para a realização de uma nova classificação, baseada em método supervisionado – *Bhattacharya* mantendo o LA em 75%.

3.3- TRABALHO DE CAMPO

Para a coleta de campo foram usados os seguintes instrumentos:

- Aparelho de GPS (*Global Position System*) adotando sistema de referência e projeção compatível com as imagens utilizadas;
- Mapa temático preliminar e de localização;
- Espectrofotômetro Spectrolino *Gretag MacBeath*, acompanhado de computador portátil;
- Refratometro (para a medição da salinidade da água intersticial).

As atividades realizadas em campo nas três regiões de estudo (Bragança, Curuçá e Mosqueiro) consistiram em uma descritiva caracterização das principais unidades de vegetação, desenvolvida com a determinação das típicas espécies vegetais em cada unidade por meio de: medidas com GPS, análise espectral da vegetação e registro da salinidade local. As visitas foram marcadas no mês de setembro, correspondente a aquisição das imagens, respeitando os aspectos climáticos característicos da estação, neste caso o período seco.

Os locais para coleta das amostras de folhas foram previamente selecionados tendo como base os resultados do processamento das imagens de satélite (mapa preliminar). Para cada unidade de vegetação foram delimitadas 3 parcelas de 30 x 30 m de acordo com o gradiente topográfico e em estudos prévios realizados por Cohen & Lara (2003), Lara & Cohen (2006), Medina et al. (2001) e Menezes et al. (2003).

Nesses estudos foram identificadas correlações entre os gradientes topográficos e a estrutura dos manguezais do chamado Bosque de *Avicennia*, onde as zonas topograficamente mais baixas são dominadas por árvores de *Rhizophora* enquanto que as áreas colonizadas por *Avicennia* dominam setores mais altos do terreno. A seleção das parcelas dimensionadas em 30 x 30 m refletem o tamanho dos pixels presente nas imagens de satélite (Landsat 5 e 7) empregadas nesse estudo, onde o objetivo maior do trabalho diz respeito à representatividade das características espectrais das unidades de vegetação em estudo identificadas nas imagens orbitais.

Em cada compartimento foi confirmada a salinidade da água intersticial (Cohen & Lara, 2003) esperada para cada área em estudo. A salinidade da água intersticial foi obtida por meio de um refratômetro (ou salinômetro), instrumento que registra a concentração de soluções aquosas através da medição de seu respectivo índice refrativo. São formados no aparelho dois campos de cores diferentes extremamente contrastantes, divididos por uma forte linha de demarcação nos intervalos de 0 a 100.

Medição da Reflectância

A amostragem de folhas de cada árvore, dando preferência para folhas expostas à luz solar, foram selecionadas seguindo o critério de representatividade de cada árvore para com o conjunto vegetacional analisado. Desta forma, foram evitadas árvores que apresentassem, 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. Esse material era acondicionado em sacos plásticos e transportado em caixas de gelo, já que as medidas de reflectância em folhas devem ser obtidas em no máximo 8 horas após a sua amostragem. Período em que as mesmas ainda mantêm suas características espectrais (Ponzoni & Gonsalves, 1997).

De posse das amostras, as medidas de reflectância foram realizadas por meio de um espectrofotômetro portátil (*Spectrolino GretagMacbeth*), que consiste em um aparelho capaz de emitir um feixe de radiação sobre a superfície da folha e captar a energia refletida pela mesma, gerando uma curva espectral característica nos intervalos do visível (380 a 690 nm) e parte do infravermelho próximo (700 a 730 nm). Além de gráficos, os dados registrados estão disponibilizados em forma de tabelas contendo a reflectância da folha coletada.

Os valores de reflectância obtidos em cada espécie vegetal foram inseridos em planilhas do Excel e divididos de acordo com o intervalo espectral: azul (400 a 490 nm), verde (500 a 590 nm) e vermelho (600 a 690 nm). Os resultados obtidos no infravermelho próximo (700 a 730) foram desconsiderados neste processo, uma vez que o espectrofotômetro utilizado não engloba todos os comprimentos de onda presentes neste intervalo (700 – 1100 nm). Ainda no Excel, são extraídos parâmetros como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da reflectância para cada intervalo.

Análise Estatística

Baseado na pesquisa de Mochel & Ponzoni (2007) a definição do número mínimo de amostras por ponto, para a caracterização espectral em cada área de estudo, 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 refletância para uma determinada faixa de comprimento de onda;
- d = mínima diferença a ser corrigida no caso do trabalho de Mochel & Ponzoni (2007) foi de 10%.

Com base na análise do comportamento espectral padrão exibido pelas folhas verdes sadias, a faixa escolhida para a determinação do coeficiente de variação e, conseqüentemente, do número mínimo de amostras compreendeu a média obtida entre 500 e 590 nm, correspondente a cor verde. Este intervalo apresenta os maiores valores de refletância considerando a amplitude estudada (400 a 690 nm).

Além da caracterização espectral das amostras, considerou-se uma relação entre a estatura das plantas e o valor de refletância registrada nas folhas. Os coeficientes de correlação R (Pearson) e determinação (R^2), assim como a equação das linhas de tendência, foram obtidos em uma análise de Regressão Linear simples, utilizando as ferramentas do *software* Bioestat 5.0, obtido pelo site do Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (<http://www.mamiraua.org.br/>).

Considerando Mochel & Ponzoni (2007), somente o número de amostras coletadas para a área de Curuçá e Mosqueiro foi estatisticamente satisfatório para a análise espectral empregada nas folhas. Em Bragança, o número de amostras obtidas nos pontos: 1, 2, 3 e 7 não apresentaram resultados estatisticamente satisfatórios devido ao grande número de locais de amostragem selecionados, o que resultou em um número próximo do mínimo exigido. Por outro lado, por se tratar de uma área de manguezal e vegetações associadas com baixa diversidade de espécies, sendo alguns pontos monoespecíficos (Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3 e Ponto 7), juntamente com o baixo desvio padrão dos índices de refletância no intervalo de comprimento de onda analisado (500 – 590 nm), o número de amostras relativamente reduzido nesses locais podem ser considerados representativos para ao conjunto de vegetações analisadas.

No intuito de atenuar a diferença entre o valor de amostras estatisticamente necessárias das folhas coletadas no campo, optou-se por considerar o número total de amostras coletadas na área de Bragança, de forma que cada espécie apresentará um N amostral maior. Em vista disso, as

análises dos gráficos a respeito do comportamento espectral nestes locais serão realizadas por espécie e não por pontos de coleta.

Com base na metodologia empregada por Mochel & Ponzoni (2007), o resultado para o número mínimo (n) de folhas em cada ponto de amostragem na região de Curuçá foi de 30 folhas para *Avicennia* e 8 para *Rhizophora*. Um conjunto de 106 amostras foi coletado na região de Curuçá, distribuídas em dois pontos de coleta, sendo o ponto 1 subdividido em três subáreas (1A, 1B, 1C). Neste local, duas espécies diferentes passaram pela análise espectral: *Avicennia* (77 folhas) e *Rhizophora* (29 folhas).

No litoral da Ilha do Mosqueiro devido ao baixo desvio padrão dos valores de refletância das amostras, a análise estatística revelou a necessidade de um número mínimo de apenas 5 folhas para *Avicennia* e 2 para *Rhizophora*, onde foram coletadas 24 amostras, sendo 12 folhas tanto para o gênero *Avicennia* quanto para o gênero *Rhizophora*.

Considerando a Península de Bragança o número mínimo de folhas para se obter uma análise estatística satisfatória foi de 27 (*Avicennia*), 20 (*Rhizophora*), 23 (Cyperaceae), 12 (Poaceae), 11 (*Sesuvium*), 20 (Rubiaceae), 8 (*Anacardium*), 4 (Chysobalanaceae), 4 (Arecaceae) e 4 (Caesalpiniaceae). Nessa região foram coletadas 191 amostras, distribuídas em oito pontos. No total, a análise espectral envolveu dez espécies diferentes: *Avicennia* (27 folhas), *Rhizophora* (29 folhas), Cyperaceae (23 folhas), Poaceae (14 folhas), *Sesuvium* (13 folhas), Rubiaceae (20 folhas), *Anacardium* (10 folhas), Chysobalanaceae (15 folhas), Arecaceae (20 folhas) e Caesalpiniaceae (20 folhas).

4- RESULTADOS E DISCURSÕES

4.1- ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS ESPÉCIES VEGETAIS ESTUDADAS NA REGIÃO DE BRAGANÇA

Avicennia

A curva apresenta o comportamento padrão correspondente à vegetação, porém demonstra diferenças quanto à intensidade de energia refletida. Entre 380 e 490 nm, o gênero *Avicennia* apresenta valores de reflectância muito baixos, devido à absorção da energia radiante pelos pigmentos fotossintetizantes. Dentro da faixa do visível, a partir de 490 nm, a *Avicennia* alcançou valores mais altos de reflectância em torno de 10%. No infravermelho próximo (700 nm em diante), esse gênero registra um pico de aproximadamente 50% (Figura 10).

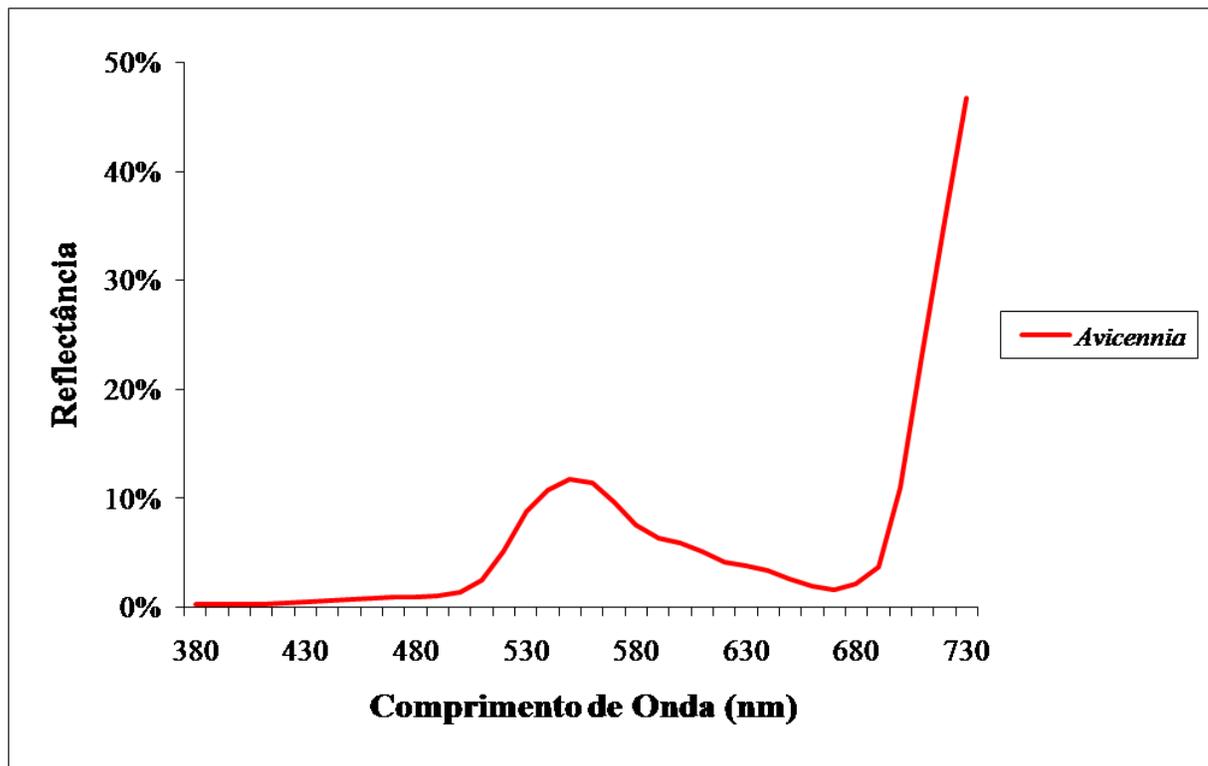


FIGURA 10 – Comportamento espectral médio do gênero *Avicennia*.

Rhizophora

A média dos valores de reflectância para o gênero *Rhizophora* indica uma baixa reflectância no intervalo do visível, com valor máximo de 7%, ascendo no início do infravermelho chegando a 40% (Figura 11).

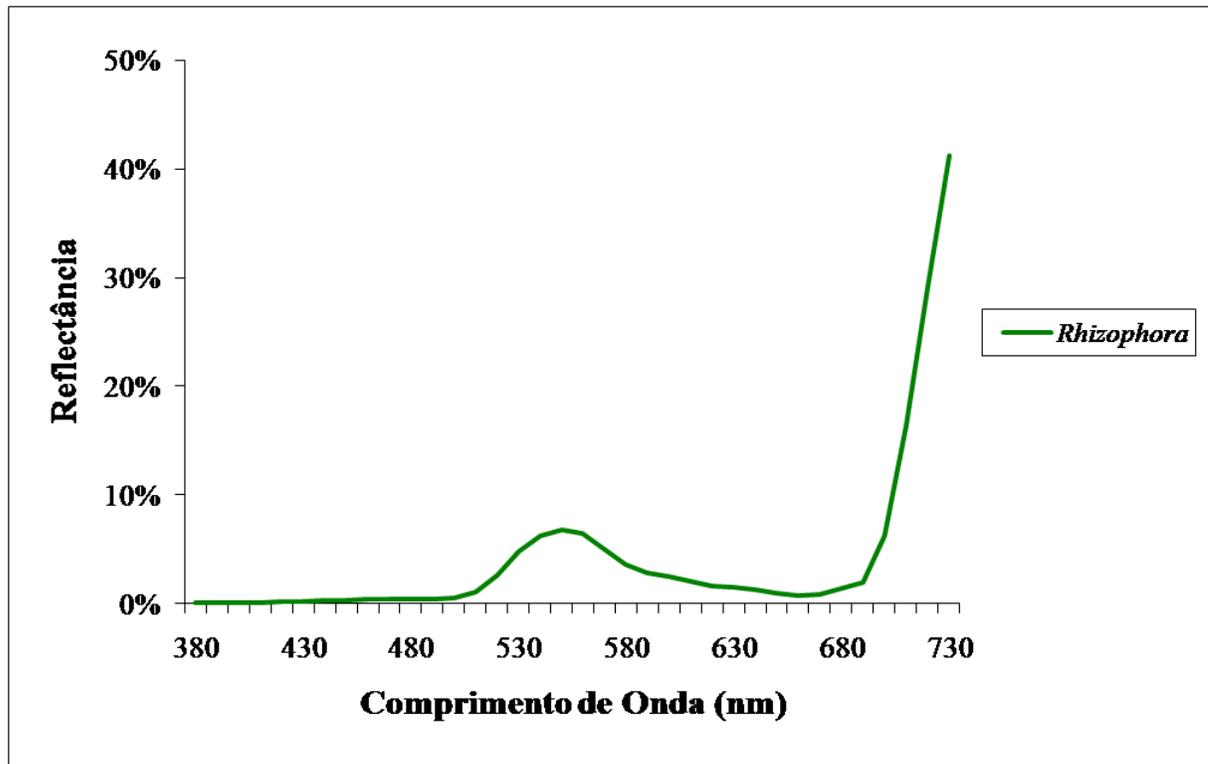


FIGURA 11 – Comportamento espectral médio do gênero *Rhizophora*.

Poaceae

A média dos valores de reflectância para a família Poaceae indica que até o comprimento de onda de 490 nm a quantidade de energia refletida não ultrapassa 3%. No pico máximo do visível (550 nm) a Poaceae registra 15% de reflectância, enquanto que no infravermelho (730 nm) esse valor atinge aproximadamente 47% (Figura 12).

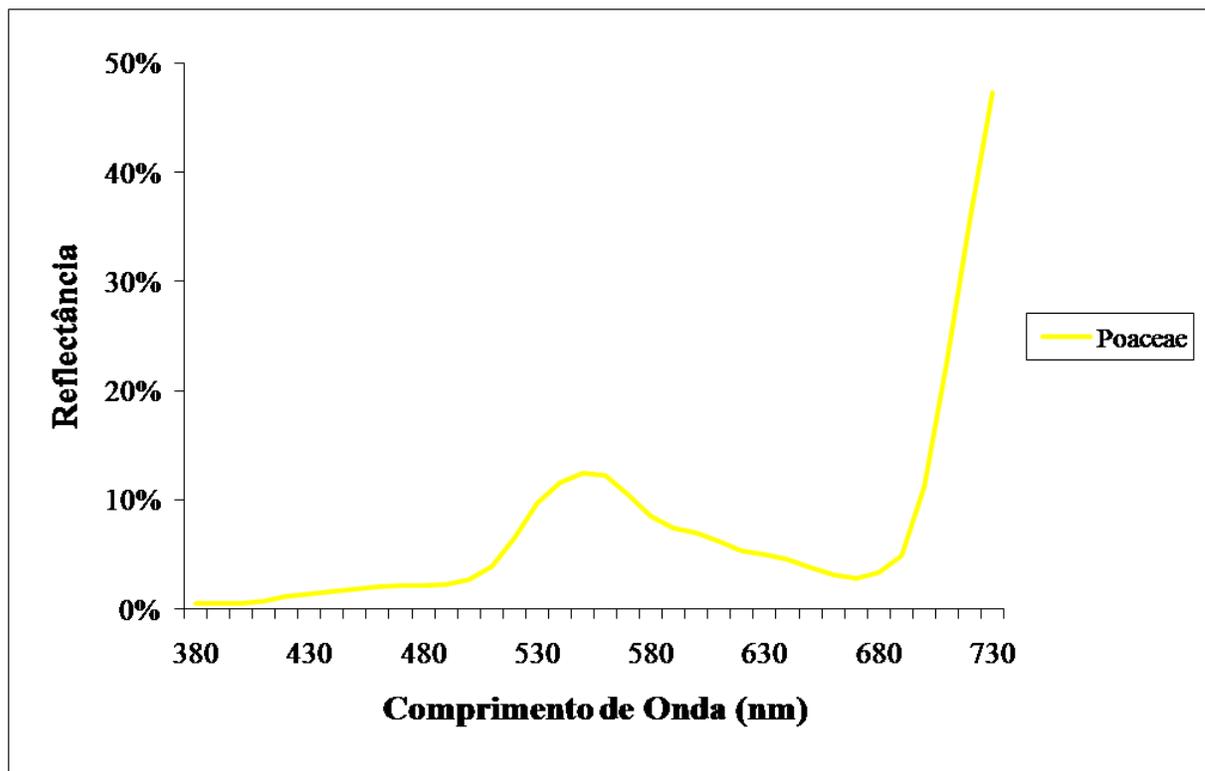


FIGURA 12 – Comportamento espectral médio da família Poaceae.

Cyperaceae

A média da reflectância presente nas amostras da Cyperaceae apresentou elevados índices de reflectância. A partir de 380 nm, o menor valor de reflectância registrado foi de aproximadamente 5%, subindo gradualmente até 10% (490 nm). Em 550 nm, a Cyperaceae atinge o máximo de 20% na região do visível. No intervalo do vermelho (600 a 690 nm), os valores permanecem relativamente altos, com o mínimo de reflectância em 10% (Figura 13).

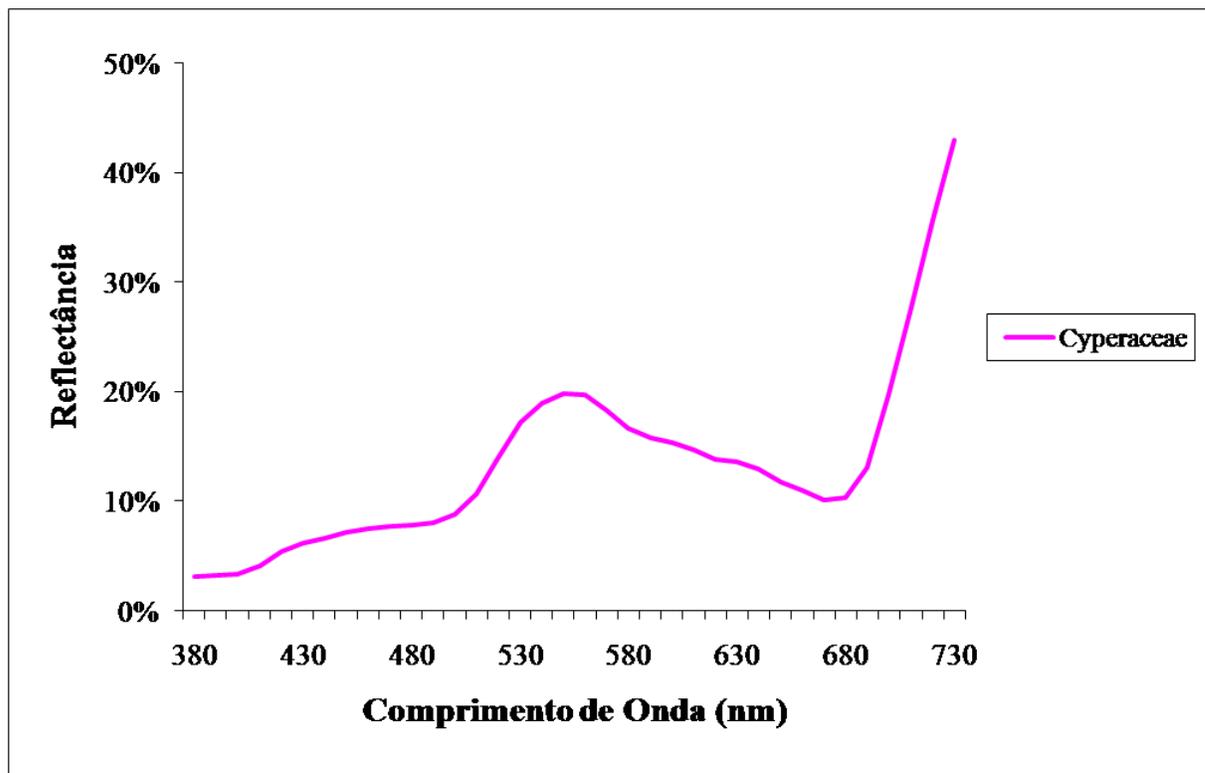


FIGURA 13 – Comportamento espectral médio da família Cyperaceae.

Sesuvium

O gráfico gerado pelas amostras do gênero *Sesuvium* indica uma leve elevação nos valores refletidos a partir de 410 nm até 500 nm (1-5%). Deste segmento em diante, a reflectância registrada é maior, atingindo um valor máximo de 10% em 550 nm. No infravermelho, o *Sesuvium* apresenta pico de 26% em 730 nm (Figura 14).

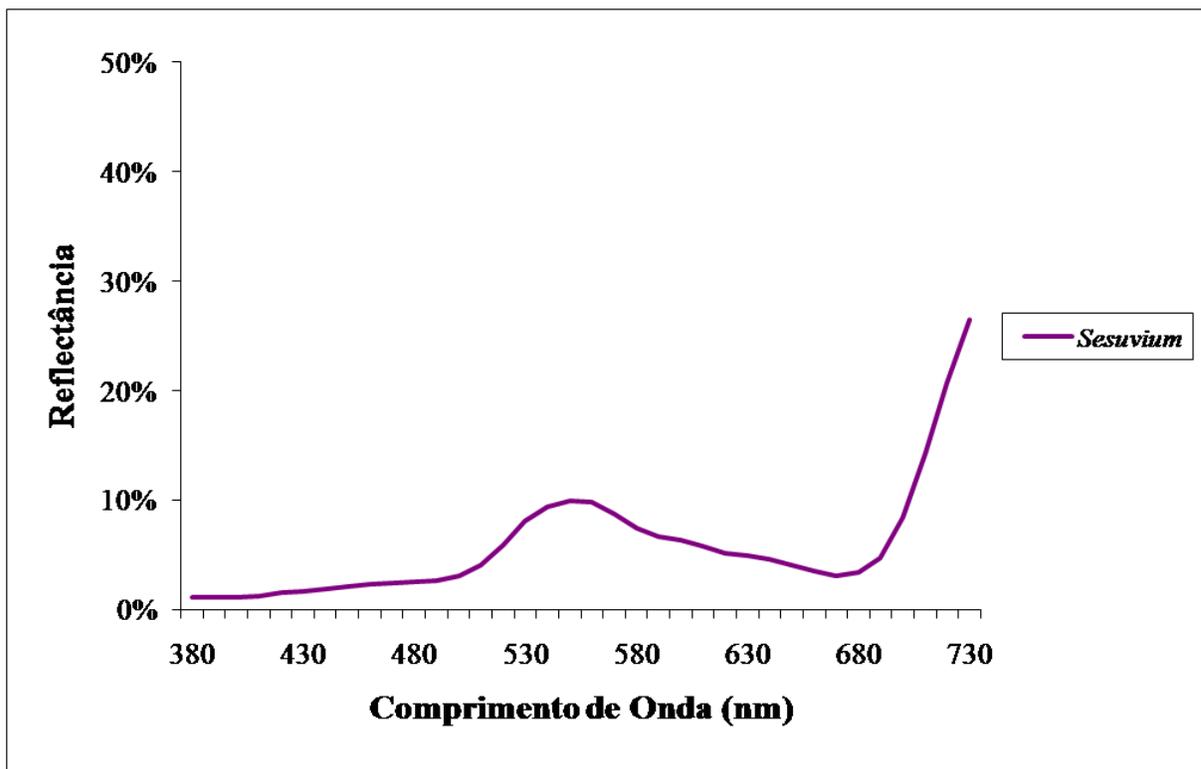


FIGURA 14 – Comportamento espectral médio do gênero *Sesuvium*.

Anacardium

A média da reflectância presente nas amostras de *Anacardium* indicou que este gênero apresenta valores baixos de reflectância, em torno de 2%, constantes até 500 nm. O máximo registrado no intervalo do visível foi de 15% entre os comprimentos de onda 550 e 560 nm. O valor médio medido no infravermelho ficou em 46% (Figura 15).

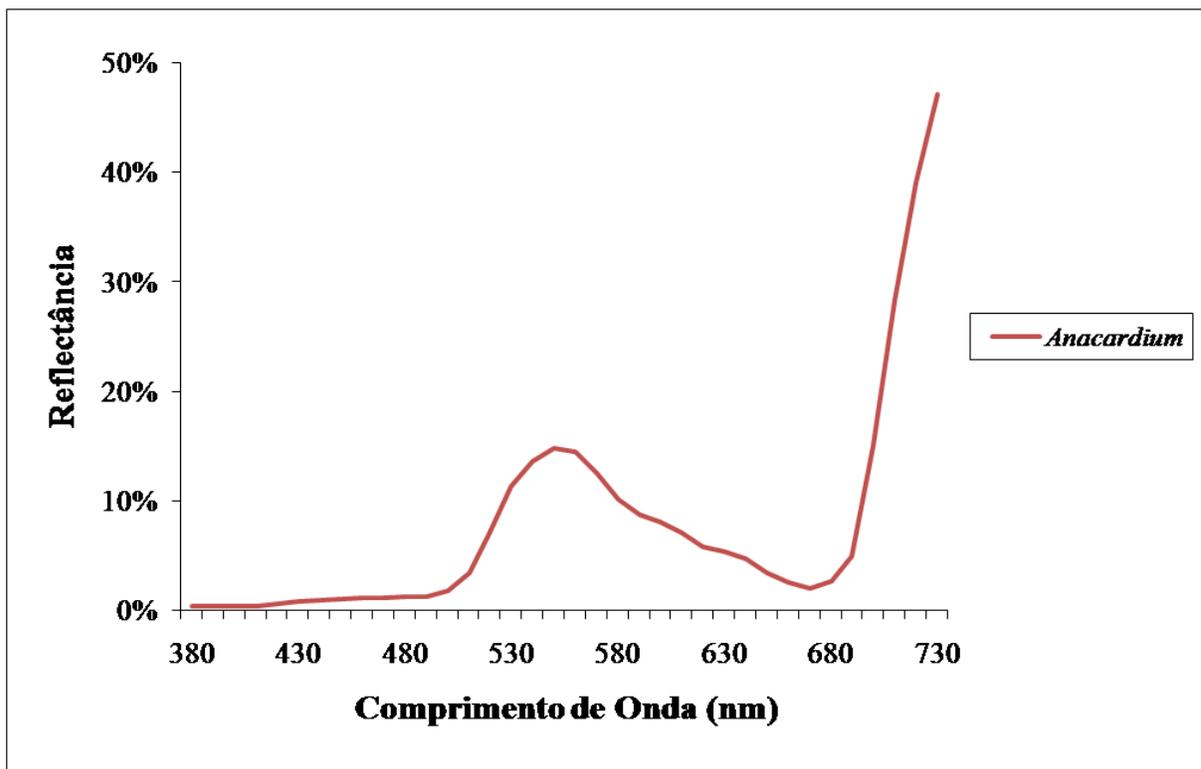


FIGURA 15 – Comportamento espectral médio do gênero *Anacardium*.

Chysobalanaceae

O gráfico gerado pelas amostras de Chysobalanaceae indica que os picos de reflectância nesta família atingiram 15 e 50% para a região do visível e infravermelho, respectivamente (Figura 16).

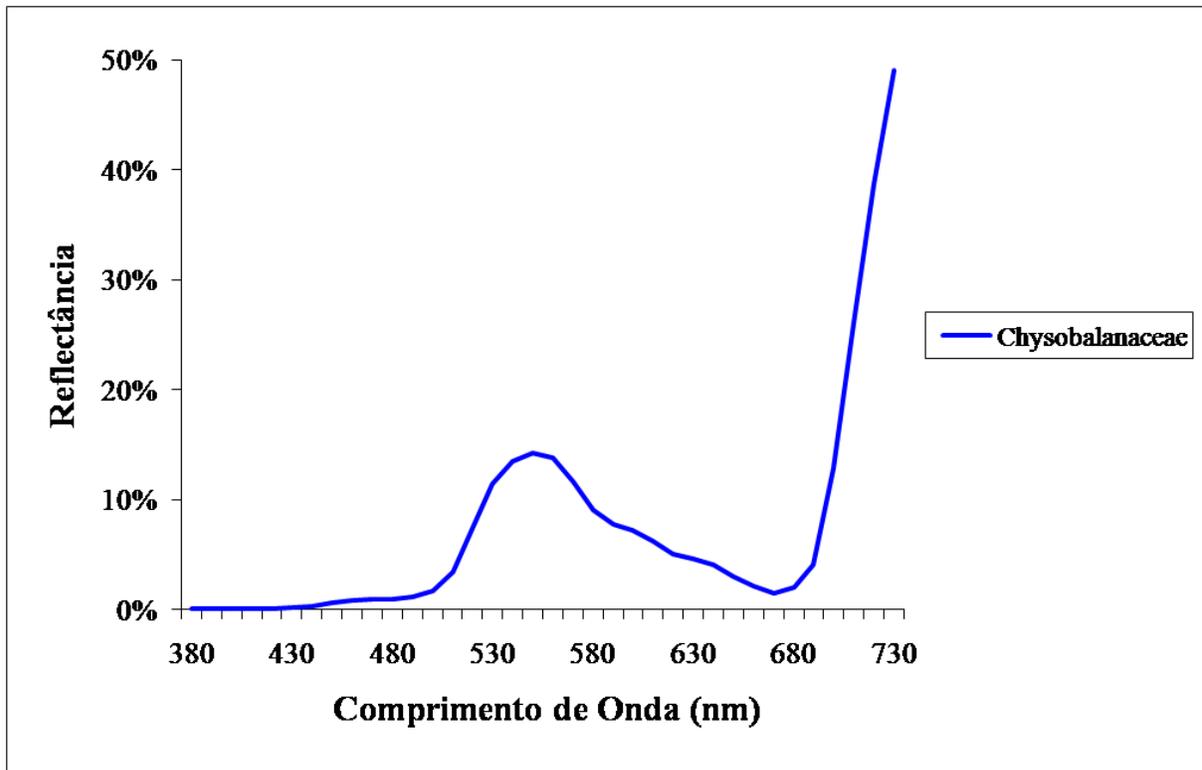


FIGURA 16 – Comportamento espectral médio da família Chysobalanaceae.

Areaceae

A reflectância medida nas amostras de Areaceae apresenta valores baixos entre 380 e 500 nm (em média 1%), o pico máximo atingido em 550 nm foi de 8%. No infravermelho o maior valor registrado foi 39% (Figura 17).

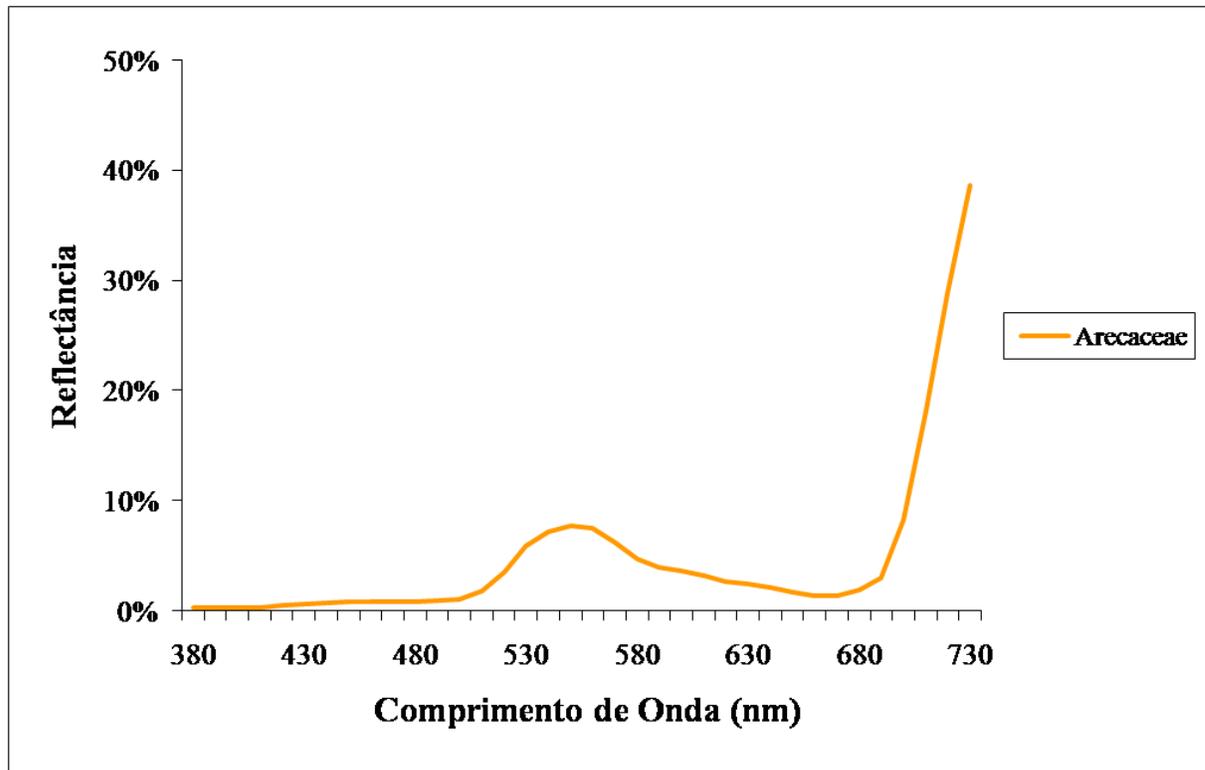


FIGURA 17 – Comportamento espectral médio da família Areaceae.

Rubiaceae

A média da reflectância presente nas amostras de Rubiaceae indicou um leve aumento dos valores refletidos até atingir 4% em 500 nm. A partir deste segmento, o aumento da reflectância é mais evidente cominando com um pico máximo médio de 17% entre 550 e 560 nm. No infravermelho, o valor máximo obtido é de 47% (Figura 18).

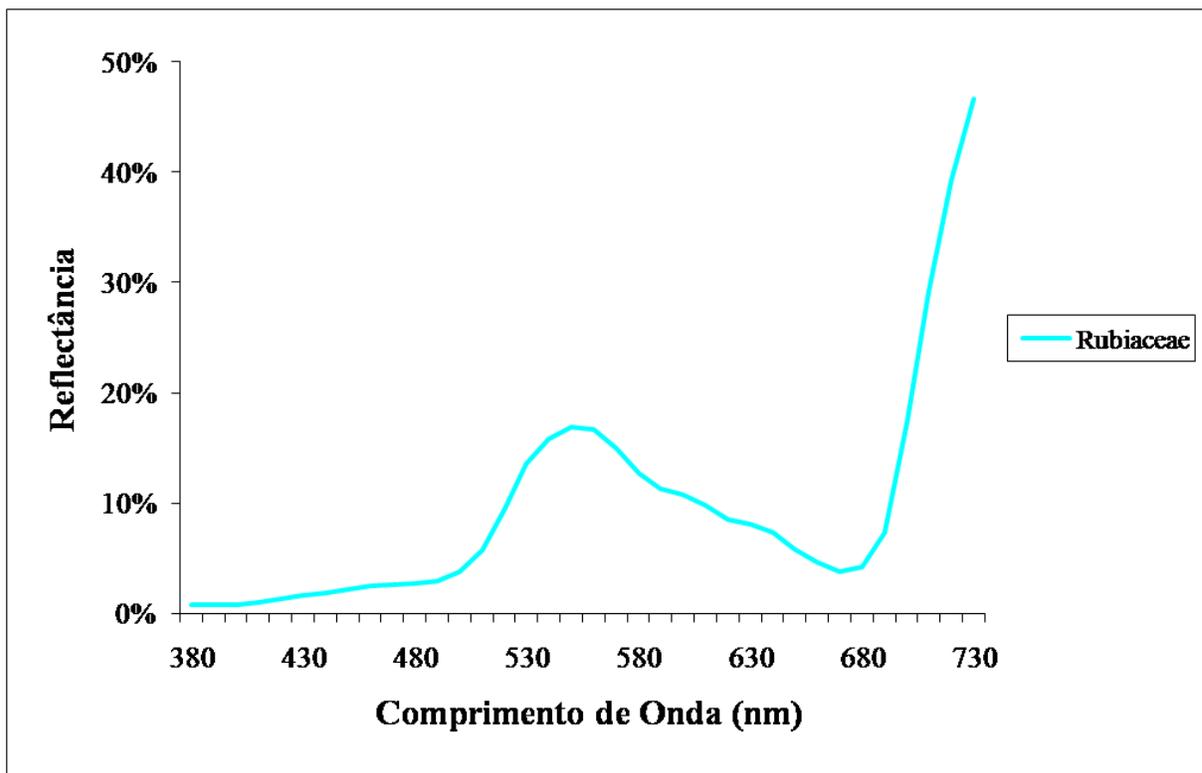


FIGURA 18 – Comportamento espectral médio da família Rubiaceae.

Caesalpiniaceae

O gráfico gerado pelas amostras de Caesalpiniaceae indica valores relativamente elevados de reflectância desde 380 nm até 500 nm (6% em média). O pico máximo em 550 nm atinge 21%, reduzindo até 7% em 680 nm (início do infravermelho). A partir desse segmento, os valores refletidos chegam até 50% em 730 nm (Figura 19).

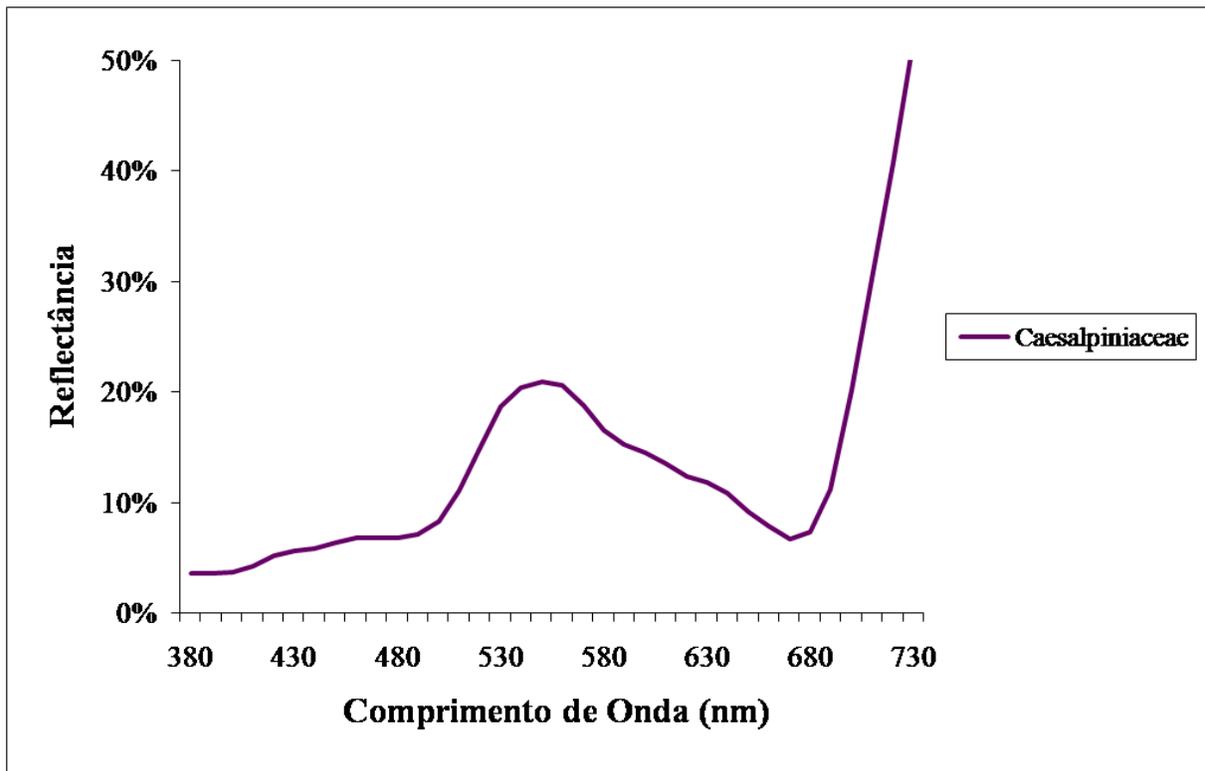


FIGURA 19 – Comportamento espectral médio da família Caesalpiniaceae.

Resposta Espectral nas Folhas de Mangue

Entre os gêneros de manguezal coletados, a *Avicennia* apresentou valores de reflectância maiores que a *Rhizophora*. Este resultado, também obtido por Mochel & Ponzoni (2007), explica as diferentes colorações que as folhas exibem. Sendo a *Avicennia* detentora de uma tonalidade verde mais clara, a reflectância (12%) no comprimento de onda correspondente a essa cor (500 – 590 nm) tende a ser alta (Figura 20).

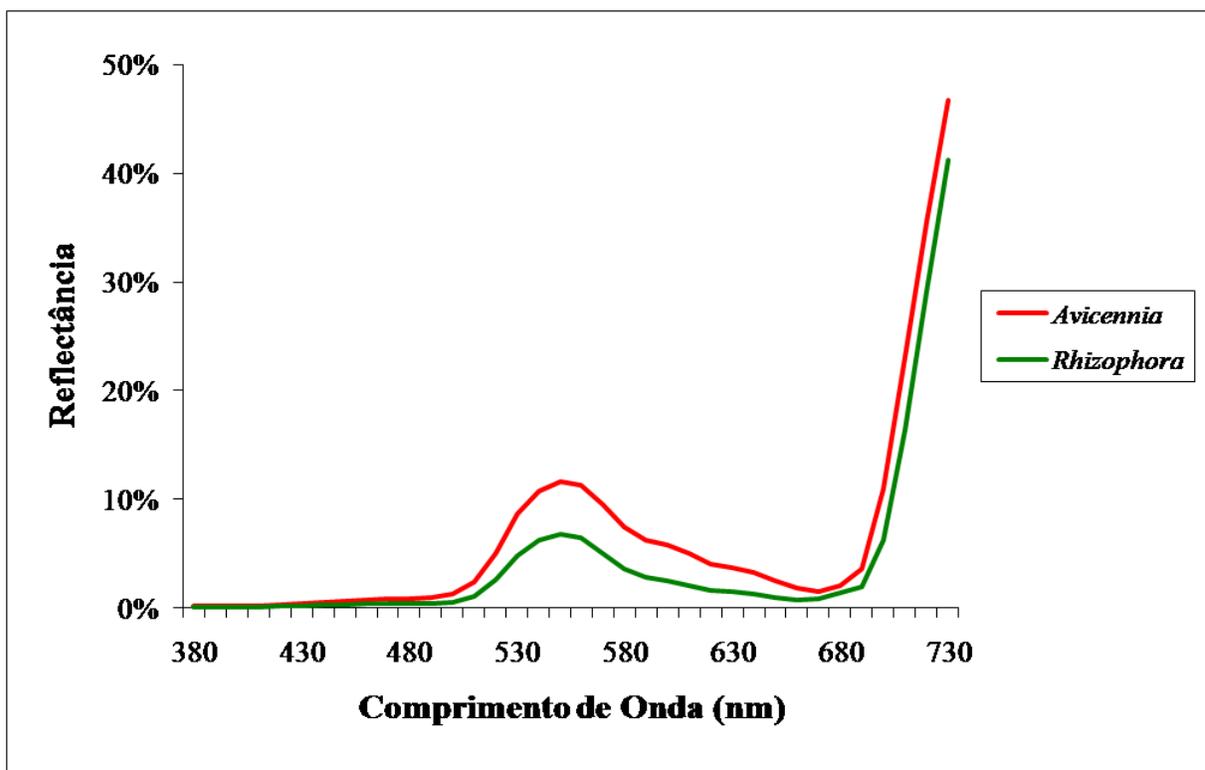


FIGURA 20 – Comparação entre o comportamento espectral médio das folhas em gêneros de Manguezal.

Comparação da Resposta Espectral

Em comparação com as demais espécies, os gêneros de manguezal apresentam baixos valores de reflectância, com a média máxima de 8% na faixa do visível, enquanto que as folhas de Caesalpiniaceae mostram valores de 21%. Por outro lado, os valores médios de reflectância (8%), na faixa do visível, obtidos para as folhas da Arecaceae (palmeiras que podem colonizar regiões de várzea-de-maré) estão muito próximos da média do gênero *Rhizophora*. Já o gênero *Avicennia* apresenta valores de reflectância bastante diferentes da vegetação de várzea-de-maré (Figura 21).

Segundo Ponzoni (2002) essas características espectrais podem ser percebidas nas imagens orbitais. Em geral, a tonalidade exibida pelas áreas de manguezal é mais escura, devido ao contato da vegetação com a água, o arranjo da copa das árvores e a diferença espectral entre suas folhas.

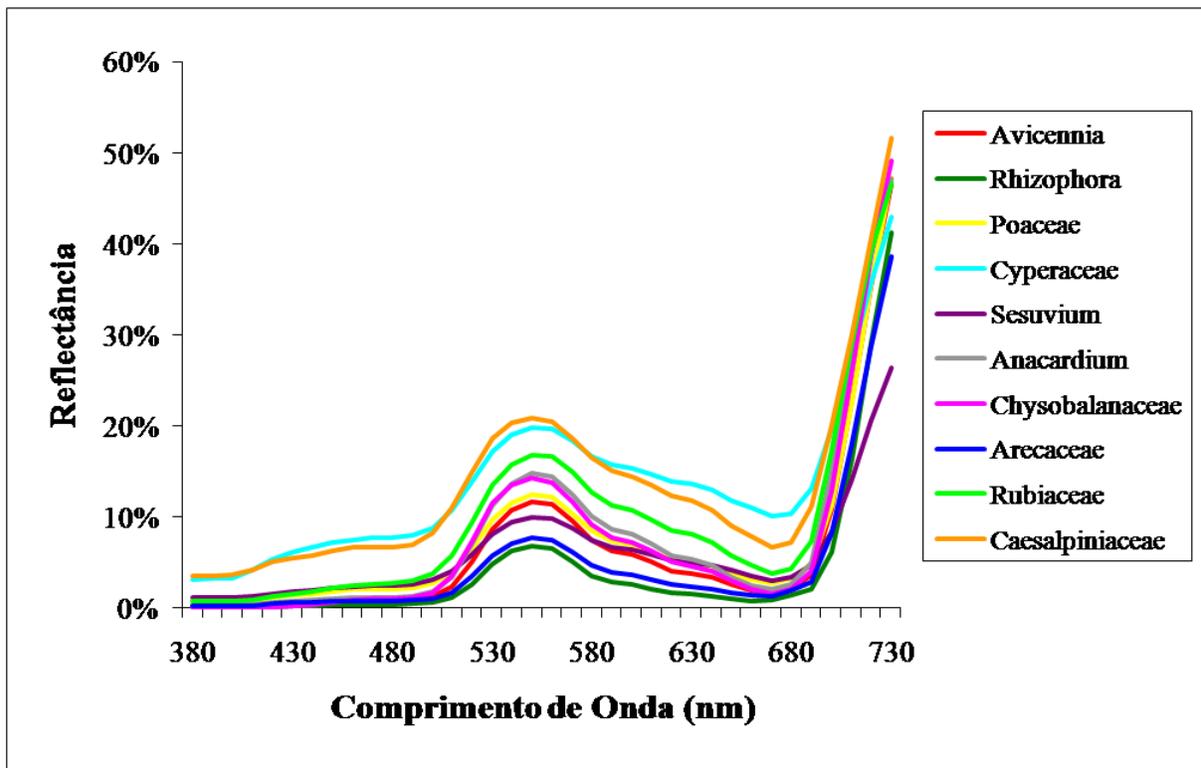


FIGURA 21 – Comparação entre o comportamento espectral médio das espécies coletadas em Bragança.

4.2- ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS ESPÉCIES VEGETAIS ESTUDADAS NA REGIÃO DE CURUÇÁ

Ponto 1B

Os dados de reflectância obtidos a partir das folhas de *Rhizophora* de baixa (<4 m), média (4-10 m) e alta estatura (>10m) estão restritos aos comprimentos de onda entre 380 e 730 nm. Até 500 nm, os valores de reflectância são baixos, pois não ultrapassam 1%. No intervalo correspondente a cor verde (500 a 600 nm) a *Rhizophora* de baixa estatura reflete mais energia que as de maior estatura, com um pico máximo (superior a 10%) em 550 nm. Após esse segmento, a reflectância sofre uma lenta redução, atingindo valores próximos a 0% em 660 nm.

No infravermelho próximo (a partir de 700 nm), tanto a *Rhizophora* de baixa quanto a de alta estatura apresentam uma forte elevação nos valores de reflectância, com uma sutil diferença em favor da *Rhizophora* de baixa estatura (cerca de 4%) (Figura 22).

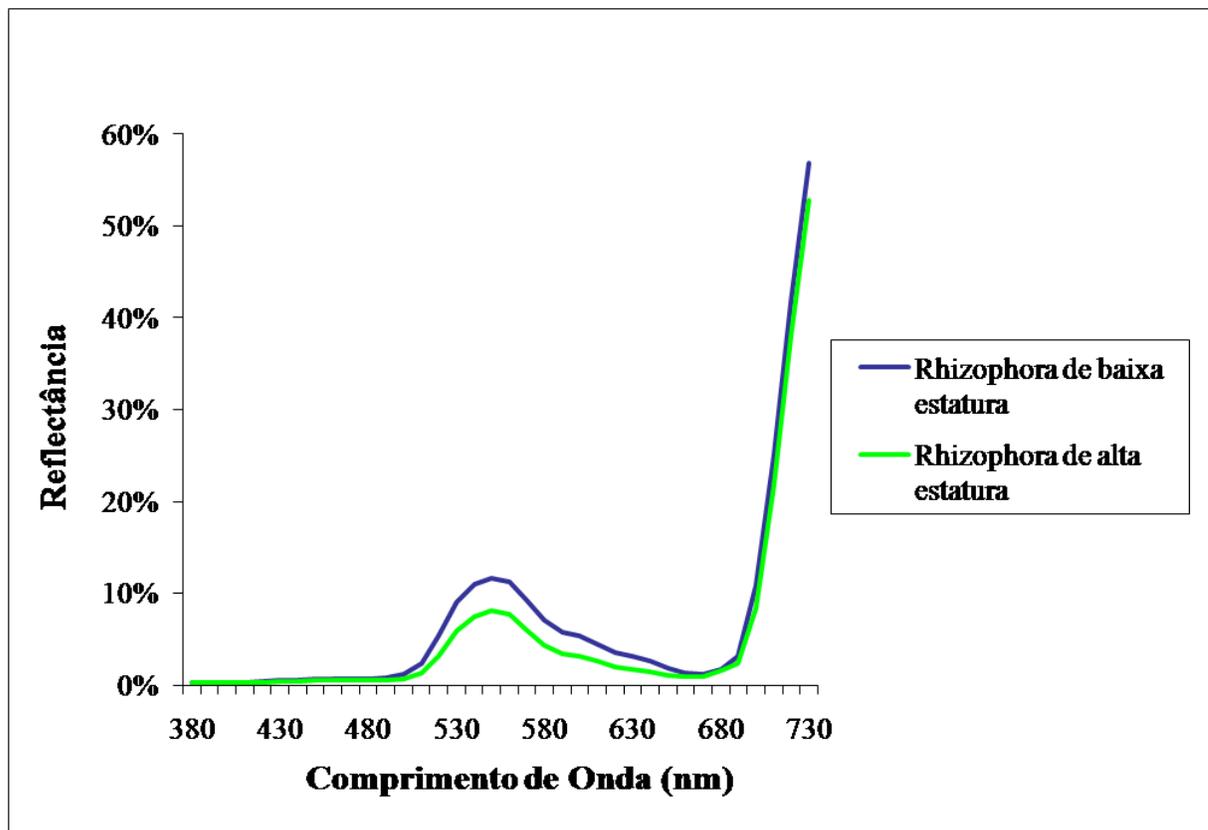


FIGURA 22 – Comportamento espectral médio de *Rhizophora* de baixa e alta estatura do ponto 1B.

Ponto 1C

Na faixa do comprimento de onda obtido, os valores médios de reflectância das folhas de *Avicennia* de árvores com baixa estatura (< 5 m) aumentam gradualmente a partir de 490 nm atingindo um máximo de aproximadamente 14% em 550 nm. Após esse segmento, os valores sofrem uma gradual redução até 1% em torno de 670 nm. Na faixa do infravermelho próximo, a partir de 700 nm, os valores de reflectância aumentam até 42% em 730 nm (Figura 23).

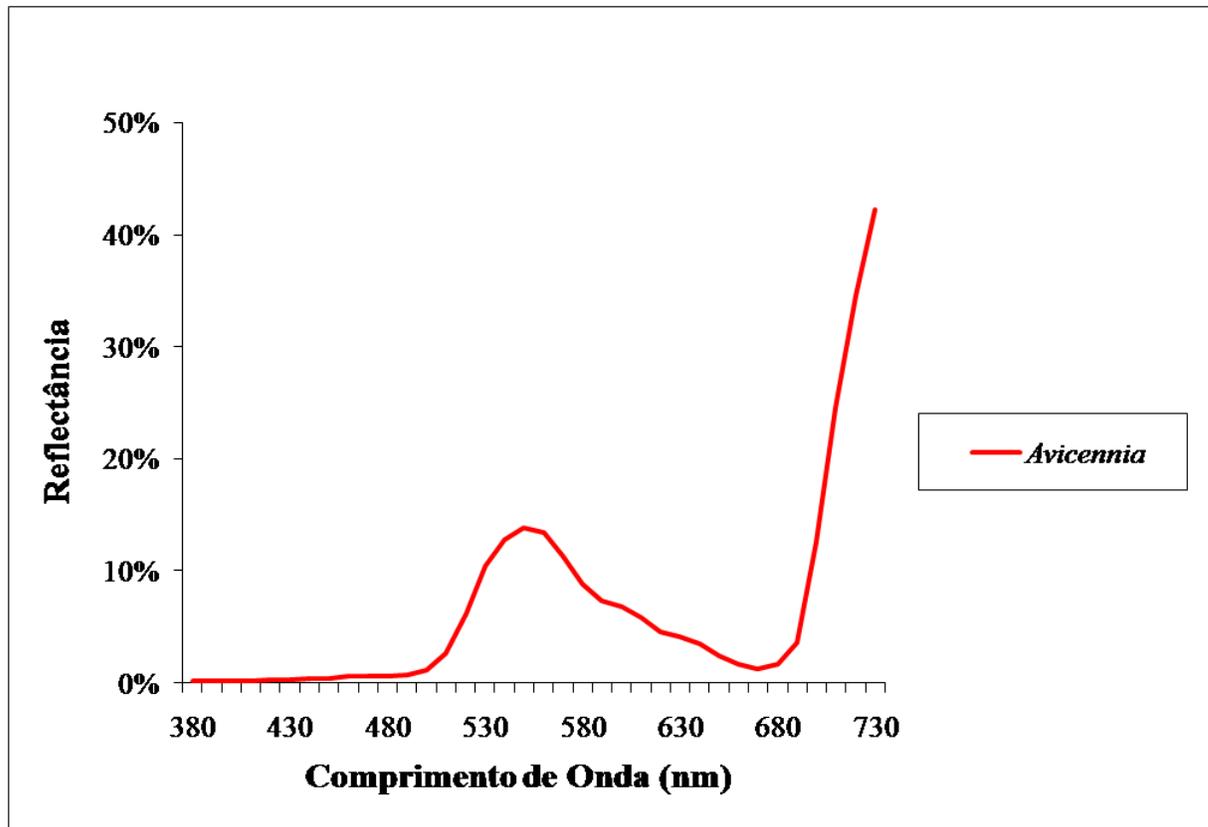


FIGURA 23 – Comportamento espectral médio das folhas de *Avicennia* no ponto 1C.

Ponto 1

A integração dos valores de reflectância no intervalo de comprimento de onda estudado obtidos a partir das folhas de *Rhizophora* e *Avicennia* coletadas nas subáreas de amostragem (1B e 1C) apresenta um valor máximo de reflectância nas amostras de *Avicennia* que atinge 14% em 550 nm. As folhas de *Rhizophora* de baixa e alta estatura atingiram valor médio em torno de 11 e 7%, respectivamente. Para o infravermelho próximo, tanto a *Rhizophora* de baixa quanto a de alta estatura ultrapassaram a reflectância da *Avicennia* em 730 nm (Figura 24).

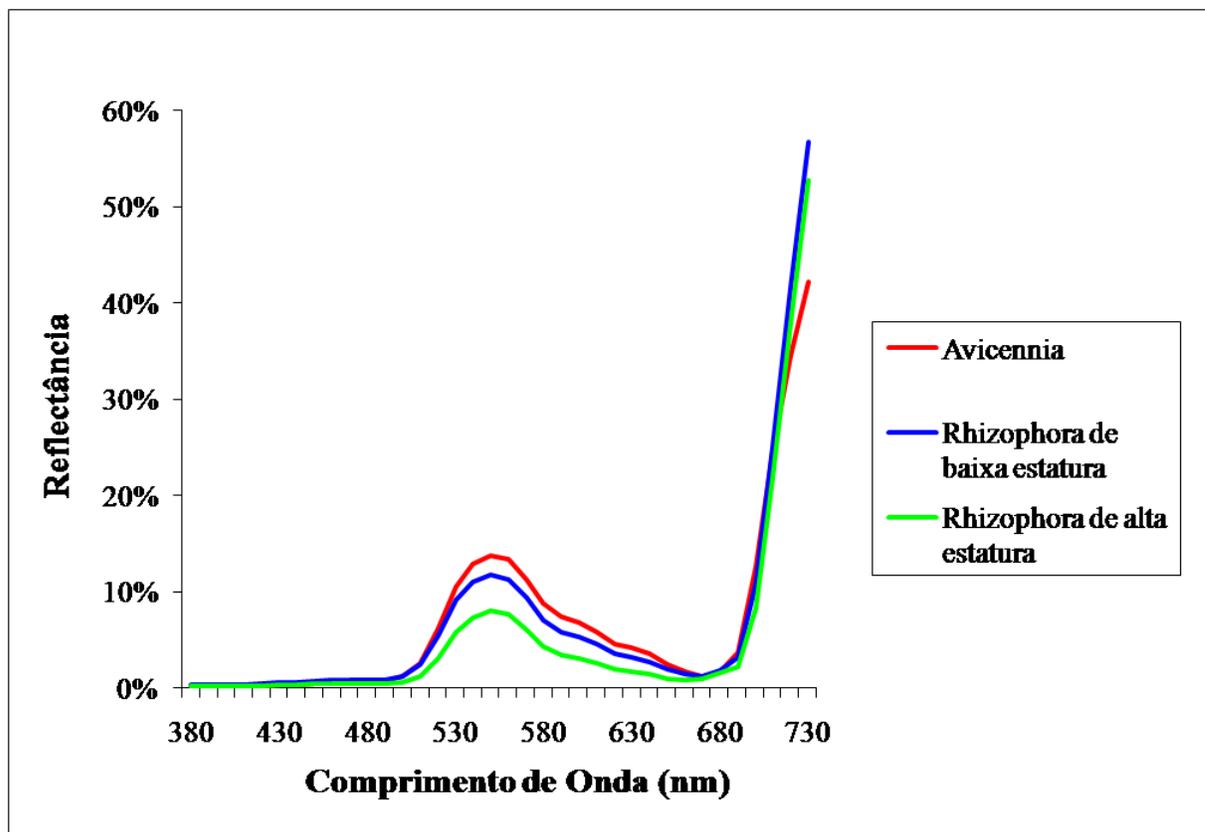


FIGURA 24 – Comportamento espectral médio das espécies de mangue no ponto 1.

Ponto 2

Os valores médios de reflectância, em torno de 550 nm, para as folhas de *Avicennia* e *Rhizophora* retiradas de árvores com estaturas em torno de 8 m apresentaram uma diferença de 2% em favor da *Avicennia*, enquanto que na faixa do infravermelho próximo, os índices de reflectância assumem valores praticamente iguais (Figura 25).

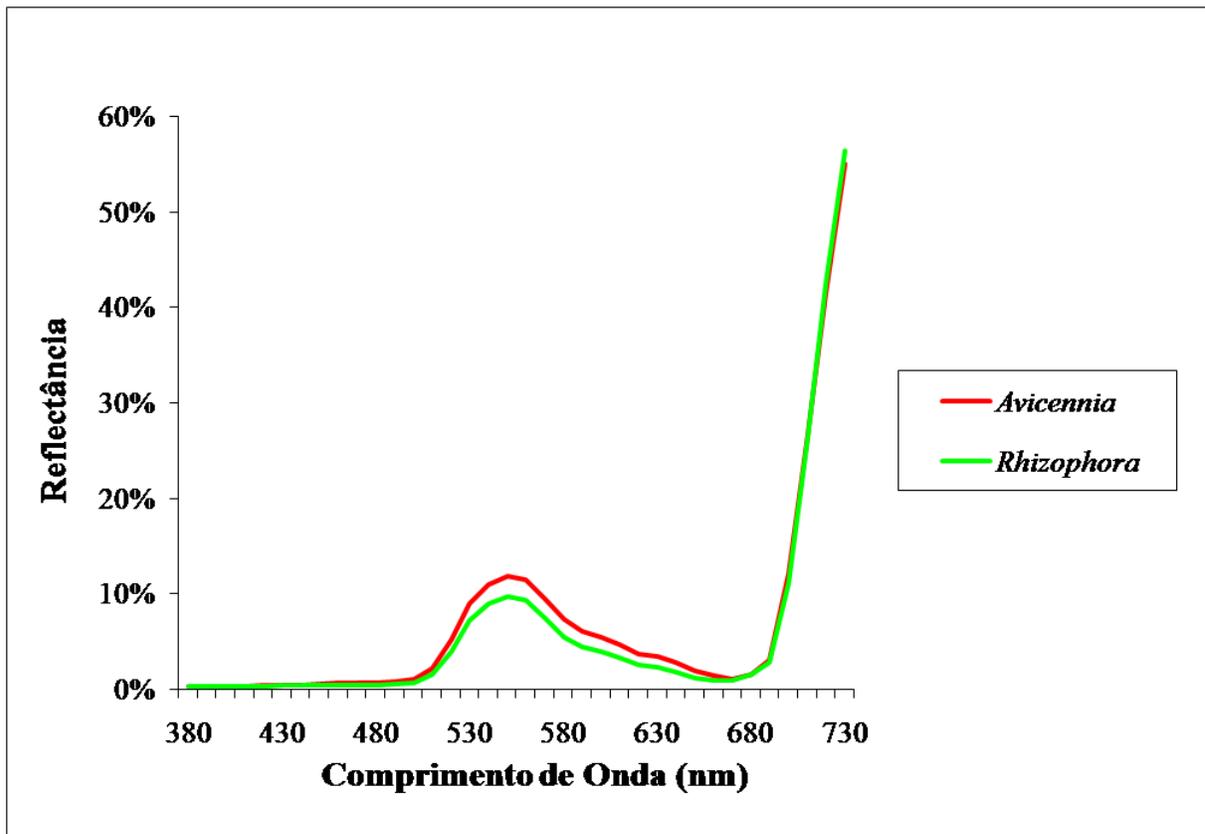


FIGURA 25 – Comportamento espectral médio das espécies de mangue no ponto 2.

4.3- ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS ESPÉCIES VEGETAIS ESTUDADAS NA REGIÃO DE MOSQUEIRO

Ponto 1

Os valores de reflectância médios da *Avicennia* de baixa estatura (< 4 m) estão por volta de 11% em 550 nm e 43% em 730 nm, enquanto que os valores médios de reflectância na mesma faixa na *Rhizophora* de baixa estatura (< 4 m) encontram-se em torno de 7 e 41%. Nota-se que a diferença entre as reflectâncias apresentadas pelos dois gêneros diminui no intervalo do infravermelho (Figura 26)

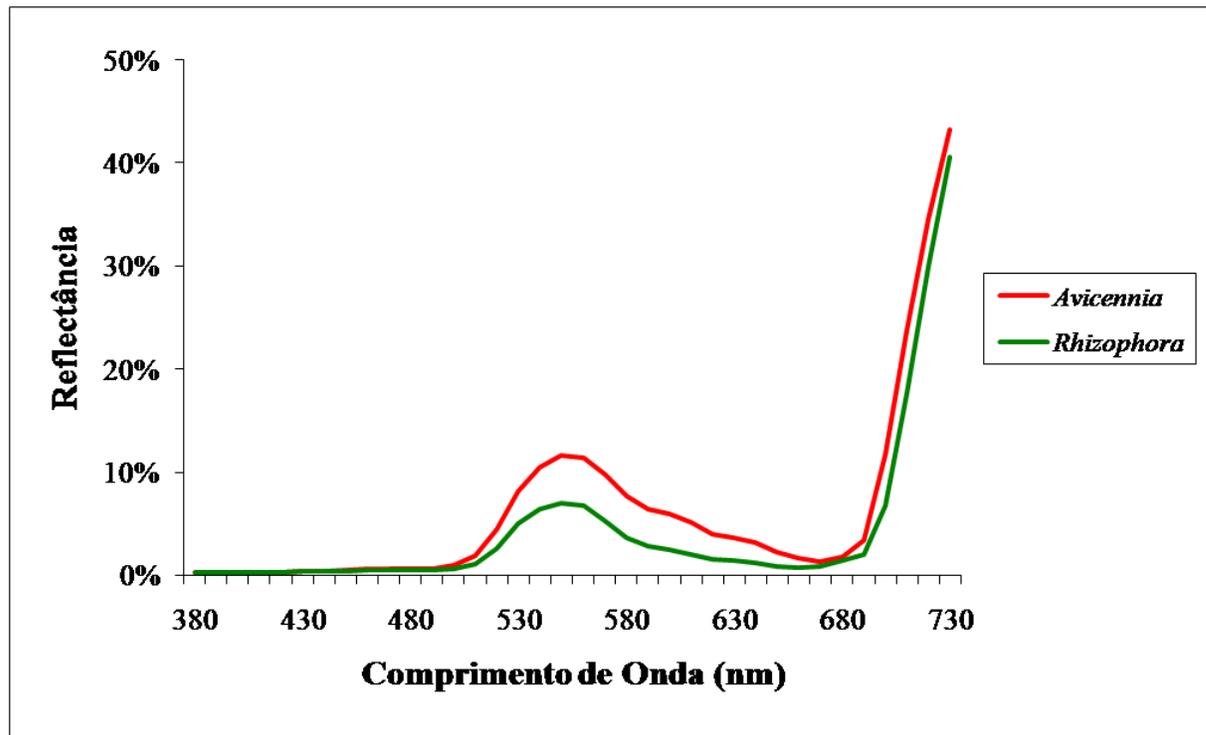


FIGURA 26 – Comportamento espectral médio das espécies de mangue no ponto 1.

4.4- ANÁLISE INTEGRADA DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DOS MANGUEZAIS ESTUDADOS

Os dados de reflectância das folhas de *Rhizophora* e *Avicennia* coletados nas três áreas de estudo na faixa do visível e do infravermelho próximo indicam que as amostras de *Avicennia* coletadas em Curuçá apresentaram índices de reflectância maiores na região do visível alcançando 11% (550 nm). Já o gênero *Rhizophora* de Curuçá assume valores de até 52% em 730 nm, na entrada do infravermelho próximo. Os valores médios para as amostragens de Bragança e Mosqueiro resultaram em curvas sobrepostas com valores médios de reflectância em torno de 9 e 42%, o que indica uma grande semelhança na reflectância obtida nestes locais (Figura 27).

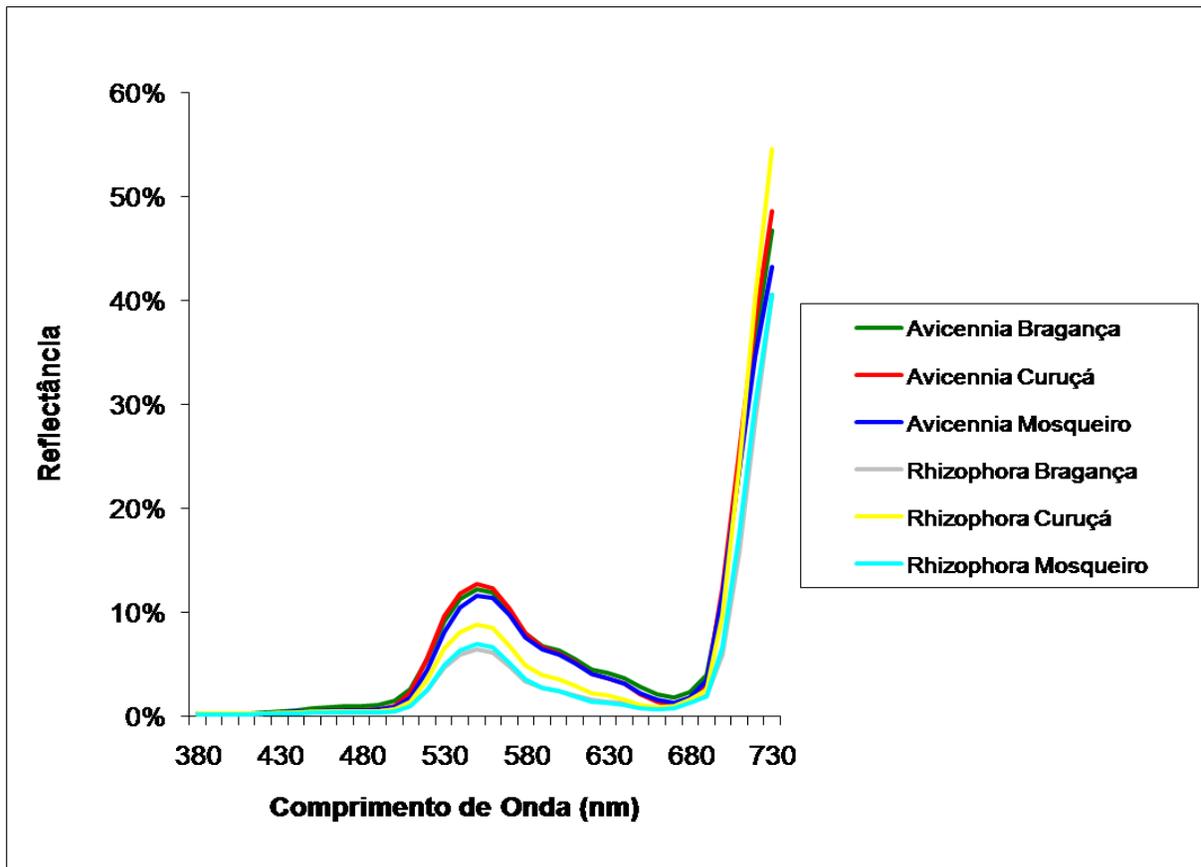


FIGURA 27 – Comportamento espectral médio dos gêneros de mangue nas três áreas de estudo.

4.5- REFLECTÂNCIA EM RELAÇÃO À ALTURA DA VEGETAÇÃO

Rhizophora

A análise integrada entre os dados de reflectância em 550 nm e estatura das árvores permitiu verificar a possibilidade dos gradientes de reflectância estarem respondendo ao grau de maturidade da vegetação de manguezal. Considerando apenas as árvores de *Rhizophora* de Bragança, os dados indicam que a reflectância diminui com o aumento da estatura da vegetação, onde as reflectâncias das folhas no intervalo de 4 e 6% apresentam estatura em torno de 11 m, enquanto que os valores próximos de 10% foram obtidos para árvores com altura na faixa de 6 e 8 m. A relação inversamente proporcional entre as duas variáveis pode ser constatada no valor de seu R^2 em 0,93 e $p = 0,0003$ (Tabela 5) com a equação da reta sendo $y = - 96, 771x + 16, 645$.

Avaliando os dados de Curuçá, apesar do grande número de amostras se afastarem da reta ($y = - 50, 523x + 10,74$, $R^2 = 0,18$, $p = 0,0205$), a tendência de redução da reflectância com o aumento na estatura permanece. Esse comportamento também foi identificado para a *Rhizophora* de Mosqueiro ($y = - 47, 379x + 6,144$, $R^2 = 0,21$; $p = 0,1142$).

As linhas de tendência possuem o mesmo padrão para as três regiões e são definidas pelas seguintes equações:

$$y = - 47,379x + 6,144 \quad (\text{Mosqueiro})$$

$$y = -50,523x + 10,74 \quad (\text{Curuçá})$$

$$y = - 96,771x + 16,645 \quad (\text{Bragança})$$

Onde:

y: altura da planta

x: reflectância

Vale destacar que as reflectâncias na faixa entre 4 e 7% apresentaram diferenças entre as estaturas quando comparadas entre os três locais de estudo. Nessa faixa espectral, as árvores de *Rhizophora* de Bragança apresentam altura entre 11 e 12 m, enquanto que as de Curuçá e Mosqueiro oscilaram entre 4-11 e 2-4 m, respectivamente. No intervalo de reflectância compreendido entre 8 e 10%, as alturas das árvores estiveram entre 8-6 m, 2-9 m e 2-5 m para Bragança, Curuçá e Mosqueiro, respectivamente. Entre 12 e 14%, apenas as árvores de

Rhizophora de Curuçá exibiram tal intervalo de reflectância com suas estaturas entre 2 e 7 m (Figura 28).

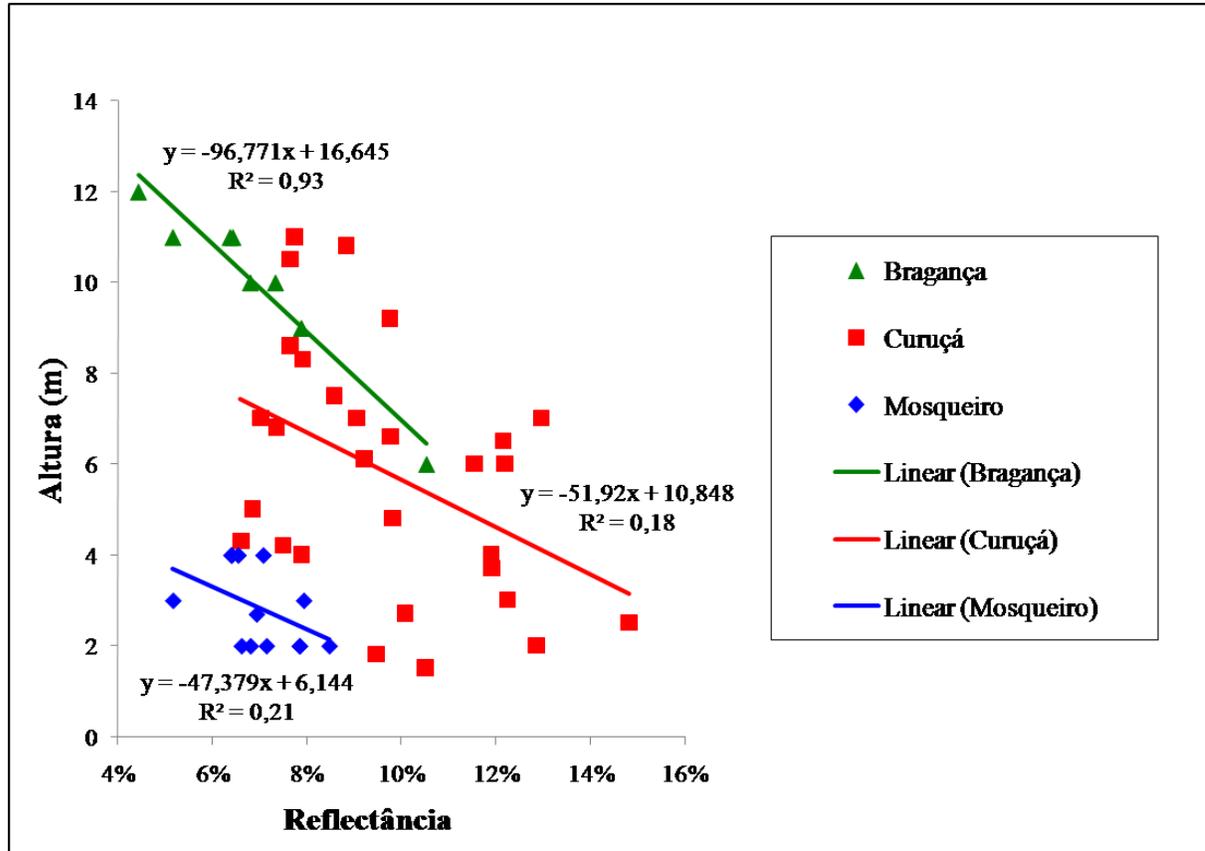


FIGURA 28 - Relação entre a reflectância obtida no ponto máximo do visível (550 nm) e a altura da vegetação para o gênero *Rhizophora*.

TABELA 5 – Resultados da análise de regressão linear para o gênero *Rhizophora*.

Análise de Regressão linear simples	<i>Rhizophora</i> Bragança	<i>Rhizophora</i> Curuçá	<i>Rhizophora</i> Mosqueiro
F (regressão)	85,81	5,94	2,89
p (significância)	0,0003	0,0205	0,1142
Média Reflectância (%)	6,87	10	7
Média Altura (m)	10	5,8	2,8
Coef. de Determinação (R ²)	0,93	0,18	0,21
Coef. de Correlação (Pearson)	0,97	0,42	0,45

Avicennia

Os dados de reflectância obtidos nas folhas de *Avicennia* associados com a altura da vegetação indicam uma relação entre a estatura das árvores e a energia refletida por suas folhas. Considerando os indivíduos do gênero *Avicennia* encontrados em Bragança, para valores de reflectância na faixa entre 6 e 10%, a altura média fica em torno de 6 m, já árvores com índices inseridos no intervalo de 10 a 14%, a estatura média da vegetação sofre uma diminuição de 1 m. A partir de 14% as alturas diminuem atingindo mínimo de 0,5 m em aproximadamente 18%. Esse comportamento é exibido pela linha de tendência definida pela equação $y = - 63,658x + 12,235$, e com o valor do R^2 em 0,48 e $p = 0,003$ (Tabela 6).

Em Curuçá, árvores de *Avicennia* de grande porte, com cerca de 15 m, apresentam valores de reflectância entre 6 e 8%. Na faixa de 8 a 16%, ocorre o predomínio de árvores com estatura entre 15 e 6 m. No intervalo de 16 a 20% destacamos a presença de uma vegetação relativamente baixa, não ultrapassando 6 m de altura. O R^2 alcança 0,44 e $p < 0,0001$ com a seguinte equação de reta $y = - 66,362x + 17,851$. Já na região de Mosqueiro, a estatura das árvores de *Avicennia* com reflectância entre 8 e 10% atingem cerca de 4 m, variando no intervalo de 10 a 14%, chegando a 0,5 m. Seu R^2 é 0,51 e $p = 0,0137$, sendo sua equação dada por $y = - 52,2x + 8,3919$.

As linhas de tendência apresentam o mesmo padrão com as respectivas equações sendo representadas abaixo:

$$y = - 52,2x + 8,3919 \quad (\text{Mosqueiro})$$

$$y = - 66,362x + 17,851 \quad (\text{Curuçá})$$

$$y = - 63,658x + 12,235 \quad (\text{Bragança})$$

Onde:

y: altura da planta

x: reflectância

Com base nesta análise, podemos notar que existe uma diferença entre a altura média das árvores para as três regiões. No intervalo compreendido entre 8 e 12% o gênero *Avicennia* de Mosqueiro apresentou menor estatura, não ultrapassando 4 m, sendo que em Bragança e Curuçá a altura da vegetação encontra-se em torno de 8 a 15 m para essa mesma faixa de reflectância. No

intervalo de 12 a 16%, as estaturas médias variaram entre 1,5 e 10 m para Mosqueiro, Bragança e Curuçá, respectivamente.

No intervalo de 16 a 20%, a altura das árvores em Curuçá e Bragança atinge um máximo de 4 m, enquanto a região de Mosqueiro não apresentou árvores de *Avicennia* com valores de reflectância nessa faixa (Figura 29).

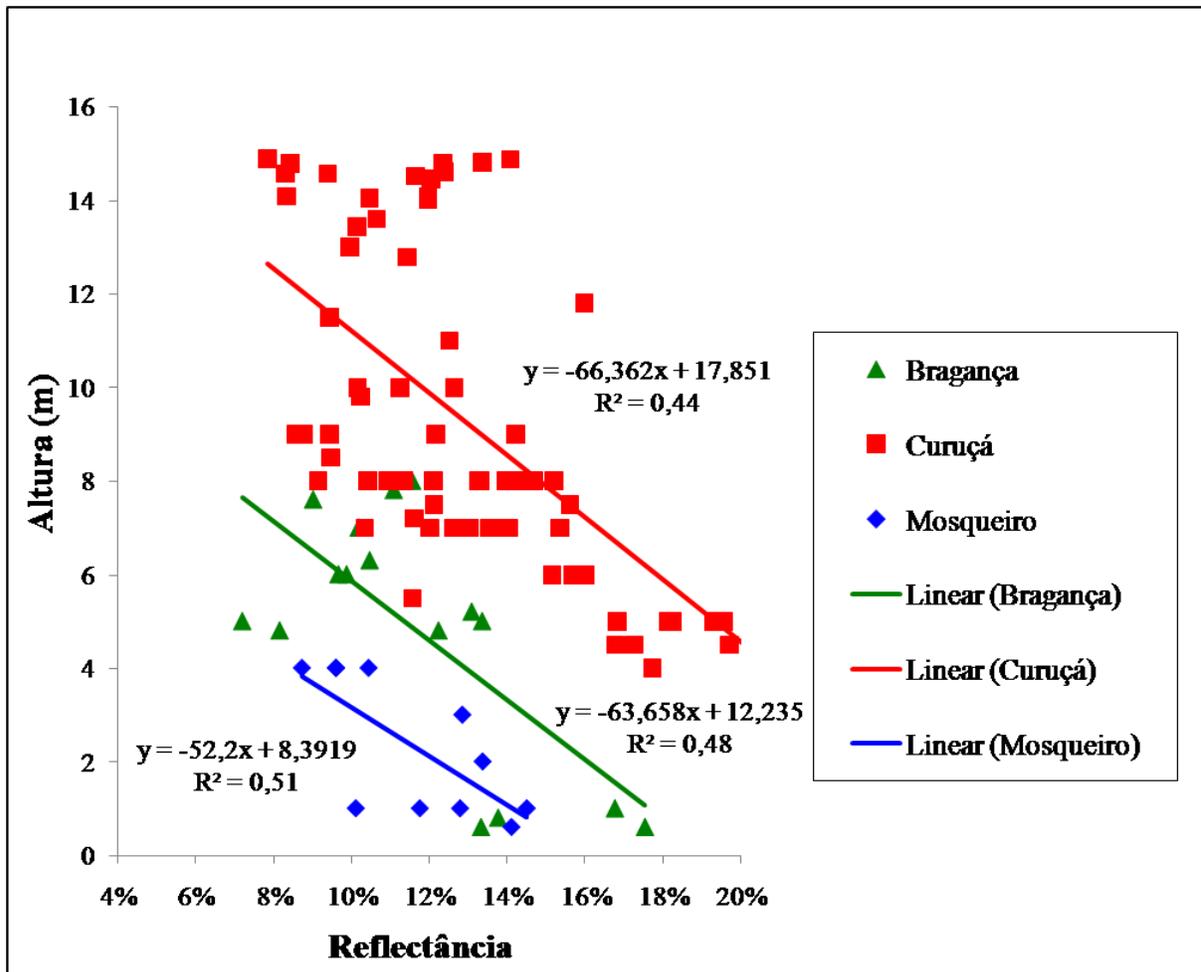


FIGURA 29 – Relação entre a reflectância obtida no ponto máximo do visível (550 nm) e a altura da vegetação para o gênero *Avicennia*.

TABELA 6 – Resultados da análise de regressão linear para o gênero *Avicennia*.

Análise de Regressão linear simples	<i>Avicennia</i> Bragança	<i>Avicennia</i> Curuçá	<i>Avicennia</i> Mosqueiro
F (regressão)	13,19	57,23	9,22
p (significância)	0,003	< 0,0001	0,0137
Média Reflectância (%)	12	13	12
Média Altura (m)	4,78	9	2,32
Coef. de Determinação (R^2)	0,48	0,44	0,51
Coef. de Correlação (Pearson)	0,69	0,66	0,71

O Baixo valor do R^2 é atribuído às árvores de alta estatura que tendem a apresentar uma ampla margem de valores de reflectância, enquanto que as de baixa estatura exibem um grupo de valores de reflectância mais confinados a uma estreita variação.

Este comportamento pode estar relacionado à salinidade da água intersticial, pois locais com baixa concentração de sal na água do sedimento, tendem a permitir a ocupação de espécies adaptadas a essas condições que do ponto de vista da competição por espaço são mais competentes do que as espécies de manguezais. A disputa por espaço pode gerar árvores de manguezais de baixo grau de desenvolvimento (Yan & Guizhu, 2007; Visnadi, 2008).

Por outro lado, locais com elevada salinidade (> 80) também tem efeito negativo sobre as comunidades de manguezais, pois o estresse salino dificulta o pleno desenvolvimento das árvores de mangue (Cohen & Lara, 2003).

Em termos gerais, a salinidade está entre os fatores que limitam o crescimento das plantas, afetando vários processos fisiológicos dentre os quais a fotossíntese. Em altas concentrações, o sal reduz a habilidade das plantas em absorver água, afetando a taxa de crescimento e causando uma série de mudanças metabólicas (Munns, 2002). O acúmulo de NaCl nos tecidos promove o fechamento dos estômatos, impede a evaporação da água e diminui a atividade dos cloroplastos comprometendo dessa forma o processo fotossintético (Yan & Guizhu, 2007).

No cloroplasto, organela presente somente na célula da folha, os pigmentos fotossintetizantes presentes nas membranas podem converter a energia da luz solar em energia química por meio da excitação que os fótons causam nas moléculas. Quando a luz é absorvida, o elétron passa para um orbital mais externo (excitado) ficando em situação instável; para retornar

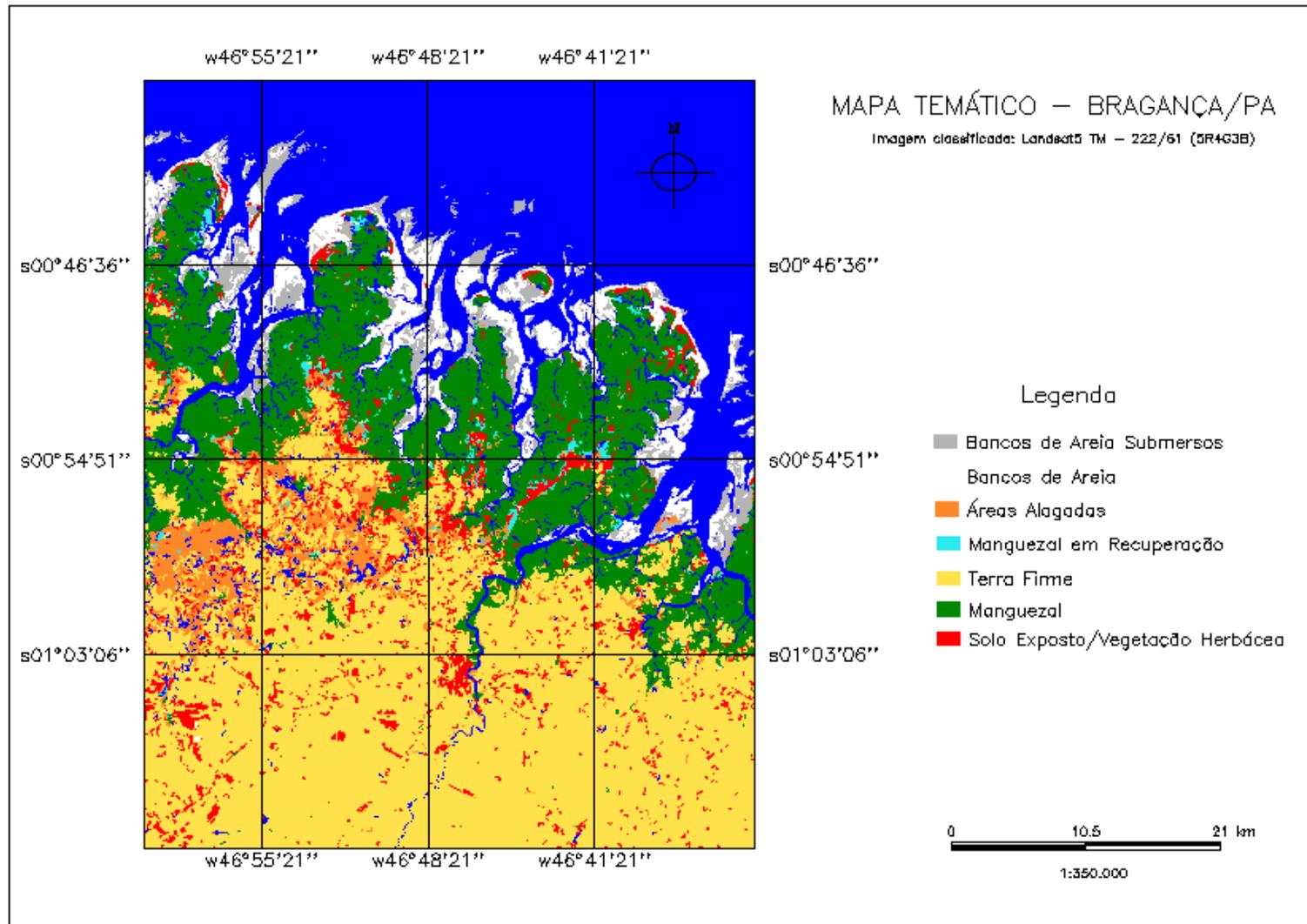
a estabilidade, é necessário que o mesmo emita parte da energia adquirida, fenômeno conhecido como fluorescência. É a partir desse processo que é realizado a fotossíntese (Raven et al., 1996).

Esses pigmentos, clorofilas *a* e *b*, são responsáveis pela captura da radiação solar no intervalo do espectro eletromagnético correspondente ao visível. Portanto a quantidade de energia refletida pela folha está relacionada, de forma inversa, com sua atividade fotossintética. Sob essas condições podemos supor que a alta reflectância encontrada em árvores de baixo porte, pode ser resultado dos efeitos que o estresse salino produz sobre os cloroplastos.

4.6- MAPAS TEMÁTICOS DA VEGETAÇÃO DAS REGIÕES ESTUDADAS

As medidas de GPS realizadas durante a campanha, assim como o levantamento bibliográfico sobre pesquisas já realizadas e os dados de campo serviram de base para propor a elaboração de Mapas Temáticos das regiões estudadas, onde o comportamento espectral é fator principal na individualização de coberturas vegetais distintas, incluindo os manguezais.

O primeiro mapa ilustra o domínio dos manguezais na faixa litorânea bragantina e em regiões adjacentes. Adentrando o continente, a maioria das áreas é ocupada por vegetação de terra firme, com a presença de algumas superfícies classificadas como sem cobertura (solo exposto/vegetação herbácea), incluindo ambientes degradados e adensamentos urbanos (Figura 30). Entre esses dois ecossistemas diferentes, temos a ocorrência de algumas regiões alagadas. A quantificação dessas classes é apresentada na tabela 7.



co – Bragança/PA.

TABELA 7 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático Bragança/PA.

Classe	Área (km ²)
Manguezal	870
Terra Firme	3.011
Solo Exposto ou com vegetação herbácea	288
Manguezal em Recuperação	26
Áreas Alagadas	160
Bancos de Areia	193
Bancos de Areia Submersos	180
Total	4.704

Para a região de Curuçá, a classificação realizada pelo *software* Spring 4.3.3 e a análise dos dados coletados durante as visitas de campo, indicou um predomínio de manguezais ao longo da costa e às margens dos rios que adentram o continente. A área de maior extensão, cerca de 60%, é ocupada pela vegetação de terra firme ocorrendo alguns setores caracterizados como solo exposto ou com vegetação herbácea, localizados em torno da sede municipal, nas estradas de acesso e em certas regiões próximos ao litoral. Ainda temos a ocorrência isolada de áreas alagadas e bancos de areia limitando a linha de costa (Figura 31).

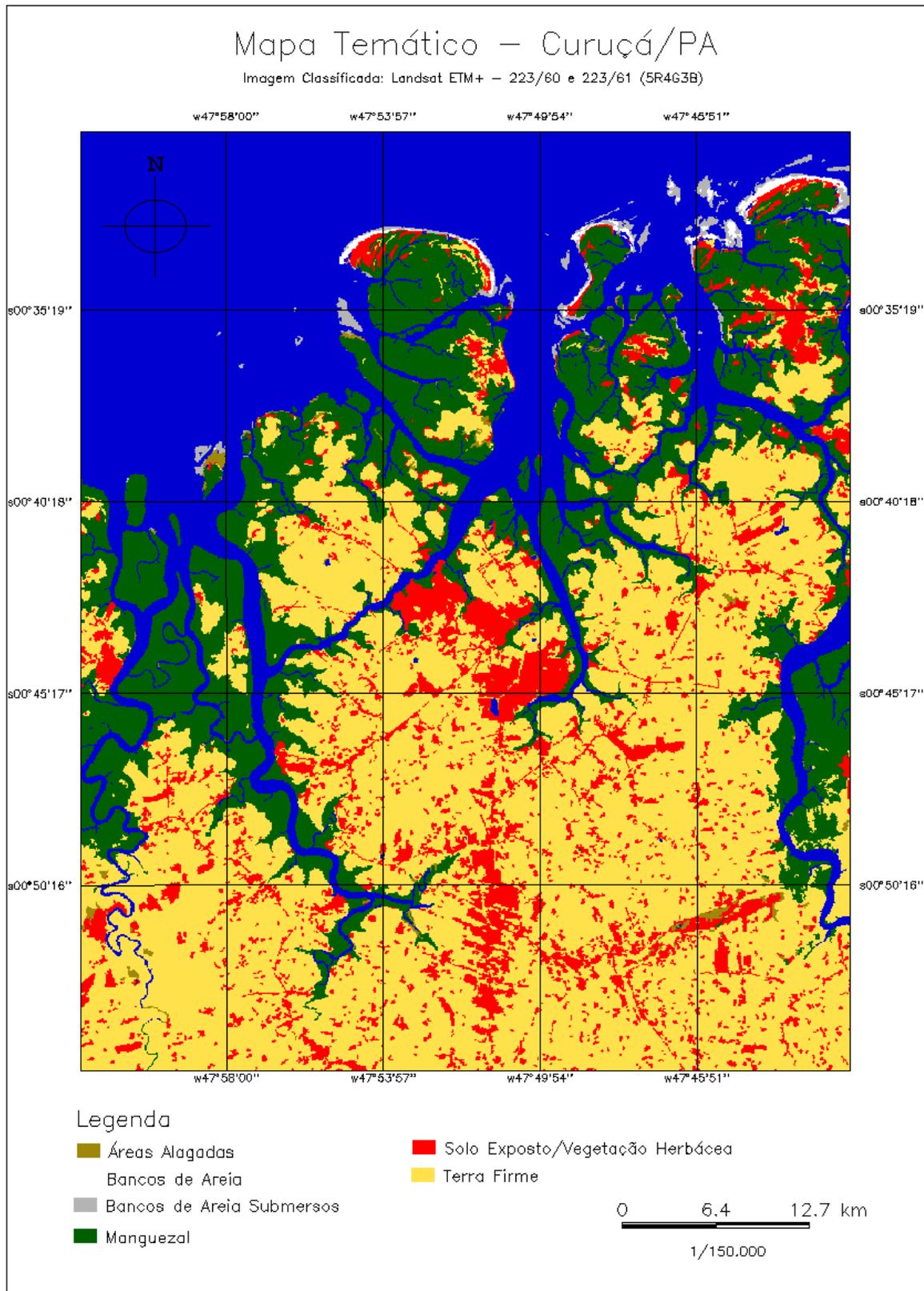


FIGURA 31 – Mapa Temático – Curuçá/PA.

A quantificação das classes presentes para a região de Curuçá é apresentada na tabela 8.

TABELA 8 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático Curuçá/PA.

Classe	Área (km ²)
Manguezal	357
Terra Firme	977
Solo Exposto ou com vegetação herbácea	246
Áreas Alagadas	8
Bancos de Areia	5
Bancos de Areia Submersos	15
Total	1.608

O mapa temático da região de Mosqueiro apresenta um predomínio da vegetação de terra firme, ocorrendo algumas áreas descampadas, classificadas como solo exposto/vegetação herbácea, que englobam as ocupações urbanas e as praias situadas a oeste da ilha. Em alguns locais próximos à costa e nas margens dos rios nota-se a presença da várzea-de-maré, vegetação influenciada pela maré de água doce (Figura 32). A quantificação dessas classes é apresentada na tabela 9.

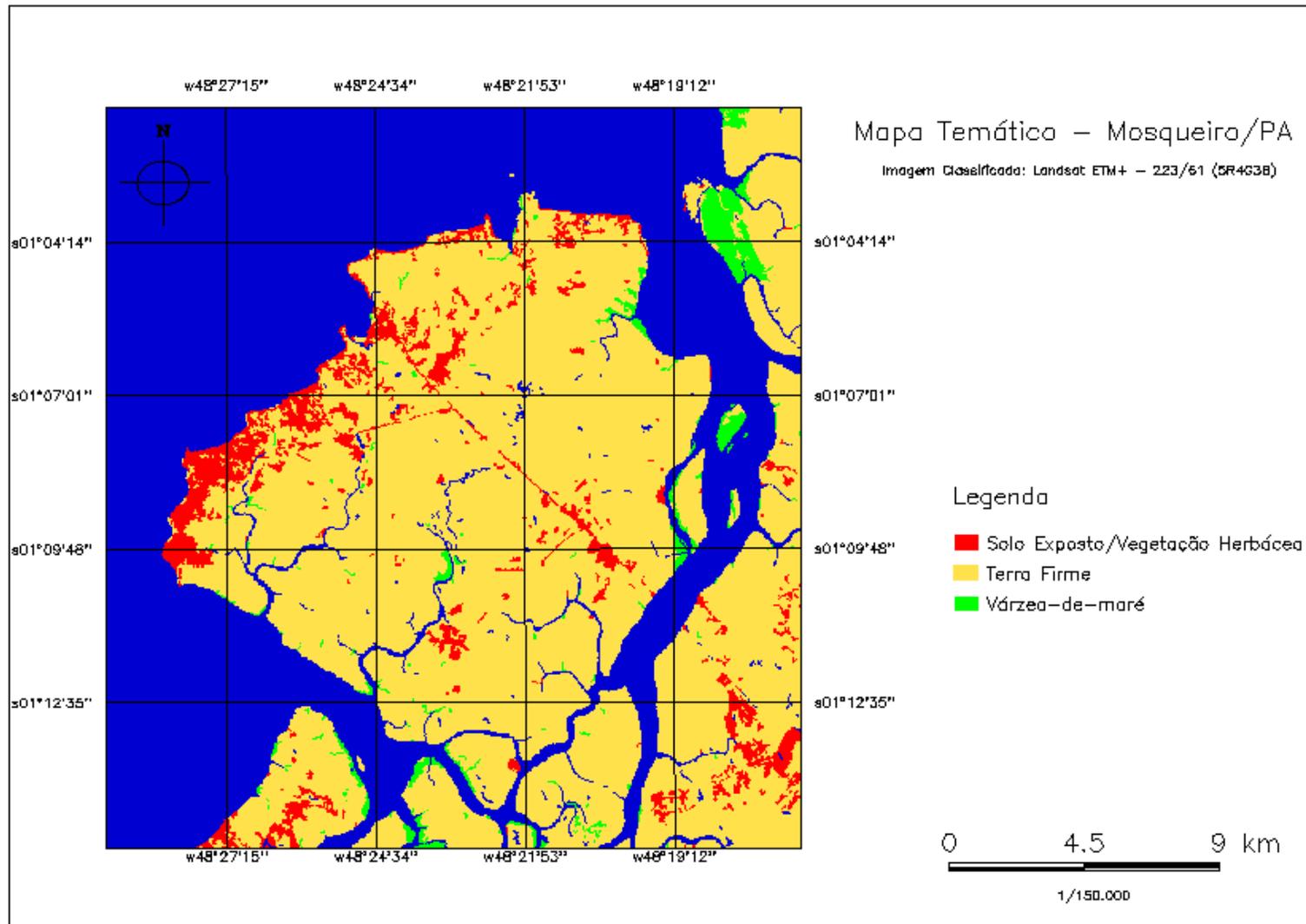


FIGURA 32 – Mapa Temático – Mosqueiro/PA.

TABELA 9 – Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático Mosqueiro/PA.

Classes	Áreas (km ²)
Várzea-de-maré	4
Terra Firme	286
Solo Exposto ou com vegetação herbácea	57
Total	347

A integração dos resultados obtidos nas três regiões de estudo (Bragança, Curuçá e Mosqueiro) originou um mapa temático do litoral paraense baseado nas características espectrais da vegetação.

Segundo este mapa, o litoral apresenta um domínio significativo de manguezais a leste, sugerindo ambientes com forte influência salina. No setor oeste do litoral paraense é observada uma redução gradual na área de manguezal. Neste segmento do litoral, o manguezal diminui sua penetração continental, restringindo-se aos setores mais próximos do oceano, e raramente se estabelecendo ao longo de cursos d'água mais internos, supostamente com níveis de salinidade mais baixos ou ausentes. A várzea-de-maré surge na parte oeste, em locais de forte influência fluvial, situada próximo à Mosqueiro. A partir da região de Colares, o segmentador utilizado pelo Spring separou locais com características espectrais semelhantes às duas coberturas vegetais. Assim, os dados de reflectância obtidos a partir das folhas da vegetação, provavelmente manguezal de *Rhizophora* e várzea-de-maré formada por *Arecaceae*, e das imagens de satélite sugerem uma zona de transição entre esses ambientes (Figura 33).

A vegetação de terra firme, no sentido leste-oeste, tende a ocupar áreas mais próximas da costa como consequência da diminuição da área da planície costeira, freqüentemente inundada pela maré e colonizada principalmente por manguezal. A tabela 10 exhibe os valores das classes exibidos no mapa.

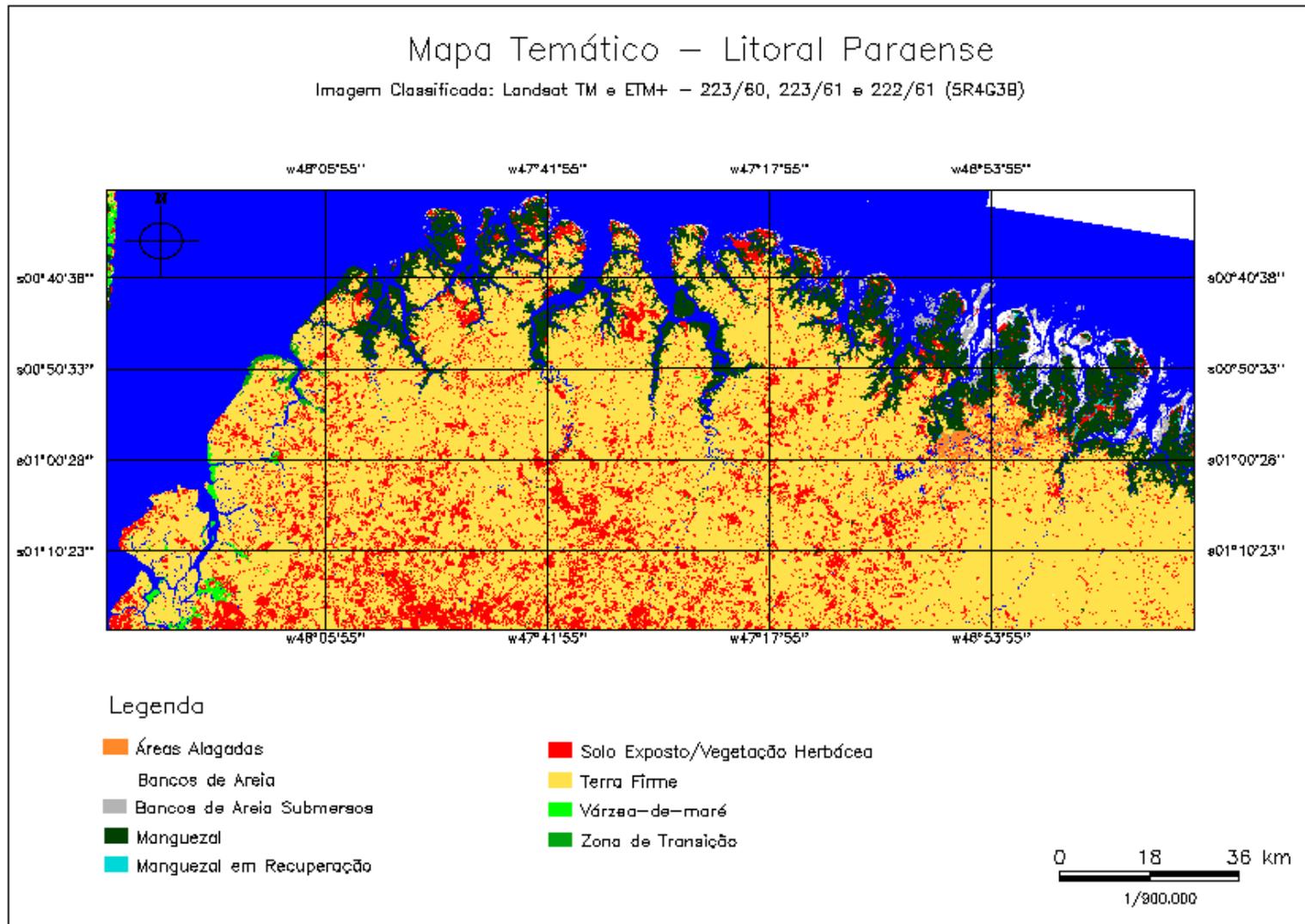


FIGURA 33 – Mapa Temático – Litoral Paraense.

TABELA 10 - Cálculo de Áreas presentes no Mapa Temático do Litoral Paraense.

Classe	Área (km ²)
Manguezal	1.832
Várzea-de-maré	162
Terra Firme	10.246
Solo Exposto ou com vegetação herbácea	2.675
Manguezal em Recuperação	22
Áreas Alagadas	121
Bancos de Areia	165
Bancos de Areia Submersos	212
Zona de Transição	40
Total	15.475

As técnicas de segmentação empregadas nas imagens permitiram identificar coberturas vegetais distintas. Dentre as diversas combinações testadas, a citada por Nascimento (1997) com o par de 12 para similaridade e 10 para área de pixels foi a que melhor delimitou as classes temáticas de interesse (Manguezal, Várzea-de-maré, Terra Firme, Solo Exposto/Vegetação Herbácea, Manguezal em recuperação, Áreas Alagadas, Bancos de Areia, Bancos de areia Submersos e Zona de Transição) nos mapas referentes ao litoral paraense e a região de Curuçá. Já a pequena área de Mosqueiro possibilitou que valores de similaridade menores fossem utilizados, com resultados satisfatórios obtidos por meio da combinação 8 – 10.

A classificação preliminar por regiões obedeceu aos mesmos padrões nas três áreas de estudo, com o uso do classificador não-supervisionado ISOSEG – Limiar de aceitação 75%. De maneira geral, os mapas apresentaram boa distinção das características espectrais emitidas por coberturas vegetais. Porém, a diferenciação entre áreas de várzea-de-maré e manguezal só foi possível através das checagens em campo (recolhimento dos pontos com GPS, descrição dos locais visitados e análise espectral das folhas). Esses dados indicam que as plantas apresentam características espectrais distintas ao variar de espécie, estatura e ambiente. Em vista disso, vegetações costeiras como as abordadas neste estudo, podem ser distinguidas com base em sutis diferenças presentes na resposta espectral de suas folhas.

O trabalho de coleta e amostragem em campo contribuiu para identificar pontos onde o predomínio desses ecossistemas se mostrava mais evidente e, assim, complementou as informações obtidas pelo estudo das imagens de satélite. Vale ressaltar, que os valores de reflectância oriundos da análise de folhas individuais não apresentam a mesma intensidade da resposta espectral emitida pela imagem devido às perdas atmosféricas.

A radiação interage com a atmosfera causando absorção ou espalhamento, sendo que o último poder ser também produto de múltiplas interações. Esses processos, que afetam tanto o fluxo incidente como o refletido, são causados por gases, aerossóis e moléculas. A absorção subtrai radiação de um feixe enquanto que o espalhamento subtrai e adiciona radiação a um feixe em uma dada direção (Antunes et al., 2003).

Para a elaboração dos mapas finais, os pontos obtidos em campo por meio de GPS, auxiliaram na localização de áreas representativas para cada tema. Os dados coletados são inseridos no sistema que tem como base uma imagem segmentada. As regiões delimitadas por esse processo apresentam características espectrais semelhantes, que ao serem associadas com os dados de campo, geram uma nova subclasse temática.

A partir desse processo, o classificador supervisionado (*Bhattacharya* – Limiar de aceitação 75%) realizou um novo mapeamento distinguindo de forma satisfatória as coberturas vegetais referentes ao mangue e à várzea-de-maré. O *software* Spring apresentou resultados satisfatórios durante o emprego desse processo.

Os valores de reflectância obtidos em folhas individuais indicaram uma diferença entre esses dois tipos vegetacionais, sendo o manguezal detentor de menor reflectância no intervalo do visível (400 a 700 nm). Nas imagens de satélite, as áreas mais escuras estão localizadas próximas do litoral, o que caracteriza ambientes sob forte influência salina. A várzea-de-maré apresenta coloração relativamente mais clara, indicando maiores valores de reflectância. Essas regiões encontram-se às margens de rios ou praias dominadas por águas doces, como apresentado no mapa da figura 29.

O produto final gerado por essa pesquisa permite localizar áreas dotadas de vegetações distintas, identificando pontos onde predominam espécies típicas de manguezal e de várzea. Esta informação ajudará nas pesquisas em andamento sobre a atual dinâmica dos manguezais ante o aumento do nível do mar no litoral paraense.

CONCLUSÕES

A análise espectral das folhas coletadas indicou que, em comparação com as demais vegetações, os gêneros de manguezal apresentam baixos valores de reflectância no intervalo de 500 a 590 nm, em média 7% para *Avicennia* e 4% para *Rhizophora*. Nesta faixa espectral, o maior índice obtido foi da Caesalpiniaceae com a média de 17%. Entre as amostras de manguezal, o gênero *Rhizophora* apresenta características espectrais próximas das folhas de *Arecaceae*. Assim, considerando somente a reflectância das folhas e condições atmosféricas semelhantes, as áreas dominadas por palmeiras típicas de várzea-de-maré podem ser facilmente confundidas com manguezais colonizados predominantemente por árvores de *Rhizophora*. Porém, a medida que o manguezal apresenta um aumento na quantidade de árvores de *Avicennia* a diferença de reflectância entre a Várzea e o manguezal naturalmente aumenta.

Nas três áreas estudadas (Bragança, Curuçá e Mosqueiro), ocorreu uma variação entre os valores de reflectância apresentados pelos gêneros de manguezal. Vários fatores ambientais podem estar influenciando neste resultado, dentre eles, condições adversas de salinidade podem afetar a reflectância das plantas.

Considerando apenas as árvores de *Rhizophora* de Bragança, os dados indicam que a reflectância diminui com o aumento da estatura da vegetação. A relação inversamente proporcional entre as duas variáveis pode ser constatada no valor de seu R^2 em 0,93 e $p = 0,0003$. Entretanto, os dados de reflectância para a *Rhizophora* em Mosqueiro ($R^2 = 0,21$ e $p = 0,1142$) e Curuçá ($R^2 = 0,18$ e $p = 0,0205$) apresentaram baixa correlação, porém a tendência inversamente proporcional entre a reflectância e estatura da vegetação permanece.

As amostras de *Avicennia* também apresentam tendência semelhante, porém as correlações (R^2) oscilaram em torno de 0,51 (Mosqueiro), 0,48 (Bragança) e 0,44 (Curuçá). Os valores de significância, determinados em cada área de estudo, indicaram que região de Curuçá apresentou resultados estáticos satisfatórios ($p < 0,0001$), embora apresente um baixo valor em seu R^2 . Apesar dos valores de significância altos, as amostras de Bragança ($p = 0,003$) e Mosqueiro ($p = 0,0137$) reforçam a relação inversamente proporcional entre altura da planta e reflectância de suas folhas.

As técnicas de processamento digital empregadas neste estudo, tendo como base auxiliar a biblioteca espectral da vegetação, mostraram-se eficazes no sentido de diferenciar unidades

vegetacionais específicas. Contudo, para a separação de ambientes com características espectrais muito semelhantes, neste caso os manguezais colonizados predominantemente por *Rhizophora* e as várzeas-de-maré dominadas por palmeiras, em imagens de satélite fazem-se necessárias verificações de campo, com a aquisição de coordenadas onde estes ambientes apresentem grande representatividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, Dário Dantas do; PROST, Maria Thereza; BASTOS, Maria de Nazaré do Carmo. Restingas do litoral amazônico, estados do Pará e Amapá, Brasil. In: *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais*, vol. 3, n. 1. Abril, 2008. p. 35-67.
- AFFONSO, Adriana Gomes. *Caracterização de fisionomias vegetais na Amazônia Oriental através de videografia aerotransportada e imagens Landsat 7 ETM⁺*. São José dos Campos. INPE, 2004.
- ALMEIDA, Samuel Soares de; AMARAL, Dário Dantas do; SILVA, Antonio Sérgio Lima da. Análise florística e estrutura de florestas de várzea no estuário amazônico. In: *Acta Amazônica* n. 4, vol. 34. 2004. p. 513-524.
- ALMEIDA FILHO, Raimundo; NASCIMENTO, Paulo Sérgio Rezende; BATISTA Getulio Teixeira. Avaliação de tecnologia de segmentação e classificação automática de imagens Landsat – TM no mapeamento do uso do solo na Amazônia. In: *Acta Amazônica*, n. 1, vol. 28, 1998. p. 41-54.
- 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: *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia*, 2003.
- BATISTA, G.T.; MEDEIROS, J.S.; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C.; BINS, L.S. A new approach for deforestation assessment. In: *Anais VII Symposium on Resource and Environmental Monitoring*, Rio de Janeiro, Brasil, setembro de 1994. p. 170-174.
- CHAVEZ, P. S. Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multi-spectral data. In: *Remote Sensing of Environment*, n. 24, 1988. p. 459-479.
- CHD; GEMC. *Ilha dos Guarás (Mariteua) – Município de Curuçá (NE do Pará): aspectos físicos, meteorológicos e oceanográficos*. Companhia Docas do Pará (CDP). Maio, 2004.
- 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. In: *Mangroves and Salt Marshes*. n. 3, 1999. p.9-15.

- 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*. n. 11, 2003. p.223-231.
- COHEN, M.C.L.; BEHLING, H.; LARA, R. Amazonian mangrove dynamics during the last millennium: The relative sea-level and the Little Ice Age. In: *Review of Palaeobotany and Palynology*, n. 136, 2005. p.93-108.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e maio de 2006*. Ministerio do Meio Ambiente. 1ed. Brasília, 2006. 808p.
- COSTA, Marlene Furtado da. *Estudo dos cátions Cálcio, Sódio, Potássio e da salinidade na água intersticial do sedimento do manguezal de Bragança – NE do Pará*. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, CG, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2000.
- COSTA, Mauro Renan Pereira; ALCÂNTARA, Enner Herênio de; AMORIM, Alexsandro de Jesus Ericeira; MOCHEL, Flávia Rebelo. Avaliação das potencialidades e fragilidades das áreas de manguezal para a implementação do ecoturismo usando ferramentas de sensoriamento remoto em Cururupu - MA, Brasil. In: *Caminhos de Geografia*. n. 243, fev. 2006.
- COURA, Samuel Martins da Costa; PIROMAL, Rodrigo Alexandre Sbravatti; CANAVESI, Vanessa; GOMES, Murilo Novaes; QUIRINO, Valquiria Ferraz; PONZONI, Flávio Jorge. Comparação das características espectrais das espécies *Ligustrum japonicum* Thunb. e *Cassia macranthera* DC. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia – Brasil anais, 16-21 abril 2005, INPE, p. 1477-1484.
- CRÓSTA, A. P. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p
- FERREIRA, Leandro V.; ALMEIDA, Samuel S.; AMARAL, Dário D.; PAROLIN, Pia. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da estação científica Ferreira Penna: subsídios para o plano de manejo da floresta nacional de Caxiuanã. In: *Botânica* n. 56: 103-116. São Leopoldo: Instituto Anchieta de Pesquisas, 2005.
- FONSECA, Leila Maria Garcia; LOPES, Eymar Silva S.; YAMAGUCHI, Fernando Y.; VINHAS, Lúbia. *Processamento Digital de Imagens*. Tutorial para cursos. São José dos Campos, INPE, 2000.

- FROIDEFOND, J. M.; SORIANO-SIERRA, E. J. Sensoriamento Remoto sobre Ecossistemas de Manguezal da Ilha de Santa Catarina, Brasil. I: Adequação da Técnica. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador – Brasil anais, 14-19 abril 1996, INPE, p. 157-163.
- GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: *Remote Sensing Reviews* vol. 4, 1988. p. 1-21.
- GONZALES, R. C.; WINTZ, P. *Digital Image Processing*. Addison Wesley, 1987. 431p.
- GÜRTLER, Salete; LUIZ, Alfredo José Barreto; EPIPHANIO, José Carlos Neves. Uniformização de imagens Landsat para previsão de safras agrícolas. In: Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003, INPE, p. 109-116.
- JÄHNE, Bernd. *Digital Image Processing*, 6a ed. Springer, 2005. 600p.
- JENSEN, J.R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. USA. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2a Ed. 1996, 316 p.
- JENSEN, J.R. Remote Sensing of Vegetation. In: *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, 2000. Cap 10.
- KJERVE, B.; LACERDA, L.D. Mangroves of Brazil. In: LACERDA, L.D. (ed.) *Mangrove ecosystems technical reports*, ITTO TS-13, 2, 1993. p. 245-272.
- LARA, R.; SZLAFSZTEIN, C.; COHEN, M. C. L.; BERGER, U.; GLASER, M. Consequences of mangrove dynamics for private land use in Bragança, north Brazil: a case study. In: *Journal of Coastal Conservation*, vol.8, 2002. p. 97-102.
- LARA, R.; COHEN, M. C. L. Sediment porewater salinity and mangrove vegetation height in Bragança, North Brazil: an ecohydrology-based empirical model. In: *Wetlands Ecology and Management*, vol. 14, n. 4. Holanda, 2006. p. 349-358.

- LARA, R.; COHEN, M. C. L. Palaeolimnological studies and ancient maps confirm secular climate fluctuations in Amazonia. In: *Climatic Change*, vol. 94, 2009. p. 399-408.
- LATORRE, Marcelo; JÚNIOR, Osmar Abílio de Carvalho; CARVALHO, Ana Paula Ferreira de; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. In: *Espaço & Geografia*, vol. 5. n. 1, 2002.
- LEINZ, Viktor. Intemperismo. In: *Geologia Geral*. 9. ed. São Paulo: Ed. Nacional, 1985. Cap 3.
- LIMA, Rubens Rodrigues; TOURINHO, Manuel Malheiros. *Várzeas da costa amapaense: principais características e possibilidades agropecuárias*. Belém: FCAP. Serviço de Documentação e Informação, 1994. 56p.
- LUGO, Ariel E.; SNEDAKE, Samuel C. *The Ecology of Mangroves*. Annu. Rev. Ecol. Syst. 1974. 5:39-64.
- MEDINA, E.; GIARRIZZO, T.; MENEZES, M.; CARVALHO Lira, M.; CARVALHO, E.A.; PERES, A.; SILVA BRITO, A.; BRAGA, F.C. Mangal communities of the "Salgado Paraense": Ecological heterogeneity along the Bragança peninsula assessed through soil and leaf analyses. In: *Amazoniana*, vol. 16 n. 3-4. 2001. p. 397-416.
- MENDES, Amilcar C. Geomorfologia e Sedimentologia. In: FERNANDES, Marcus E. B. (Org.). *Os manguezais da costa norte brasileira*. Belém-PA, 2005. p. 13-31.
- MENEZES, M.; BERGER, U.; WORBES, M. Annual growth rings and long-term growth patterns of mangrove trees from the Bragança peninsula, North Brazil. In: *Wetlands Ecology and Management*, vol. 11. 2003. p. 233-242.
- MENESES, Paulo Roberto. Fundamentos da Radiometria Óptica Espectral. In: MENESES, Paulo Roberto; NETTO, José da Silva Madeira (Org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília-DF. Editora UNB, 2001. Cap. 1.
- MOCHEL, F. R.; PONZONI, F. J. Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiçu Bay, Maranhão State. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 79, 2007. p. 683-692.

- MOREIRA, Maurício Alves. *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação*, 2a. ed. Viçosa: Editora UFV, 2003. vol. 1. 307 p.
- MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. In: *Plant, Cell and Environment*, vol. 25, 2002. p. 239–250.
- NASCIMENTO, P. S. de R. *Avaliação de técnicas de segmentação e classificação por regiões em imagens Landsat-TM visando o mapeamento de unidades de paisagem na Amazônia*. São José dos Campos: INPE. 1997.
- PEREIRA, C. T. C. *Caracterização hidrogeoquímica do estuário do rio Curuçá (município de Curuçá – NE do Pará)*. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, CG, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2006.
- PEREIRA, C. T. C.; GIARIZZO, T.; JESUS, A. J.; MARTINELLI, J. M. Caracterização do efluente de cultivo de *Litopenaeus vannamei* no estuário do Rio Curuçá (PA). In: BARROSO, Gilberto Fonseca; POERSH, Luis Henrique da Silva; CAVALLI, Ronaldo Olivera (Org.). *Sistemas de cultivos aquícolas na zona costeira do Brasil: recursos, tecnologias e aspectos ambientais e sócio-econômicos*, 1ª ed. Rio de Janeiro: Museu Nacional, 2007. p. 291-302.
- PEREIRA, Jorge L.G; BATISTA, Getulio T.; ROBERTS, Dar. Reflectância de Coberturas Vegetais na Amazônia. In: Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador – Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 551-556.
- PIRES, J.M.; KOURY, Humberto M. Estudo de um trecho de mata de várzea próximo de Belém. In: *Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Norte*, n. 36. Belém, 1958.
- PIRES-O'BRIEN, Maria Joaquina; O'BRIEN, Carl Michael. A Floresta Tropical da Amazônia: Presente e Passado. In: *Ecologia e Mapeamento de Florestas Tropicais*. Ministério da Educação e do Desporto – Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, 1995. Cap. 7.
- PONZONI, F.J.; GONÇALVES, J.L.M. *Caracterização espectral de sintomas relacionados às deficiências de nitrogênio (N), fósforo (P) e de Potássio (K) em mudas de Eucalyptus saligna*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 1997.
- PONZONI, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, Paulo Roberto; NETTO, José da Silva Madeira (Org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília-DF. Editora UNB, 2001. Cap. 5.

- PONZONI, F.J. *Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a Mata Atlântica*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2002.
- PONZONI, F. J.; GOMES, Alessandra Rodrigues; MALDONADO, Francisco Dario; SASSAGAWA, Hiromi Suzana Yamasaki; NUMATA, Izaya, ARAÚJO, Luciana Spinelli de. Comparação entre o fator de reflectância bidirecional de um dossel de mudas de *Eucalyptus grandis* e o fator de reflectância direcional hemisférico de suas folhas isoladas. In: *Cerne*, n.1, vol.8, 2002. p. 59-68.
- PRANCE, G.T. *Notes on the vegetation of Amazonia III: The terminology of Amazonian Forest Types subject to inundation*. New York Botanical Garden: Brittonia, 1979. p. 26-38.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, E. S. Fotossíntese. In: *Biologia Vegetal*. 5ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. Cap 7.
- RIBEIRO, Raimundo Nonato da Silveira; SANTANA, Antônio Cordeiro de; TOURINHO, Manoel Malheiros. Análise exploratória da socioeconomia de sistemas agroflorestais em várzea flúvio-marinha, Cametá-Pará, Brasil. In: *Rev. Econ. Sociol. Rural* n.1, vol.42. Jan./Mar. 2004.
- RICHARDS, John A.; JIA, Xiuping. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, 4^a ed. Heidelberg Berlin: Springer-Verlag, 2006. 454 p.
- SALES, Gil Mendes. *Ecologia da Paisagem da ilha do Mosqueiro, NE do estado do Pará*. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, CG, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2005.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Yara; CINTRON-MOLERO, Gilberto; ADAIME, Raquel Rothleder; CAMARGO, Tânia Maria de. Variability of Mangrove Ecosystems along the Brazilian Coast. In: *Estuaries*. vol. 13, n. 2, 1990 p. 204-218.
- SIOLI, Harald. Alguns resultados e problemas da limnologia amazônica. In: *Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Norte*, n. 24, Belém, 1951. p. 1 – 44.

- SOUSA, Claudia Linhares de; PONZONI, F. J. Considerações sobre transformação de dados orbitais para estimativas do índice de área foliar (IAF). In: Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 965-968.
- SOUZA FILHO, P.W.M; EL-ROBRINI M. Geomorphology of the Bragança coastal zone, northeastern Pará state. In: *Revista Brasileira de Geociências*. Setembro de 2000. p. 522-526.
- SOUZA FILHO, P.W.M. *Avaliação e aplicação de dados de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, Bragança, Norte do Brasil*. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, CG, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2000.
- SOUZA FILHO, P.W.M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. In: *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 4, n.25, 2005 p. 427-435.
- SURGIK, A. C. S. Legal Aspects of Amazonian floodplain (várzea) conservation: opportunities and difficulties of the commons management. In: 11th Biennial Conference of International Association for the Study of Common Property, Bali, Indonesia 2006.
- SZLAFSZTEIN, C.F.; LARA, R.J.; COHEN, M.C.L. 2000. Coastal management: some studies of the past and present of the Bragança region (Pará, Brazil). *The MADAM project*. J. Int. Environ. Creation, n.2, 2000. p.132-139.
- VANNUCCI, Marta. *Os manguezais e nós*. 2^a ed. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2002. 304 p.
- VENTURIERI, Adriano; WATRIN, Orlando dos Santos; ROCHA, Ana Maria Águila da; SILVA, Benedito Nelson Rodrigues da. Avaliação da Dinâmica da Paisagem da Ilha do Mosqueiro, Município de Belém, Pará. In: Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil 11-18 setembro 1998, INPE, p. 247-256.
- VIEIRA, Lucio Salgado; SANTOS, Walmir Hugo P. dos; FALESI, Ítalo Claudio; OLIVEIRA FILHO João Pedro S. Levantamento de reconhecimento dos solos da Região Bragantina, estado do Pará. In: *Boletim Técnico do Instituto de Pesquisas e Experimentação Agropecuárias do Norte*, n. 47. Belém, 1967.

VISNADI, Sandra Regina. Marchantiophyta e Bryophyta de manguezais do estado de São Paulo, Brasil. In: *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais*, vol. 3, n. 1. Belém, 2008. p. 69-80.

YAN, Liao; GUIZHU, Chen. Physiological adaptability of three mangrove species to salt Stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6), 2208–2214.