

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

ELIZABETH DELL' ORTO E SILVA

**SENSORIAMENTO REMOTO POR MEIO DE UMA AERONAVE  
REMOTAMENTE PILOTADA PARA ESTUDO DO MANGUEZAL DA  
BAÍA DE VITÓRIA (ES)**

VITÓRIA  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

ELIZABETH DELL' ORTO E SILVA

**SENSORIAMENTO REMOTO POR MEIO DE UMA AERONAVE  
REMOTAMENTE PILOTADA PARA ESTUDO DO MANGUEZAL DA  
BAÍA DE VITÓRIA (ES)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Dr<sup>a</sup>. Mônica Maria Pereira Tognella

VITÓRIA  
2018

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

Gostaria de agradecer minha orientadora Mônica Tognella pela confiança depositada em mim, por todo o apoio ao longo desse árduo caminho e pelos seus apontamentos e direcionamentos, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a minha família pelo incentivo e por me ajudar a cuidar dos meus filhos para que eu pudesse ter tranquilidade para ir à campo e estudar, e em especial ao meu marido sempre disposto a fazer tudo por mim.

Ao Professor Alexandre Xavier pela imensa ajuda no processamento das imagens, por sua gentileza e boa vontade em me ajudar. Também é preciso agradecer aos Professores do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) pela imprescindível ajuda na obtenção das imagens, em especial a Professora Angélica Tedesco, Luis Eduardo Martins de Lima, Geraldo Passos Amorim, Wimerson Bazan e Aurélio Azevedo Barreto Neto. Aos alunos bolsistas do Laboratório de Tecnologia Sociais (Labtec) do Ifes pela ajuda no campo, ao Lennon por pilotar a RPA, a Paula, Filipe, Sarah, Janaína e todos os outros colegas que me ajudaram e que tornaram o campo divertido e alegre. Aos alunos do curso de Engenharia Elétrica do Ifes Gabriel Ramos pela ajuda no campo e também nos reparos da RPA, e a Juliana pela ajuda no Matlab.

Agradeço também ao Sr. Rubens morador de Porto Novo que nos acompanhou em alguns momentos do campo, tornando-o mais seguro, ao Nenem que me levou tantas vezes de barco para o mangue e me ajudou na coleta dos dados de estrutura.

As colegas da pós-graduação sempre dispostas em ajudar, tanto no campo quanto na análise dos dados, em especial a Sávvia, Gabriela e Karen. Agradeço também ao Ricardo Servino pela sua boa vontade nas idas à campo e sempre disposto a colaborar.

Agradeço também ao professor Mauro Antônio Homem com suas dicas a respeito do processo de calibração radiométrica. Agradeço imensamente ao professor Nilton Imai pelos seus apontamentos importantíssimos para o meu amadurecimento intelectual e desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também a sua aluna doutoranda Gabriela Miyoshi que muito me ajudou.

Enfim, a todos que de alguma forma colaboraram com o desenvolvimento desta pesquisa meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O ecossistema manguezal fornece vários serviços ecológicos e econômicos, mas estão entre os ecossistemas mais ameaçados e vulneráveis do mundo. Eles se tornaram foco da atenção no contexto das atuais mudanças climáticas e discussões dos serviços fornecidos por esse ecossistema, como o sequestro de carbono. Neste contexto, o sensoriamento remoto é uma importante ferramenta para detectar, identificar, mapear e monitorar o ecossistema manguezal. É possível obter informações como a densidade e altura das árvores, a dominância de espécies, avaliar processos erosivos, estudar a dinâmica populacional da vegetação, cálculo de biomassa, entre outros estudos. Tais estudos podem ser baseados em diferentes sensores, como fotografia aérea, imagens ópticas de alta e média resolução, dados hiperespectrais e dados de microondas ativos (SAR). A aquisição de dados por meio de sensores orbitais possui algumas lacunas como tempo de revisita e resolução espacial. Já os sensores ópticos multiespectrais de alta resolução espacial embarcados em uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) é uma tecnologia promissora para o mapeamento detalhado de ecossistemas costeiros embora o processo de calibração radiométrica ainda seja desafiador. Nesta pesquisa utilizou-se ortomosaicos obtidos por uma RPA para análise multiespectral do manguezal da Baía de Vitória e realizou-se análise hiperespectral foliar de três espécies de mangue; *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana* por meio de espectrorradiometria em laboratório.

## ABSTRACT

The mangrove ecosystem provides several ecological and economic services, but they are among the most threatened and vulnerable ecosystems in the world. They have become the focus of attention in the context of current climate change and discussions of the services provided by this ecosystem, such as carbon sequestration. In this context, remote sensing is an important tool to detect, identify, map and monitor the mangrove ecosystem. It is possible to obtain information such as tree density and height, species dominance, evaluate erosive processes, study the population dynamics of the vegetation, biomass calculation, among other studies. Such studies may be based on different sensors, such as aerial photography, high and medium resolution optical images, hyperspectral data and active microwave data (SAR). The acquisition of data through orbital sensors has some gaps such as revisiting time and spatial resolution. On the other hand, the high-resolution multispectral optical sensors on-board in a Unmanned Aerial Vehicles (UAV) is a promising technology for the detailed mapping of coastal ecosystems although the radiometric calibration process is still challenging. In this research we used ortomosaics obtained by an UAV for the multispectral analysis of the mangrove of Vitória Bay and we carried out hyperspectral analysis of three mangrove species; *R. mangle*, *L. racemosa* and *A. schaueriana* by means of spectroradiometry in the laboratory.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO 1

<b>Figura 1:</b>	Identificação das áreas de estudo (1 - Areia Branca; 2 - Santa Maria; 3 - Porto de Santana; e 4 - Porto Novo) localizadas no manguezal da Baía de Vitória, município de Cariacica (ES).....	16
<b>Figura 2:</b>	Curvas características da reflectância de duas espécies de mangue. Fonte: Kuenzer et al, 2011.....	20
<b>Figura 3:</b>	Corte paradérmico da epiderme da folha das espécies de <i>R. mangle</i> , <i>L. racemosa</i> e <i>A. schaueriana</i> (esquerda para direita). Fonte: Lucena et al. (2011).....	21

### CAPITULO 2

<b>Figura 1:</b>	RPA utilizada na pesquisa (Hexacóptero, modelo X 700).....	32
<b>Figura 2:</b>	Plano de voo realizado no software livre <i>Mission Planner</i> 1.3.41.....	35
<b>Figura 3:</b>	Descrição da localização geográfica dos pontos de apoio em cada uma das áreas de estudo.....	37
<b>Figura 4:</b>	Pontos de apoio.....	38
<b>Figura 5:</b>	Pontos de apoio confeccionados para água.....	38
<b>Figura 6:</b>	Simulação de bandas do sensor Tetracam ADC <i>Snap</i> . FR_1 é referente a Função de Resposta da banda verde, FR_2 referente a banda vermelha e FR_3 referente a banda do infravermelho próximo.....	41
<b>Figura 7:</b>	Comportamento espectral dos materiais nylon, teflon e E.V.A para identificação do comportamento espectral mais homogêneo nos comprimentos de ondas de onda registrados pelo sensor.....	42
<b>Figura 8:</b>	A – Imagem do alvo branco de E.V.A processada com a matrix padrão da câmera. B - Imagem do alvo branco de E.V.A processada com uma matrix simples, sem correção.....	43
<b>Figura 9:</b>	Perfil de elevação da rota registrada pelo <i>log</i> . de voo plotado no aplicativo <i>Google earth</i> . Área de Santa Maria.....	46
<b>Figura 10:</b>	Diferenças de intensidade de brilho em fotos aéreas provocadas por efeito de retroespalhamento.....	47
<b>Figura 11:</b>	Imperfeições radiométricas ( <i>hot spot</i> ) causada nas imagens aéreas.....	47
<b>Figura 12:</b>	Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Santa Maria.....	48
<b>Figura 13:</b>	Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Areia Branca.....	49
<b>Figura 14:</b>	Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Porto Santana.....	50
<b>Figura 15:</b>	Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Porto Novo.....	51
<b>Figura 16:</b>	Identificação das espécies <i>R. mangle</i> e <i>L. racemosa</i> pelas diferenças de textura, forma e tonalidade.....	52
<b>Figura 17:</b>	Identificação da espécie <i>A. shaueriana</i> . A tonalidade desta espécie é mais acinzentada.....	52
<b>Figura 18:</b>	Colonização de uma área do bosque por indivíduos jovens de <i>R.</i>	

	<i>mangle</i> (à esquerda), e outra área do bosque onde está ocorrendo a morte de indivíduos (à direita).....	53
<b>Figura 19:</b>	Modelo estereoscópico criado a partir de um par de ortofotos. A visão tridimensional pode ser obtida utilizando um óculos anáglifo.....	53
<b>Figura 20:</b>	MDS da área de Santa Maria.....	54
<b>Figura 21:</b>	MDS da área de Areia Branca.....	55
<b>Figura 22:</b>	MDS da área de Porto Santana.....	56
<b>Figura 23:</b>	MDS da área de Porto Novo.....	56

### CAPITULO 3

<b>Figura 1a:</b>	Ortomosaicos e Imagens NDVI e SAVI para quatro áreas de estudo no manguezal da Baía de Vitória. Os mapas da superior são da área de Santa Maria, e parte inferior da área de Areia Branca.....	70
<b>Figura 1b:</b>	Ortomosaicos e Imagens NDVI e SAVI para quatro áreas de estudo no manguezal da Baía de Vitória. Os mapas da superior são da área de Porto Santana, e parte inferior da área de Porto Novo.....	71
<b>Figura 2:</b>	Dominância de indivíduos de <i>R. mangle</i> (Rz), <i>L. racemosa</i> (Lg) e <i>Avicennia schaueriana</i> (Av) das quatro áreas de estudo.....	72
<b>Figura 3:</b>	Valores médios de altura (m) e diâmetro médio (cm) para as parcelas das quatro áreas de estudo.....	73
<b>Figura 4:</b>	Imagem de reflectância ( <i>RapidEye</i> ) com composição RGB 532.....	75
<b>Figura 5:</b>	Imagens de índice de vegetação SAVI; a imagem à esquerda é referente ao sensor Tetracam ADC <i>Snap</i> , e a imagem à direita referente ao satélite <i>RapidEye</i> .....	76
<b>Figura 6:</b>	Função de Resposta Espectral dos sensores Tetracam ADC <i>Snap</i> e <i>RapidEye</i> conjuntamente com a resposta espectral do mangue (objeto de estudo).....	77

### CAPITULO 4

<b>Figura 1:</b>	Análise de variância (ANOVA) dos índices de clorofila a, b e total entre as espécies <i>L. racemosa</i> , <i>R. mangle</i> e <i>A. schaueriana</i> ( $P < 0,05$ )...	88
<b>Figura 2:</b>	Análise de variância (ANOVA) dos índices de clorofila a, b e total entre as estações de estudo para a espécie <i>L. racemosa</i> .....	89
<b>Figura 3:</b>	Análise de variância (ANOVA) dos índices de clorofila a, b e total entre as estações de estudo para a espécie <i>R. mangle</i> .....	89
<b>Figura 4:</b>	Reflectância média de três espécies de mangue identificados na Baía de Vitória.....	91
<b>Figura 5a:</b>	Reflectância média de <i>R. mangle</i> nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST).....	92
<b>Figura 5b:</b>	Reflectância média de <i>R. mangle</i> nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST). No eixo x do gráfico, os comprimentos de onda foram restringidos em 350 a 1000 mn para facilitar a visualização das respostas espectrais nas regiões do azul e vermelho.....	92
<b>Figura 6a:</b>	Reflectância média de <i>A. schaueriana</i> nas estações de Areia Branca	

	(AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST).....	93
<b>Figura 6b:</b>	Reflectância média de <i>A. schaueriana</i> nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST). No eixo x do gráfico, os comprimentos de onda foram restringidos em 350 a 1000 nm para facilitar a visualização das respostas espectrais nas regiões do azul e vermelho.....	94
<b>Figura 7:</b>	Primeira derivada da curva média de reflectância para três espécies de mangue; <i>R. mangle</i> , <i>L. racemosa</i> e <i>A. schaueriana</i> .....	95
<b>Figura 8a:</b>	Curvas espectrais da reflectância máxima da primeira derivada para as espécies <i>R. mangle</i> .....	96
<b>Figura 8b:</b>	Curvas espectrais da reflectância máxima da primeira derivada para as espécies <i>L. racemosa</i> .....	97
<b>Figura 9:</b>	Análise de correlação clorofila b e reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho para a espécie <i>R. mangle</i> .....	97
<b>Figura 10:</b>	Análise de correlação clorofila b e reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho para a espécie <i>L. racemosa</i> (à esquerda). Análise de correlação clorofila total e reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho para a espécie <i>L. racemosa</i> (à direita).....	98
<b>Figura 11:</b>	Coefficientes de correlação (r) entre a reflectância espectral nos 2150 canais discretos e índices de clorofila para a espécie <i>R. mangle</i> .....	99
<b>Figura 12:</b>	Coefficientes de correlação (r) entre a reflectância espectral nos 2150 canais discretos e índices de clorofila para a espécie <i>L. racemosa</i> .....	99
<b>Figura 13:</b>	Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 1792 e 1973 nm) e clorofila a para a espécie <i>R. mangle</i> (à esquerda). Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 603 e 605 nm) e clorofila b para a espécie <i>R. mangle</i> (à direita).....	100
<b>Figura 14:</b>	Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 391 e 396 nm) e clorofila a para a espécie <i>L. racemosa</i> (à esquerda). Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 736 e 821 nm) e clorofila b para a espécie <i>L. racemosa</i> (à direita).....	101



## LISTA DE TABELAS

### CAPITULO 1

<b>Tabela 1:</b>	Índices de vegetação.....	23
------------------	---------------------------	----

### CAPITULO 2

<b>Tabela 1:</b>	Planos de voo das quatro áreas sobrevoadas.....	35
<b>Tabela 2:</b>	Descrição dos registros de fotos aéreas planejadas, registradas e alinhadas pelo software aerofotogramétrico.....	45

### CAPITULO 3

<b>Tabela 1:</b>	Dados de estrutura e índice de vegetação das quatro áreas de estudo. RZ, <i>Rizophora mangle</i> ; LG, <i>Laguncularia racemosa</i> ; IAF, Índice de área foliar; DAP, Diâmetro a altura do peito; F, mangue de franja; B, mangue de bacia.....	72
<b>Tabela 2:</b>	Coefficiente de determinação ( $r^2$ ) da regressão da variável dependente IAF e das variáveis independentes NDVI e SAVI de imagens RPA e de imagem <i>RapidEye</i> .....	75

### CAPITULO 4

<b>Tabela 1:</b>	Índices de clorofila ( <i>Chla</i> , <i>Clhb</i> e <i>TChl</i> ) das espécies <i>R. mangle</i> e <i>L. racemosa</i> .....	87
------------------	---	----

## SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	11
1.1. OBJETIVO GERAL.....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
1.3. HIPÓTESE .....	15
1.4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
1.5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	16
1.5.1. Grandezas Radiométricas.....	16
1.5.2. Calibração Radiométrica de Sensores.....	18
1.5.3. Interação da Radiação Eletromagnética com a Vegetação.....	19
1.5.4. Análise de dados espectrais – Índices de vegetação.....	21
1.6. REFERENCIAS .....	24
<b>2. CAPÍTULO 2 - AQUISIÇÃO DE IMAGENS AÉREAS OBTIDAS POR UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL DO MANGUEZAL DA BAÍA DE VITÓRIA</b> .....	27
2.1. INTRODUÇÃO .....	29
2.2. MÉTODOS E PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE UM ORTOMOSAICO GEOREFERENCIADO COM VALORES DE REFLECTÂNCIA .....	32
2.2.1. Planejamento do Voo .....	33
2.2.2. Autoriação do Voo.....	39
2.2.3. Análise de Sensibilidade do Sensor.....	40
2.2.4. Calibração Radiométrica.....	41
2.2.5. Efeito Vinhete .....	43
2.3. RESULTADOS.....	44
2.3.1. Processamento e Análise dos dados .....	44
2.4. CONCLUSÕES .....	57
2.5. REFERENCIAS .....	58
<b>3. ESTIMATIVAS DE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR MEIO DE IMAGENS OBTIDAS POR UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA EM UM MANGUEZAL URBANO DA BAÍA DE VITÓRIA</b> .....	62
3.1. INTRODUÇÃO .....	64
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	69
3.4. CONCLUSÃO .....	78

<b>3.5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
<b>4. CAPITULO 4 - ANÁLISE HIPERESPECTRAL DE TRÊS ESPÉCIES DE MANGUE LOCALIZADAS NA BAÍA DE VITÓRIA E IDENTIFICAÇÃO DE BANDAS ESPECTRAIS PARA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES NOS PIGMENTOS DE CLOROFILA A, B E TOTAL.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1. Introdução.....</b>	<b>83</b>
<b>4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.1. Coleta em campo e Processamento dos dados .....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.2. Análise das bandas estreitas .....</b>	<b>86</b>
<b>4.2.3. Análise Estatística .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>4.4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>4.5. REFERENCIAS .....</b>	<b>103</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O ecossistema manguezal geralmente encontra-se associado às margens de baías, enseadas, barras fluviais, desembocaduras de rios, lagunas e reentrâncias costeiras, onde haja encontro de águas de rios com a do mar, ou diretamente expostos à linha de costa. São sistemas funcionalmente complexos, altamente resilientes e resistentes. A cobertura vegetal, ao contrário do que acontece nas praias arenosas e nas dunas, se instala em substratos de vasa de formação recente, de pequena declividade, sob à ação diárias das marés (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2000).

Kannan et al. (1998) afirmam que os manguezais são os mais importantes ecossistemas costeiros do mundo em termos de produtividade primária e proteção costeira. Os manguezais fornecem às águas costeiras grandes quantidades de detritos orgânicos que servem de base às cadeias alimentares; protegem a linha de costa e a margem dos estuários contra a erosão; protegem as áreas ribeirinhas contra as enchentes; servem de refúgio para várias espécies animais ameaçadas de extinção como aves marinhas, répteis e mamíferos; geram recursos naturais primários para as populações locais através da exploração de sua fauna e de sua flora (Lacerda, 1984), produzindo por exemplo, vários produtos como: remédios, álcool, adoçantes, óleos e tanino, que em Vitória é um dos componentes principais para a confecção de painéis de barro, sendo essa uma das principais marcas da expressão cultural capixaba.

De acordo com Twilley et al. (1998), podemos avaliar os manguezais dentro de diferentes compartimentos ou escalas espaciais. O primeiro deles seria a escala global, onde a temperatura é responsável pela ocorrência latitudinal dos manguezais e sob a diversidade de espécies (diminui em relação as altas latitudes). Acrescentamos ainda, sobre o efeito da temperatura atmosférica, as correntes oceanográficas que limitam ou expandem a distribuição para as altas latitudes em todo o globo. O segundo nível hierárquico, após o nível global, é denominado de hierarquia geomorfológica importante para gestão ambiental costeira. Nessa escala, encontra-se a influência do microclima, das marés e dos processos geológicos locais, como subsidência, erosão, deposição, entre outros.

Ainda de acordo com Twilley et al. (1998), o terceiro nível hierárquico consiste em uma escala maior de abordagem do manguezal, identifica os diferentes tipos fisiográficos, onde a hidrologia e a topografia terão influência significativa sobre a distribuição das espécies e suas características estruturais e funcionais. O quarto nível envolve a unidade de habitat e os parâmetros ambientais que vão agir diretamente, como os processos fisiológicos e composições petrográficas, mineralógicas e cristalográficas dos substratos.

Os diferentes níveis de escala espacial aplicadas ao estudo do manguezal estão diretamente relacionados aos níveis de observações temporais, passando da escala horária, anual, decadal e secular. Para auxiliar nessas interpretações e no estabelecimento da melhor escala de trabalho para o estudo específico, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto são excelentes ferramentas que contribuem no processo de definição do plano amostral, e de forma abrangente à gestão ambiental.

Segundo Lévêque (2001) os meios de observação espacial possibilitam uma avaliação das florestas numa escala além das parcelas ou estação amostral, são úteis para observações de alterações no uso e ocupação do solo, nas modificações dos sistemas costeiros e deltaicos

permitindo a reconstrução da história da região de uma forma mais barata que a prospecção geológica. Com o aumento da eficiência dessas ferramentas, há uma infinita gama de ações que podem auxiliar no entendimento da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas.

A análise de fotografias aéreas é um instrumento que produz informações significativas assim como as imagens de satélites de alta resolução, e algumas situações estão disponíveis em órgãos municipais, estaduais e federais. Entretanto, não são todos os locais que possuem essa base de informação ou que as mesmas se encontrem numa escala compatível com os objetivos do estudo.

Segundo Kuenzer et al. (2011) durante várias décadas a fotografia aérea foi a tecnologia de sensoriamento remoto dominante para estudos dos ecossistemas, porém poucos estudos sobre os manguezais foram publicados. A ausência de publicações ou apresentações apropriadas dificultaram uma visão geral dos estudos realizados. O sensoriamento remoto orbital durante as décadas de 70 e 80 fez com que os estudos usando fotos aéreas fossem esquecidos, no entanto, novas abordagens aerofotogramétricas têm sido utilizadas atualmente para observações do mangue.

De acordo com Tognella de Rosa et al. (2007), as imagens aéreas são um instrumento importante de estudo, pois permitem a visualização espacial da distribuição de espécies, altura e densidade das árvores permitindo ao pesquisador estabelecer o posicionamento das parcelas ou estações de estudo. A textura, a cor e a granulometria observadas nessas imagens permitem identificar padrões de distribuição similares ou não numa macroescala e, posteriormente, aferir a hipótese em campo. Ainda é possível dimensionar o trabalho de campo, diminuindo o erro por causa da escala de trabalho, ao selecionar o local de amostragem.

O mapeamento em escalas grandes por meio de fotografias aéreas permite ao pesquisador obter informações espaço-temporais anteriores aos levantamentos de dados em campo, possibilitam uma reconstrução histórica das mudanças geomorfológicas da planície costeira e do manguezal. Por esta razão, a fotografia aérea é uma excelente fonte local de informação regional, aliadas aos dados de campo vão constituir uma importante ferramenta de monitoramento ambiental e gestão costeira.

A partir da visão tridimensional do manguezal obtida por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT) é possível delimitar um provável derramamento de óleo nesse ecossistema, inferir sobre a densidade e altura das árvores, dominância das espécies, determinação no padrão de zonação, e até mesmo delimitar o padrão de alagamento no mangue. Também é possível identificar processos erosivos, estudar a dinâmica populacional da vegetação fazendo um acompanhamento do crescimento das plântulas do mangue.

Novas abordagens com relação ao uso de fotografia aérea têm sido aplicadas para observações de manguezais neste último milênio. Dezesete estudos realizados em seis países (Austrália, EUA, Sri Lanka, Panamá, Quênia e Venezuela) foram revisados; a maioria deles foi realizada depois de 2000. Na década de 1990, apenas Everitt e seus colegas conduziram estudos detalhados sobre a Costa do Golfo do Texas usando imagens aéreas na região do infravermelho próximo (KUENZER ET AL., 2011).

Lucas et al. (2002) avaliaram a dinâmica temporal dos manguezais ao longo do *West Alligator River*, na Austrália, com uma ferramenta de classificação ISODATA não supervisionada utilizando ortomosaicos digitais, derivados de fotos aéreas em níveis de cinza obtidas em

1950 e fotografia colorida estéreo obtida em 1991. Os autores afirmam que foi difícil obter estimativas de altura das árvores por meio do Modelo Digital de Superfície (MDS) de 1950. Porém, os valores de altura derivados do MDS de 1991 apresentaram correspondência geral com informações de altura do dossel coletados em campo.

Lignon et al. (2008) utilizaram uma série histórica de fotografias aéreas e imagens de satélite para avaliarem as respostas da cobertura vegetal dos bosques de mangue do estado de São Paulo aos impactos naturais e antrópicos de diversas origens. A fim de se destacar as alterações ocorridas nos manguezais ao longo do tempo, os autores realizaram composições coloridas a partir de fotografias, como também classificações não automáticas (visual) e quantificação (medida de classe), a partir da interpretação direta na tela do computador e criação de polígonos (edição vetorial) em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Menghini (2008) realizou estudos de recomposição natural dos manguezais da Ilha de Barnabé impactados por derramamento e combustão de produto químico por meio de fotografias aéreas. A análise temporal dessas fotografias mostrou os diversos impactos ocorridos na região com formação de clareiras na vegetação e recomposição natural parcial.

Devido a rápida evolução das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), a melhora na autonomia de voo e a possibilidade de uso de diversos tipos de sensores embarcados abriu-se uma perspectiva interessante de mapeamento de áreas de manguezal por meio desses veículos. Soma-se a isso, o desenvolvimento de robustos softwares na área de aerofotogrametria para processamento das imagens e o baixo custo dos equipamentos e da operação. No entanto, a viabilidade de obtenção de imagens por meio desta tecnologia possui restrições, como a atual legislação que regulamenta o uso de RPA, as condições meteorológicas no momento do voo e a instabilidade da aeronave devido ao Sistema de Satélite de Navegação Global (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) e o Sistema de Navegação Inercial.

A carga útil da RPA pode vir acompanhada de uma câmara calibrada para aplicações de mapeamento multiespectral incluindo as bandas espectrais do visível (bandas *red*, *green* e *blue*) e infravermelho próximo (NIR). Segundo Silva et al. (2009), a disponibilidade de diferentes bandas espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, em conjunto com os modos de operação dos diversos sistemas sensores. Quanto mais bandas espectrais dispuserem um sistema sensor, mais informações ele fornecerá.

Uma importante aplicação dos dados obtidos remotamente tem sido a detecção de diferenças na reflectância do dossel, relacionadas à densidade da cobertura vegetal. A radiometria espectral é uma das mais importantes áreas do Sensoriamento Remoto, podendo ser efetivada por meio de medidas realizadas em laboratório ou em campo. Ela identifica a intensidade com que cada material, seja um tipo de solo, de rocha ou de vegetação, reflete a radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda do espectro (BRANDÃO et al., 2008).

A energia eletromagnética (REM) interage com a folha a partir da estrutura, principalmente quanto a sua propriedade química (tipos de pigmentos), onde para o estudo do sensoriamento remoto o principal fenômeno é a reflectância, embora o feixe radioativo possa atravessar a folha por completo (transmitância) ou ser parcialmente absorvido no processo de fotossíntese (MENEZES & MADEIRA NETO, 2001).

A calibração radiométrica é o processo de transformação do número digital (ND) de cada pixel da imagem em fator de reflectância ou radiância. Atualmente as imagens fornecidas por sensores orbitais possuem equações prontas para a realização da calibração radiométrica. Essas equações são estudadas e testadas pela academia e pelas empresas que comercializam imagens de satélites. Aliada a isso, os satélites destinados a monitoramento de recursos terrestres estão em uma órbita heliosíncrona, isso quer dizer que o satélite se desloca em torno da Terra com a mesma velocidade de deslocamento da Terra em relação ao Sol, o que garante as mesmas condições de iluminação para a superfície terrestre (FLORENZANO, 2008). Em contrapartida, o processo de calibração de fotografias aéreas obtidas por RPA ainda é insipiente. É necessário a calibração foto a foto, e não da cena inteira como é feito nas imagens orbitais, e as variações de brilho entre as fotos causam problemas para determinadas aplicações devido as variações dos ângulos de atitude por conta da instabilidade do sistema de navegação inercial e GNSS.

Considerando-se a ampla distribuição dos manguezais ao longo do litoral brasileiro, torna-se premente a identificação de técnicas e metodologias a serem empregadas em estudos em diferentes escalas, tanto temporais quanto espaciais. As fotos aéreas adquiridas por meio da RPA possibilitam diversas análises do manguezal a um custo mais baixo quando comparado a aquisição de fotos aéreas no método tradicional ou imagens de satélite. No que tange ao monitoramento ambiental, a análise espaço-temporal do mangue é uma importante ferramenta de gestão. A visão estereoscópica do manguezal ou mesmo a interpretação visual do ortomosaico pode ajudar ao analista na tomada de decisão.

Nesse contexto é que se encaixa a presente pesquisa cujo papel relevante é o uso do Sensoriamento Remoto por meio de uma RPA para mapeamento do manguezal em altíssima resolução espacial, corroborando com a redução de custos no mapeamento e monitoramento desse ecossistema, auxiliando nos trabalhos de campo e permitindo uma análise estrutural e biofísica do manguezal por meio do uso de índices de vegetação (IVs). No segundo capítulo é apresentada metodologia e técnicas para aquisição de fotos aéreas por uma RPA, no terceiro capítulo realizou-se uma análise de correlação de dados estruturais do manguezal coletado em campo com índices de vegetação a partir de imagens de reflectância. O último capítulo apresenta uma análise hiperespectral foliar de três espécies de mangue; *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana* por meio de espectrorradiometria em laboratório, e identificação de bandas estreitas para medição indireta de dados biofísicos.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

Uso de imagens espectrais obtidas por uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) para obtenção indireta de dados estruturais e parâmetros biofísicos do mangue, e análise hiperespectral para identificação das respostas espectrais de três espécies de mangue; *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. Schaueriana* em quatro locais diferentes no manguezal da Baía de Vitória (ES).

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Apresentação metodológica e processos técnicos para aquisição de fotos aéreas por meio de uma RPA;
- Obtenção de imagens espectrais por meio de uma RPA e análise de correlação de índices de vegetação versus dado de estrutura (índice de área foliar);
- Investigação de dados hiperespectrais obtidos por espectrorradiometria para avaliar o comportamento espectral das três espécies de mangue da Baía de Vitória (*R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana*);
- Identificação de uma banda espectral ótima para obtenção indireta de índices de Clorofila (a, b e total).

## 1.3. HIPÓTESE

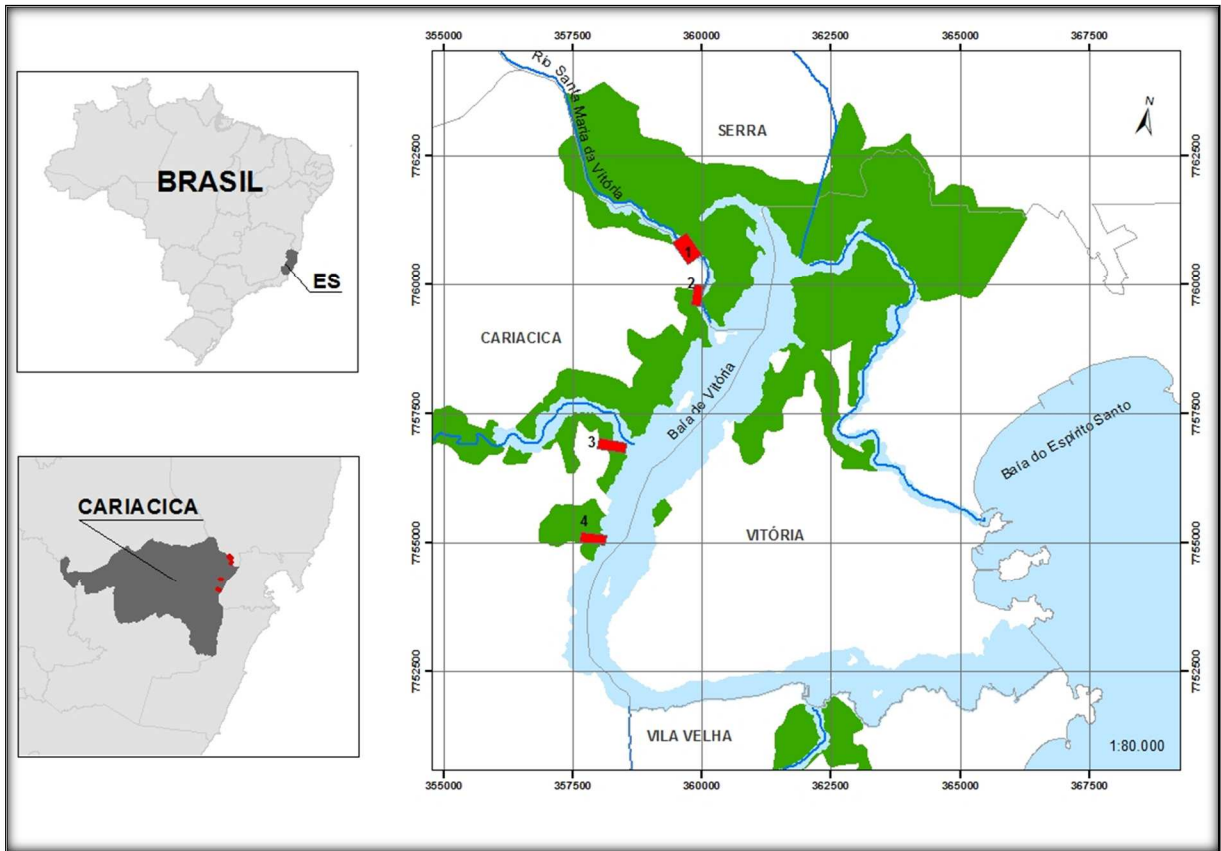
Imagens espectrais obtidas por uma Aeronave Remotamente Pilotada podem ser usadas para obter de forma indireta os parâmetros estruturais e biofísicos do manguezal da Baía de Vitória?

## 1.4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Foram estabelecidas quatro áreas de estudo localizadas no manguezal da Baía de Vitória (ES). Este manguezal abrange os municípios de Vila Velha, Cariacica, Serra e Vitória com área aproximada de 28,7 km<sup>2</sup> (SEAMA, 2018). Porém, as áreas estabelecidas em campo localizam-se somente no município de Cariacica e foram denominadas de Santa Maria, Areia Branca, Porto de Santana e Porto Novo (Figura 1). As duas primeiras estão localizadas próximas ao Bairro de Vila Cajueiro, a noroeste do canal da Baía de Vitória, e as outras duas estão localizadas a sudoeste. O critério de escolha dessas áreas levou em conta o cone de aproximação do aeroporto de Vitória e locais de acesso para decolagem e pouso da RPA.



**Figura 1:** Identificação das áreas de estudo (1 - Areia Branca; 2 - Santa Maria; 3 - Porto de Santana; e 4 - Porto Novo) localizadas no manguezal da Baía de Vitória, município de Cariacica (ES).



## 1.5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.5.1. Grandezas Radiométricas

No processo de interação da radiação com um alvo, a energia eletromagnética (REM) pode ser mensurada e analisada por técnicas de radiometria. Destas grandezas, a fundamental é a energia radiante (Q), a partir do qual são derivadas as demais grandezas, como: radiância (L), irradiância (E), fluxo radiante (f), exitância (M), intensidade radiante (I) (Steffen e Moraes, 1993).

A Irradiância é o fluxo radiante solar incidente na superfície do terreno por área de superfície, medido em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ). Mas, se efetivamente se quiser medir a quantidade de irradiância incidente por área, deve-se integrar as variáveis da atmosfera pela qual a radiação passa. Essa integração é uma função da irradiância solar espectral no topo da atmosfera ( $E_0\lambda$ ), multiplicada pela transmitância atmosférica ( $T_{\theta 0}$ ) num certo ângulo zenital

solar ( $\theta_0$ ), mais a contribuição solar difusa ( $E_d\lambda$ ). Em termos de unidade a irradiância é medida em  $W/m^2\mu m$  (Jensen, 2009).

A radiância espectral nos permite determinar a energia que atravessa uma determinada área, subentendida por um determinado ângulo sólido, em um dado intervalo de tempo e em uma faixa de comprimento de onda. Portanto, a radiância espectral pode ser expressa, por exemplo, em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ . Uma outra grandeza radiométrica também bastante utilizada é o fluxo radiante, definido na Equação 1 (BARRETT; CURTIS, 1999).

$$\Phi_{Rad} = A \cdot \Omega \int_0^{\infty} U(\lambda) d\lambda \quad (Watts) \quad (1)$$

Onde  $U(\lambda)$  é a radiância espectral,  $A$ , uma área arbitrária através da qual é calculado o fluxo e,  $\Omega$  o ângulo sólido subentendido pela área  $A$ . Por exemplo, se considerarmos uma fonte pontual, localizada no centro de uma esfera de área  $A$ , o fluxo luminoso calculado é igual à potência total emitida pela fonte.

O conceito de ângulo sólido é importante em sensoriamento remoto. Ele descreve a convergência ou divergência angular, em três dimensões, do fluxo de ou para uma superfície. O sensor focaliza uma área no terreno cujo tamanho é definido pelo ângulo sólido de visada do sensor. Esse ângulo sólido de visada é definido pela abertura do sistema óptico do sensor, no caso um telescópio portátil, à semelhança da abertura definida pela objetiva de uma máquina fotográfica. Sendo assim, a imagem formada no sensor é uma imagem da radiância. Os valores de radiância são convertidos em valores digitais, gerando a imagem digital (MENEZES ET AL., 2009).

Segundo Lillesand e Kiefer (1994), a reflectância espectral  $[\rho(\lambda)]$ , é uma função do comprimento de onda ( $\lambda$ ), definida matematicamente como a razão entre a energia no comprimento de onda ( $\lambda$ ) refletida pelo objeto  $[E_R(\lambda)]$  e a energia no comprimento de onda ( $\lambda$ ) incidente sobre o objeto  $[E_I(\lambda)]$ , conforme a equação 2.

$$\rho(\lambda) = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \quad (2)$$

Segundo Elachi e Zyl (1987), é importante conhecer o conceito de reflectância difusa associada às superfícies lisas e às superfícies rugosas. A reflectância bidirecional é definida a partir dos efeitos bidirecionais em superfícies naturais, ou seja, da anisotropia através das diferentes condições de geometria, iluminação e visada para um determinado comprimento de onda.

### 1.5.2. Calibração Radiométrica de Sensores

O pré-requisito para a análise quantitativa baseada em medições físicas por sensores aéreos ou satélite é a transformação do número digital para a radiância espectral. A razão entre a radiância ( $M$  [ $\text{W m}^{-2}$ ]) e a irradiância ( $E$  [ $\text{W m}^{-2}$ ]) resulta na chamada refletância. Seguindo a lei de conservação de energia, o valor da refletância está no intervalo entre 0 a 1 (SCHAEPMAN-STRUB.ET AL, 2006).

Segundo Nicodemus et al. (1977) usando um espectrômetro de campo, é possível calcular o fator de refletância para uma superfície desconhecida, por meio da Equação 3:

$$R_T(\theta_t) = \frac{DN_T(t)}{DN_R(t)} R_R(\theta_t) \quad (3)$$

onde  $\theta_t$  é o ângulo do zênite solar no tempo  $t$  e o eixo óptico do espectrômetro é paralelo à superfície normal (ou seja, geometria com aspecto de nadir);  $DN_T(t)$  e  $DN_R(t)$  são os números digitais do espectrômetro (com a corrente escura subtraída) quando o instrumento está visualizando o alvo e a referência, respectivamente, no instante  $t$ ;  $R_R$  é o fator de refletância do painel de referência em relação a uma superfície lambertiana de reflectância unitária.

De acordo com Koukal e Schneider (2010), nos últimos anos, grandes esforços foram feitos para investigar as propriedades de refletância direcional das superfícies. O resultado é uma enorme variedade de modelos que prevêm a refletância direcional para todas as geometrias de visualização. As direções de iluminação e visualização são especificadas por 4 ângulos, o azimute do sol e o ângulo zenital ( $\varphi_s$  e  $\theta_s$ ), bem como o ângulo do azimute e do zênite de visada ( $\varphi_v$  e  $\theta_v$ ). A diferença entre o azimute do sol e o ângulo do azimute de visada é o azimute relativo ( $\varphi_r = \varphi_s - \varphi_v$ ).

A função de distribuição de refletância bidirecional (BRDF) descreve a reflectância de materiais ópticos em função dos ângulos e do comprimento de onda incidentes e dispersos. Nicodemus et al. (1977) apresentou uma abordagem unificada para a especificação de refletância em termos de geometrias de feixes de luz incidentes e refletidas para caracterizar superfícies refletivas difusas e especulares de materiais ópticos. Ele definiu o BRDF como uma função de distribuição relacionando o incidente de irradiância de uma dada direção com a radiância refletida em outra direção. Assim, o BRDF é apresentado em termos radiométricos como a razão entre a radiância ( $L_r$ ) refletida por uma superfície na direção  $(\theta_r, \phi_r)$  e a irradiância incidente ( $E_i$ ) em uma área de superfície unitária de uma direção especificada  $(\theta_i, \phi_i)$  em um determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) expresso matematicamente pela Equação 4:

$$\text{BRDF} = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (4)$$

onde os subscritos *i* e *r* denotam luz incidente e refletida, respectivamente,  $\theta$  é o ângulo zenital, e  $\phi$  é o ângulo azimutal. As unidades do BRDF são  $\text{sr}^{-1}$ .

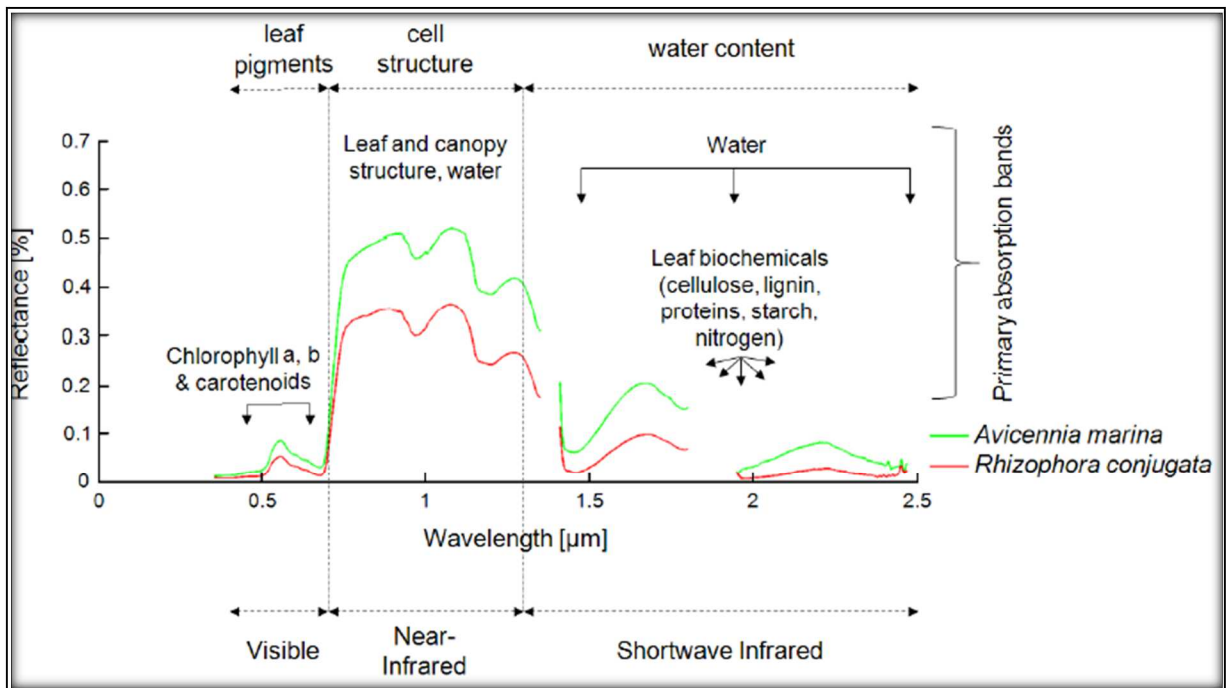
### 1.5.3. Interação da Radiação Eletromagnética com a Vegetação

Para a região do visível os pigmentos fotossintetizantes clorofila *a* e *b* absorvem a REM no comprimento de onda entre 0,43 e 0,66  $\mu\text{m}$  e 0,45 a 0,65  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Esses valores correspondem ao comprimento das faixas azul (B) e vermelho (R), o que leva a folha verde sadia a refletir a cor verde, perceptível aos olhos humanos. A absorção das faixas azul (B) e vermelho (R) é fundamental para o processo de fotossíntese. Todavia se a folha absorvesse outros comprimentos como no Infravermelho próximo (IRp) acabaria por esquentar e danificar as proteínas de maneira irreversível. Assim, refletir ou transmitir o IRp para camadas próximas ou para o solo é uma estratégia vital (JENSEN, 2009).

Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), a reflectância de um objeto é calculada através de fatores que relacionam a intensidade de radiação refletida por um objeto com a intensidade da radiação incidente em dada região do espectro, existindo uma relação inversa entre a quantidade de água presente na folha e a radiação refletida, ou seja, quanto mais água existir no interior da folha, menor é a quantidade de radiação refletida na faixa do Infravermelho próximo (IRp) e Infravermelho médio (IRm).

A partir dos intervalos espectrais do visível (VIS), IRp e IRm a reflectância de um dado objeto apresenta valores distintos, onde cada constituinte da folha interfere na curva de reflectância. Na região do VIS (B-azul, G-verde e R-vermelho) são os constituintes químicos ou pigmentos fotossintetizantes os determinantes, onde os valores de reflectância serão menores e a absorbância será maior principalmente no B e R, e menor no G. Para a região do IRp, a estrutura interna da folha é o fator de maior predominância, onde quanto mais lacunosa for esta, maiores serão os valores da reflectância. No IRm, a presença de água é determinante para essas faixas do espectro, pois quanto maior a quantidade dessa no interior da folha menor será a reflectância e vice-versa, observada a partir do comportamento espectral de uma folha verde sadia (Figura 1).

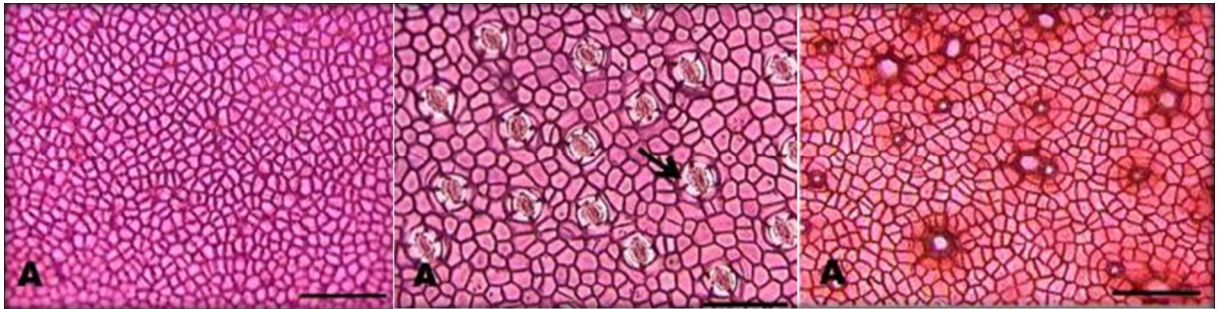
**Figura 2:** Curvas características da reflectância de duas espécies de mangue. Fonte: Kuenzer et al, 2011.



De acordo com Collwell (1974), a resposta espectral de uma folha quando da incidência da REM é influenciada pela morfologia interna e estrutura como a distribuição, quantidade de tecidos e espaço entre as células, bem como a quantidade de pigmentos fotossintetizantes típico de cada espécie.

Lucena et al. (2011) avaliaram a estrutura anatômica de três espécies do manguezal (*Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia schaueriana*) no estuário de Maracáípe, Pernambuco (Figura 2). Os indivíduos de *R. mangle* apresentaram os maiores valores de espessamento da cutícula e epiderme, enquanto que *A. schaueriana* apresentaram os maiores valores para a espessura do parênquima paliçádico, e *L. racemosa* os maiores valores para o espessamento do parênquima esponjo. As três espécies apresentaram características estruturais diferentes com comportamentos distintos de reflectância, absorvância e transmitância.

**Figura 3:** Corte paradérmico da epiderme da folha das espécies de *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana* (esquerda para direita). Fonte: Lucena et al. (2011)



De acordo com Vaiphasa et al. (2005), diferentes espécies de mangue diferem quanto à suas propriedades biofísicas e químicas, como água, celulose e lignina, e conteúdo proteico, bem como os principais pigmentos foliares clorofila a e b e carotenóides. O sinal de resposta espectral também depende da estrutura interna da folha, composta principalmente de parênquima paliádico e mesófilo esponjoso, assim como o número de camadas celulares, espaços intercelulares, interfaces ar-água e tamanho das células.

#### 1.5.4. Análise de dados espectrais – Índices de vegetação

Diversos tipos de agrupamento entre bandas vêm sendo desenvolvidos, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1973). Segundo FONTANA et al. (1998), os índices de vegetação representam uma técnica amplamente usada na área do sensoriamento remoto, por indicarem a presença e as condições da vegetação monitorada, e o sucesso de sua aplicação se fundamenta no fato de que a produção primária de uma comunidade vegetal tem estreita relação com a energia solar absorvida, o que define o desenvolvimento desta comunidade.

O NDVI apresenta grande sensibilidade à resposta espectral da vegetação. Ele calcula a diferença entre os valores refletidos da banda do infravermelho próximo (IRp) e da banda do vermelho (V), normalizada pela soma dos mesmos valores. Este índice pode ser associado a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa verde, ou seja, a quantidade de clorofila.

Tucker (1979) estudou diferentes combinações lineares das bandas do verde, vermelho e IRp para monitorar propriedades como a biomassa, conteúdo de água na folha e conteúdo de clorofila. Ele validou o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que é um índice de vegetação estrutural, muito utilizado para monitoramento agrícola, por apresentar forte correlação linear com o crescimento das culturas. Por outro lado, a razão simples entre o IRp e a banda vermelha (R) fornece uma alta correlação com o desenvolvimento das plantas e com seus estágios de crescimento, sendo esse um dos primeiros índices de vegetação estudados (BIRTH; MCVEY, 1968).

A escolha do comprimento de onda mais adequado está relacionada às características que se deseja avaliar. Algumas vezes pode surgir o efeito de confusão, pois a refletância do dossel no IRp é fortemente dependente das propriedades estruturais (por exemplo, IAF), enquanto no visível é sensível as propriedades bioquímicas, por exemplo, clorofila (ZARCO-TEJADA ET AL., 2001). Para reduzir esse efeito, muitos estudos recentes demonstraram que a quantidade de clorofila da folha pode ser estimada através da combinação de diferentes índices espectrais. Assim, os IV podem ser divididos em índices sensíveis à concentração do pigmento (clorofila) e índices estruturais, que podem ou não ser imunes à influência das propriedades óticas do solo (HABOUDANE ET AL., 2004; BRANDÃO, 2009).

O Índice de Área Foliar (IAF) é um importante parâmetro biofísico da vegetação, sendo definido como a área foliar total projetada por unidade de área de terreno ( $m^2/m^2$ ) (DAUGHTRY ET AL., 1992). Sua importância deve-se à relação com a biomassa vegetal e por caracterizar a arquitetura do dossel, fornecendo informações importantes sobre o vigor da cobertura vegetada. Estas estimativas permitem uma avaliação das condições fisionômicas e fisiológicas dos dosséis e análises quantitativa e qualitativa das trocas energia/matéria ocorridas nos mesmos (HABOUDANE ET AL., 2004).

O uso de dados orbitais constitui-se em um método indireto e não destrutivo para estimativa do IAF. De maneira geral é esperado que quanto maior o IAF, menor o valor de radiância espectral referente as regiões do visível (380 a 720 nm) e do infravermelho médio (1300 a 3000 nm), devido a maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo radiação eletromagnética (REM) incidente e quantidade de água, respectivamente, e maior valor na região do infravermelho próximo, devido ao múltiplo espalhamento entre folhas. Para o cálculo do IAF usando dados espectrais, usamos a equação 5.

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{(0,69 - SAVI)}{0,59}\right)}{0,91} \quad (5)$$

O Índice de Vegetação Ajustada ao Solo (IVAS) é um índice que busca amenizar os efeitos do *background* do solo segundo a expressão (HUETE, 1988), representada pela equação 6:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (6)$$

Onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_V$  equivalem às reflectâncias das bandas 4 e 3 do satélite Landsat 5 TM e o L pode variar entre 0,1 a 0,5 de acordo com as características do dossel analisado.

O SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) foi criado visando amenizar o efeito de solo e se baseia no princípio de que a curva de vegetação tende a aproximar-se da curva de solo para

baixas densidades de vegetação, passando por uma mistura de respostas espectrais para densidades médias e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação (HUETE, 1988). O SAVI consiste na própria fórmula do NDVI, acrescida de uma constante L, que varia de 0 a 1, dependendo do grau da maior ou menor cobertura do solo, respectivamente. Seguindo o mesmo princípio vieram duas modificações do SAVI: o TSAVI (Transformed SAVI) (BARET; GUYOT; MAJOR, 1989), o MSAVI (Modified SAVI) (QI ET AL., 1994) e o OSAVI (Optimized SAVI) (RONDEAUX ET AL., 1996).

Com o surgimento de sensores hiperespectrais, outros índices de vegetação foram criados, como o *Index of Pigment for Simple Reason* (PSRR) que analisa pigmentos fotossintéticos, o *Structure Index for Pigment Insensitive* (SIPI) que analisa a estrutura, conteúdo de água (WI). A Tabela 1 apresenta alguns dos índices de vegetação mais usados para avaliar a estrutura e as características biofísicas.

**Tabela 1:** Índices de vegetação

<b>Índice</b>	<b>Sigla</b>	<b>Equação</b>	<b>Referência</b>
Structure Insensitive Pigment Index	SIPI	$(R800-R445)/(R800-R680)$	Penuelas et al. (1995)
Pigment Specific Simple ratio Chla	PSSRa	$R800/R680$	Blackburn (1998)
Pigment Specific Simple ratio Chlb	PSSRb	$R800/R635$	Blackburn (1998)
Pigment Specific Simple ratio Cars	PSSRc	$R800/R470$	Blackburn (1998)
Photochemical Reflectance Index	PRI	$(R531-R570)/(R531+R570)$	Gammon et al. (1992)
Water Index	WI	$R970/R900$	Penuelas et al. (1997)
Normalized Different Vegetation Index	NDVI	$R(NIR-RED)/R(NIR+RED)$	Rouse et al. (1973)
Soil Adjust Vegetation Index	SAVI	$(1+L)*(NIR-RED)/(L+NIR+RED)$	Huete (1998)

Wang & Souza (2007) investigaram a capacidade de dados hiperespectrais em diagnosticar a condição de estresse entre três espécies de mangue (*R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana*) no Caribe, Panamá. Estes autores identificaram que os comprimentos de onda de 780, 790, 800, 1480, 1530 e 1550nm foram úteis para a classificação das espécies de mangue e as razões de banda (R695/R420, R605/R760, R695/R760 e R710/R760) permitiram determinar a ocorrência de árvores estressadas e não estressadas. Os dados hyperspectrais mostraram ter grande potencial para discriminar dosséis de diferentes espécies de mangue, composição de espécies e para a detecção de estresse.

Estudos que utilizam dados multi e hiperespectrais têm sido priorizados nos últimos anos, na busca do aumento da acurácia nos resultados. Assim, a partir da análise de imagens aéreas em consonância aos espectrorradiômetros tem-se buscado o aprimoramento das técnicas de monitoramento e identificação dos ecossistemas da Terra, dentre eles, o manguezal.



## 1.6. REFERENCIAS

- ALVES JR. L. R.; CÔRTEZ J. B. R.; FERREIRA M. E. F.; SILVA J. R. **Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT.** In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil. 2015.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria.** Curitiba: SBEE, 1998, 243p.
- BARRETT E. C; CURTIS L. F. **Introduction to Environmental Remote Sensing.** Edição 4, Routledge. Nova York. 1999.
- BARRETT, E. C. **Global environment remote sensing.** Reference Reviews, 16(8), 44. 2002.
- BRASIL. **Instrução Suplementar IS 21-002A de 2012.** Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/participacao-social/audiencias-e-consultas-publicas/audiencias-encerradas/2015>>. Acesso em: 07 dez. 2015.
- BRASIL. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil N° 21 e 24 (RBAC 21 e 24) de 2009.** Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/participacao-social/audiencias-e-consultas-publicas/audiencias-encerradas/2015>>. Acesso em: 07 dez. 2015.
- CHANDELIER, R., MARTINOTY, G. **Radiometric aerial triangulation for the equalization of digital aerial images and orthoimages.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. pp 193-200. 2009.
- DEL POZO, S.; RODRIGUEZ-GONZÁLEZ, P.; HERNANDEZ- LÓPEZ, D.; FELIPE-GARCIA, B. **Vicarious Radiometric Calibration of a Multispectral Camera on Board an Unmanned Aerial System.** Remote Sensing. pp 1918-1937. 2014.
- ELACHI, C., ZYL, J. V. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing,** John Wiley and Sons. N. Y. p. 413. 1987.
- GAO, F.; JIN, Y.; LI, X.; SCHAAF, C. B; STRAHLER, A. H. **Bidirectional NDVI and Atmospherically Resistant BRDF Inversion for Vegetation Canopy.** IEEE Transactions on Geoscience and RemoteS, vol. 40, no. 6. 2002.
- GAO, F.; JIN, Y.; LI, X.; SCHAAF, C. B; STRAHLER, A. H. JIN, Y.; LI, X. **Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model.** Remote Sensing of Environment. pp 98–205. 2003.
- HENEBRY, G. M. **Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications.** *Bioscience*, 61(7), 568-569. 2011.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** Tradução de José Carlos N. Epiphanyo, Antonio R. Formagio, Athos R. Santos, Bernardo F. T. 138

JORGE, L.A.C.; INAMASU, R. Y.; CARMO R. B. **Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações de Precisão no Brasil.** In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, Brasil. P 399. 2011.

JUNIOR, L. R. A.; CÔRTEZ J. B. R.; FERREIRA M. E.; SILVA J. R. **Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT.** In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil. 2015.

HAKALA, R.; SUOMALAINEN, J.; PELTONIEMI, J. I. **Acquisition of Bidirectional Reflectance Factor Dataset Using a Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Consumer Camera.** *Remote Sensing*, pp 819-832. 2010.

HONKAVAARA, E., JAAKKOLA, J., MARKELIN, L., PELTONIEMI, J., AHOKAS, E., BECKER, S. **Complete photogrammetric system calibration and evaluation in the Sjököulla test field – case study with DMC.** In *the Proceedings of EuroSDR Commission I and ISPRS Working Group 1/3 Workshop EuroCOW*, 25-27 January 2006, Castelldefels, Spain, unpaginated CD-ROM, 6p. 2006.

KAMAL, M., PHINN, S.; JOHANSEN, K. **Characterizing the spatial structure of mangrove features for optimizing image-based mangrove mapping.** *Remote Sensing*, 6, 984–1006. 2014.

KRAUS, KARL. **Photogrammetry.** Bonn: Dümmler. Volume 1 397 p. 1992.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and image interpretation.** New York: J. Wiley. 1994.

MAIN, R., CHO, M. A., MATHIEU, R., O’KENNEDY, M.M., RAMOELO, A., KOCH, S. **An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2011): 751-761. 2011.

MARKELIN, L., E. HONKAVAARA, PELTONIEMI E. A.; KUITTINEN R.; HYYPPÄ J.; SUOMALAINEN J.; A. Kukko., **Radiometric Calibration and Characterization of Large-format Digital Photogrammetric Sensors in a Test Field.** *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 74 N° 12. pp 1487-1500. 2008.

MARKELIN, L. **Radiometric Calibration, Validation and Correction of Multispectral Photogrammetric Imagery.** Doctoral Dissertation. 2013.

MCCOY, R. M. **Field methods in Remote Sensing.** The Guilford Press. 159 p. 2005.

MILTON, E. J. **Review Article Principles of field spectroscopy.** *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 12, p. 1807–1827, 1987.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação.** São Jose dos Campos, 2001.

NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, R. C.; GINSBERG, J. W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. U.S. Department of Commerce/ National Bureau of Standards. Washington DC: Unites States Government Printing Office. 52 p. 1977.

PHOTOSCAN. V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE. 12- 14. 2014.

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. Silva Vieira. São Paulo. p. 135. 2007.

REBELO-MOCHEL, F.; PONZONI, F. J. **Spectral characterization of mangroves leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State**. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 79. 2007.

REES, W. **Electromagnetic waves in free space**. In: Physical Principles of Remote Sensing. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139017411.003. p. 11-41. 2012.

SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHAEPMAN, M. E.; PAINTER, T. H.; DANGEL, S.; MARTONCHIK, J.V. Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, p. 27-42, 2006.

SILVA D. C. da G.; CANDEIAS A. L. B. **Causas da Iluminação não Uniforme em Fotografias Aéreas Coloridas**. Revista Brasileira de Cartografia No 61/02, 2009.

SILVA, D. C. da G.; TOONSTRA W. A.; SOUZA H. L. S.; PEREIRA T. Á. J. **Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de Vant Processados com os Softwares Aps, Pix4d E**

TETRACAN Inc. 2012,. Disponível em:  
<<http://www.tetracam.com/PDFs/ADC%20SNAP%20Users%20Guide%20V1.1.pdf>>  
Acesso em: 01 mar. 2017.

WALREE, PAUL VAN. Website about Photographic Optics. Disponível em <http://www.vanwalree.com/optics/vignetting.html> acesso em 25.09.2007

## 2. CAPÍTULO 2 - AQUISIÇÃO DE IMAGENS AÉREAS OBTIDAS POR UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL DO MANGUEZAL DA BAÍA DE VITÓRIA

### RESUMO

Os ambientes de manguezais geralmente crescem em áreas remotas, inacessíveis e temporariamente inundadas, por isso o sensoriamento remoto é uma ferramenta importante para a conservação e manejo eficiente desse ecossistema. Imagens de satélite e fotografias aéreas já provaram ser eficientes ao estudo do manguezal, porém houve pouquíssimas tentativas de demonstrar a capacidade das imagens obtidas por uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA). Uma RPA fornece imagens de alta resolução temporal, mesmo em dias nublados, um benefício quando se trabalha em um clima tropical úmido. Em termos de custos do usuário, os custos dos drones são maiores em um primeiro momento, mas isso se torna vantajoso em relação aos dados de satélite quando se trata de monitoramento contínuo e de longo prazo. Se por um lado uma RPA é excelente em relação a resolução espacial permitindo uma escala de trabalho ao nível da árvore, por outro as obtenções de imagens espectrais precisam de modelos de calibração radiométrica sujeitos a erros por uma série de motivos apresentados neste capítulo. Nesta pesquisa utilizou-se uma câmera não métrica Tetracam ADC *Snap* embarcada em uma RPA para mapeamento de quatro estações no manguezal da Baía de Vitória. As fotos aéreas foram processadas em um software fotogramétrico, e obteve-se ortomosaicos, modelos digitais de superfícies (MDS), para estéreos de fotos aéreas, além de imagens de reflectância georeferenciadas. Embora, as condições climáticas durante os voos não tenham sido satisfatórias influenciando negativamente no processamento dos dados, os resultados indicam que imagens obtidas por uma RPA é uma ferramenta promissora para obter modelos preditores de parâmetros biofísicos e estruturais do manguezal contribuindo com o monitoramento desse ecossistema.

## ABSTRACT

Mangrove environments generally grow in remote, inaccessible and temporarily flooded areas, so remote sensing is an important tool for the conservation and efficient management of this ecosystem. Satellite images and aerial photographs have proven to be efficient in the study of mangrove, but there have been very few attempts to demonstrate the ability of images obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV). A UAV provides high temporal resolution images, even on cloudy days, a benefit when working in a humid tropical climate. In terms of user costs, the costs of UAV are higher at first, but this is advantageous over satellite data for continuous and long-term monitoring. If on the one hand an UAV are excellent in relation to the spatial resolution allowing a working scale at the tree level, on the other the obtaining of spectral images need radiometric calibration models subject to errors for a number of reasons presented in this chapter. In this research, a non-metric Tetracam ADC *Snap* camera was used in an UAV for four site mapping in the Bay of Vitória mangrove. Aerial photos were processed in a photogrammetric software, and ortomosaic, digital surface models (MDS), aerial photo stereos, and georeferenced reflectance images were obtained. Although the climatic conditions during the flights were not satisfactory and had a negative effect on the data processing, the results indicate that images obtained by an UAV is a promising tool to obtain predictive models of biophysical and structural parameters of the mangrove forest, contributing to the monitoring of this ecosystem.

## 2.1. INTRODUÇÃO

A importância de inventários de zonas húmidas por meio de mapeamento da distribuição de espécies e comunidades ligadas a essas zonas, permite uma avaliação das mudanças ao longo do tempo e quantificação da biodiversidade. A detecção remota tem um papel essencial para fornecer um método rápido e eficiente de mapeamento desses ecossistemas (KAMAL e PHINN, 2014).

Os ambientes de manguezais geralmente crescem em áreas remotas, inacessíveis e temporariamente inundadas, e a aquisição de dados aéreos é difícil e demorada. Os sensores ópticos multi-espectrais de alta resolução espacial embarcados em uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) é uma tecnologia promissora para o mapeamento detalhado de ecossistemas costeiros, como manguezais.

Os sensores orbitais são mais acessíveis no quesito preço quando comparados aos tradicionais levantamentos aerofotogramétricos, porém segundo Kamal e Phin (2014), mesmo em sensores com alta resolução espacial, as diferentes espécies de manguezais são difíceis de distinguir. Para Rebelo-Mochel e Ponzoni (2007), a identificação de comunidades de manguezais por dados orbitais não é uma tarefa difícil, mas o desafio mais interessante é a identificação das espécies dominantes.

As Aeronave Remotamente Pilotada (RPAs) fornecem vários tipos de dados de sensoriamento remoto de baixo custo, incluindo cor verdadeira, multiespectral, dados hiperespectrais, LiDAR, micro-ondas e térmicos, em altíssimas resoluções espaciais e em períodos de aquisição flexíveis (WALLACE ET AL.2012). Uma RPA é mais flexível e controlável do que o satélite tradicional de sensoriamento remoto em termos de altura de voo, ângulos de visão e sobreposição lateral (ZARCOTEJADA ET AL., 2012).

Foi identificado até o momento vários estudos na área de agricultura de precisão em que imagens obtidas por uma RPA foram aplicadas ao monitoramento de culturas (Manfreda et al, 2018), porém poucos estudos foram encontrados no qual essas imagens são aplicadas ao estudo de florestas. Tian et al., (2017) fizeram uma comparação entre imagens obtidas por um RPA e imagens do satélite WorldView-2 e estimaram o índice de área foliar (IAF) em um manguezal na China. Cao et al., (2017) utilizaram imagens hiperespectrais e MDS para discriminar espécies de mangue usando técnicas de classificação baseada em objeto. Wan et al., (2014) utilizaram imagens de uma RPA para monitoramento de uma espécie invasora, a *Spartina alterniflora* no manguezal na China.

O GNSS/GPS integrado à Unidade de Medição Inercial (IMU) fornece dados da posição e velocidade do sensor, sendo que este último fornece os ângulos de Euler ( $\kappa$ ,  $\omega$  e  $\phi$ ) representando as rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas x, y e z (da câmera) em relação ao sistema global X, Y e Z. A precisão do posicionamento GNSS associado à estabilidade do sistema de giroscópios e acelerômetros é responsável por fornecer uma solução de navegação 3D estável e contínua (DINIZ, 2016).

Segundo Alves Jr. et al. (2014), as RPAs são equipadas com receptor de sinal de navegação (GNSS) e sensor inercial (IMU), porém muitas vezes não conseguem realizar um voo em trajetória retilínea ou mesmo manter a altitude de voo de forma precisa. Por conta disso, as

fotografias tendem a apresentar alguns problemas de escala, além da diminuição do recobrimento lateral e longitudinal, devido à instabilidade de sua atitude (i.e., os ângulos kappa, ômega e phi).

Em cada exposição realizada pela câmara durante o voo, a mesma assume uma orientação angular que pode ser relacionada a algum sistema de coordenadas externo, a tal orientação, denomina-se atitude (OLIVEIRA, 1987). A determinação da atitude se dá pelo conhecimento das coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) da estação de exposição em um dado sistema de coordenadas e pelo conhecimento dos ângulos de rotação da câmara no momento da exposição (orientação angular).

Para qualquer fotografia inclinada existe um único conjunto de ângulos ômega, phi e kappa ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) que define a orientação angular da fotografia em relação ao sistema de coordenadas terrestres a ser adotado (VASCO; RIBEIRO, 2000). A orientação exterior caracteriza a fotografia em relação a um sistema de referência externo, e a orientação interna referencia a fotografia em relação à própria câmara (BRITO; COELHO, 2002). Compõe-se por dois elementos: distância focal calibrada, constante no certificado de calibração da câmara (no caso das câmaras métricas); e coordenadas fotográficas das marcas fiduciais.

As câmaras de pequeno formato não apresentam as marcas fiduciais, dificultando um pouco mais a definição da orientação interior. Entretanto, tais câmaras, assim como as métricas, podem ser calibradas, de modo a definir tais elementos.

Segundo Silva et al. (2014), os softwares de pré-processamento fazem a ligação entre os instantes de tomada das imagens, GNSS e IMU, gerando o chamado arquivo de *log* GPS, fundamental para a etapa de processamento fotogramétrico. Os softwares de processamento fotogramétrico atuais possuem um alto grau de automatização, maior que na fotogrametria convencional, com a utilização de softwares vindos de visão computacional capazes de processar uma grande quantidade de imagens embora tenham limitação quanto ao tamanho da imagem.

Li et al. (2014) afirmam que devido à instabilidade da aeronave remotamente pilotada (grandes variações angulares na tomada da foto), um método de correspondência de imagem é necessário para a construção do espaço-objeto, vital no processo de registro da imagem. Algoritmos avançados realizam a busca dos pontos homólogos onde a escala da imagem, rotação, translação e mudança de iluminação da cena são invariantes. A principal desvantagem desses algoritmos é o seu consumo significativo de memória e baixa velocidade computacional, particularmente no caso de imagens de alta resolução.

Os sensores digitais embarcados em uma RPA ainda possuem uma grande diferença com relação aos sensores analógicos, no que tange a geometria, e a radiometria. Algumas melhorias significativas estão ocorrendo, tais como nível de ruído (isto é, sem granularidade), linearidade, melhor resolução, maior amplitude dinâmica e maior estabilidade de voo. Estas características melhoram a potencialidade das tarefas de medição das propriedades radiométricas dos alvos na imagem e criam perspectivas de utilização de imagens fotogramétricas em interpretação e aplicações diversas (MARKELIN ET AL., 2008).

Segundo Markelin (2013), o principal benefício de sensores aéreos calibrados radiometricamente é a aplicação das imagens de reflectância e seus derivados (como os índices de vegetação) podendo ser utilizados, por exemplo, para estimar diferentes parâmetros

biofísicos da vegetação, tais como a concentração de clorofila foliar (MAIN ET AL., 2011). Quando imagens com diferentes datas e sensores são utilizados em uma análise diversa, a correção radiométrica torna-se uma necessidade.

Ponzoni et al., (2012) afirma a identificação dos parâmetros de calibração de um sensor multiespectral para determinar as variáveis físicas registradas por esse sensor é um passo chave em sensoriamento remoto. Um requisito para a radiometria quantitativa é a calibração radiométrica absoluta do sensor, que liga os números digitais gravados (DNs) às unidades físicas, como a radiância.

De acordo com Gao et al. (2001), o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) tem sido amplamente aplicada em sensoriamento remoto óptico. No entanto, o NDVI ainda é parcialmente afetado pela dispersão da radiância causada pelas diferenças de geometria e observação. A geometria é referente à distribuição angular da radiação incidente no alvo, e a observação se refere à radiação refletida por ele e registrada pelo sensor.

Nicodemus et al. (1977) desenvolveram um arcabouço teórico para discussão de grandezas de reflectância, baseado no conceito de função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF). A BRDF quantifica a distribuição angular da radiância refletida por uma superfície iluminada. Uma estimativa adequada dessas funções é necessária para estudos da superfície da terra para; corrigir os efeitos bidirecionais em séries temporais de índices de vegetação; para estimativas de parâmetros como índice de área foliar e outros parâmetros biofísicos; estimar o albedo a partir de medidas de reflectância; avaliar a reflectância na superfície terrestre e o espalhamento atmosférico para correção atmosférica, entre outros (MAIGNAN ET AL., 2004).

Embora os aspectos do BRDF muitas vezes possam ser negligenciados na análise de imagens de satélite com pequeno campo de visão angular (imagens Landsat), as propriedades de reflectância direcional são importantes para dados de imagem de sensores que sofrem variações nos ângulos de visada (Ikonos) e de sensores com um grande campo de visão angular (MODIS, scanners aéreos e câmeras aéreas). Somando-se a isso, é impossível modelar o BRDF de copas de floresta em laboratório, e é muito difícil criar modelos BRDF ao ar livre a partir de medições em dosséis (KOUKAL E SCHNEIDER, 2010).

Segundo Chandelier e Martinoty (2009), a principal causa da heterogeneidade radiométrica entre imagens aéreas é o chamado efeito "*hot-spot*". Em algumas imagens é possível observar áreas mais brilhantes quando a direção do sensor se aproxima da direção de iluminação do sol. É possível corrigir esse efeito por meio de um modelo BRDF, levando em conta uma possível anisotropia da reflectância do solo.

Milton (1987) e McCoy (2005) ao discutirem sobre o fator de reflectância destacam a importância da geometria de aquisição dos dados radiométricos, e consideram: i) a energia incidente nos alvos, por exemplo, a do Sol que se difunde e se propaga em todo o hemisfério; e, ii) a energia registrada pelos sensores, proveniente de todo o hemisfério, ou de parte dele delimitada pelo FOV (Field of View – campo de visada) do sensor.

A geometria de aquisição dos dados, que considera as características da fonte de iluminação e do sensor, é importante visto que a maioria dos alvos não apresentam comportamento lambertiano e sim anisotrópico, principalmente a vegetação sendo que para algumas direções pode haver maior ou menor reflectância (GAO ET AL., 2003).



Portanto, destaca-se que as variações da resposta espectral dependem da geometria formada entre a posição do Sol e do sensor que registra a energia refletida pelos alvos. Tais geometrias governam as variações decorrentes da anisotropia ou da BRDF do alvo e precisam ser considerados durante a aquisição, processamento e análise dos dados espectrais.

Neste capítulo serão descritas as etapas de aquisição de fotos aéreas por meio de uma RPA, as etapas de processamento dessas imagens brutas, como o processo de calibração radiométrica do sensor e a obtenção do Modelo Digital de Superfície. Além disso, os produtos gerados serão avaliados quanto à sua aplicabilidade ao monitoramento do ecossistema manguezal.

## 2.2. MÉTODOS E PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE UM ORTOMOSAICO GEOREFERENCIADO COM VALORES DE REFLECTÂNCIA

A RPA utilizada nesta pesquisa foi um multirrotor (Hexacóptero modelo X700). Este tipo de equipamento depende de áreas menores para pouso e decolagem sendo úteis para trabalho em locais de difícil acesso, como o manguezal (Figura 1).

**Figura 1:** RPA utilizada na pesquisa (Hexacóptero, modelo X 700).



O Hexacóptero possui dimensão de 1,05m x 0,72m e pesa sem bateria e guimbal 3 quilos. A bateria utilizada (LIPO 5200mah a 6000mah 4S Tattu) permite uma autonomia de 13 minutos de voo. Ele foi equipado com uma câmera multiespectral Tetracam ADC *Snap* (Tetracam Inc., Chatsworth, CA, USA) cujo peso é de 90 g. Esta câmera possui três canais com resolução do CCD - *Charge Coupled Device* de 1280 X 1024 pixels, resolução radiométrica de 10 bits, tamanho de pixel de 5 microns e distância focal de 8,43 mm. A abertura do diafragma é de f/3.2, com tempo de exposição de 110 % e tempo de captura de 1 a 3 segundos.

A Tetracam ADC *Snap* é uma câmera não métrica de pequeno formato, e possui os canais verde, vermelho e infravermelho próximo centrados em 550, 680 e 800 nm respectivamente. Ela registra os comprimentos de ondas no intervalo de 520 nm a 920nm. A resolução espectral da largura à metade do máximo (FWHM) é de 10 nm,. Esta câmera possui filtro de bloqueio na região azul. A Tetracam ADC *Snap* disponibiliza três tipos de arquivo RAW que podem ser escolhidos para gravação das imagens: DCM, RWS 8 e RWS 10. As imagens foram capturadas no formato RWS 10, com resolução radiométrica de 10 bits e, embora, no manual do equipamento (Tetracan Inc, 2012) esteja especificado que o tempo de captura entre uma imagem e outra é de um segundo, em campo foi diagnosticado que o tempo de gravação entre uma imagem variava de um a três segundos.

Foi utilizado também nessa pesquisa um espectrorradiômetro modelo FieldSpec Pro (ASD Inc.). Este equipamento é um instrumento portátil que permite registrar dados espectrais na região de 350 nm a 2500 nm, com uma resolução espectral de 1 nm.

Também foi necessário o uso de um receptor GPS com correção de coordenadas em tempo real modelo RTK 4 da Trimble. Este equipamento possui chip GNSS com 220 canais paralelos e tecnologia Trimble R-Track para rastrear sinais GPS L1/CA; L2 e L2C com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2. Precisão horizontal de 3 mm + 0,01 ppm RMS e vertical de 0,35 mm + 0,04 ppm.

### 2.2.1. Planejamento do Voo

Para executar cada voo foi necessário realizar o plano de voo das áreas separadamente. As dimensões das áreas imageadas foram determinadas levando-se em conta a autonomia da RPA que é de aproximadamente 10 minutos. A autonomia do voo também depende da velocidade do vento no momento do sobrevoo, pois quanto maior a velocidade do vento maior será o consumo da bateria e, conseqüentemente, menor a autonomia de voo. O vento pode causar arrasto nas imagens (efeito borramento) e, numa situação extrema, queda da aeronave. Por isso o campo foi planejado e realizado nos dias em que as condições do vento médio superficial estavam menores que 13 m/s.

Foi também realizado o cálculo do ângulo de inclinação do sol por meio da ferramenta disponível na web (*SunEarthTools.com*). É importante ter o conhecimento sobre o ângulo de inclinação do sol para o dia e horário do voo para evitar projeção de sombra, e também excesso de brilho que pode ocasionar a saturação do pixel das imagens. A condição ideal de voo é em dias nublados, para obter resultados melhores na calibração radiométrica, porém isso não foi possível nos campos. Os voos foram planejados entre 12:00 e 13:00 horas onde a posição do sol possui um maior ângulo de inclinação.

A altura da maré também foi observada para a definição do dia do voo, estes dados foram obtidos no site da Diretoria de Hidrologia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil ([www.mar.mil.br](http://www.mar.mil.br)). Foram escolhidos os dias com baixa-mar no horário dos voos para obter imagens do manguezal sem interferências da lâmina d'água.

Segundo Andrade (1998), a altura de voo varia em virtude do relevo do terreno, e isso significa que a escala de uma aerofoto também varia. Para efeitos práticos, adotou-se a escala da aerofoto como sendo aquela referente a altitude média do terreno. Desta forma, neste estudo para a elaboração do plano de voo, foi considerada como altitude média do terreno a cota igual a zero por se tratar de uma área plana. A altura dos voos foi de 400 pés (120m), altura máxima permitida pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) para RPA classe 3.

Em relação à escala empregada, Sabins (2007) define que a escala de uma fotografia aérea é determinada por meio da equação (1):

$$E = \frac{1}{H/f} \quad (1)$$

Sendo:

$f = \text{distância focal da câmera}$

$H = \text{altura do voo}$

Ambos H e f devem ser transformados para a mesma unidade de medida, geralmente, isto é feito em metros. Outra característica importante necessária para o planejamento do voo é o cálculo da resolução no terreno da foto aérea, ou seja, GSD (*Ground Sampling Distance*), definido pela equação (2) abaixo:

$$GSD = \frac{h \cdot s}{f} \quad (2)$$

Onde h é a altura do voo, s é o tamanho do pixel e f a distância focal da câmera.

A sobreposição lateral e longitudinal das fotos aéreas obtidas por uma RPA deve ser maior do que na aerofotogrametria convencional. Uma maior sobreposição lateral e longitudinal das fotos aéreas garantirá maior robustez da geometria, permitindo as orientações da imagem e a reconstrução do objeto com maior precisão e confiabilidade.

O plano de voo foi elaborado no software livre *Mission Planner 1.3.41 (Copyright 2016, ArduPilot Dev Team)*. Nele foram inseridas informações, como a distância focal da câmera, o tamanho do sensor e as coordenadas geográficas dos pontos extremos do polígono referentes às áreas do voo. Este software cria um roteiro pré-programado de pontos com coordenadas geográficas (denominados de *waypoints*) apresentando um plano gráfico com a trajetória do voo sobreposto a uma base do *Google Maps*.

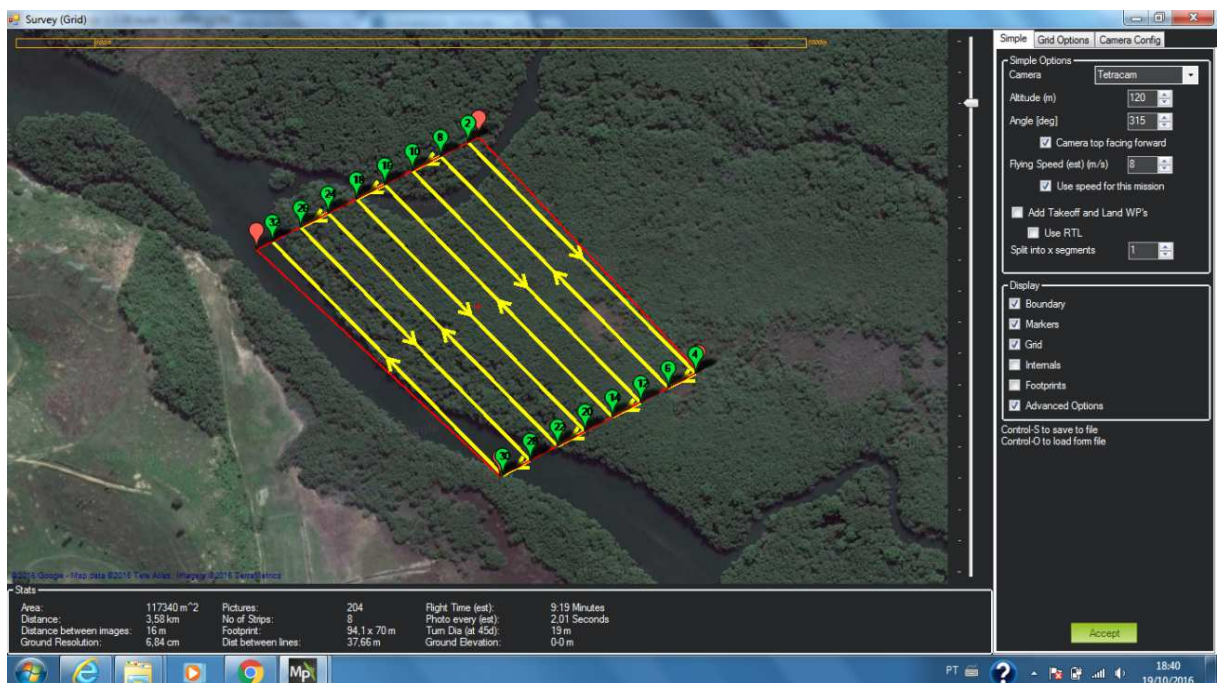
A comunicação da controladora com o computador é feita pelo sistema de telemetria. Através desse sistema, a rota programada no software *Mission Planner* é carregada na controladora, além disso, pode-se visualizar em tempo real a localização da RPA, os ângulos de inclinação (rolagem, mergulho e guinada – roll, pitch e yaw), a velocidade e altura do veículo, além de ser possível enviar comandos externos, como o de disparar a câmera, iniciar ou abortar uma missão (RAMOS ET AL., 2006).

O operador/explorador da RPA define o momento em que o piloto automático pode ser acionado para realizar a missão planejada e têm autonomia para interromper a missão a qualquer momento e, se necessário, retomar o controle da RPA e a direcionar para o ponto de partida (*home point*).

Os planos de voos das quatro áreas de estudo apresentaram uma “distância de amostra do solo” (*Ground Sample Distance*) de 6,81 cm e recobrimento lateral de 75% e longitudinal de 60%. A velocidade do voo foi de 8m/s. O número de faixas e fotos variou para cada área devido diferenças no tamanho da área de recobrimento (Tabela 2). Para as áreas de Areia Branca, Porto Santana e Porto Novo foram necessários dois voos para obter todo o recobrimento necessário. A escala média das fotos aéreas foi de 1/15.000.

A Figura 2 apresenta a interface gráfica do software *Mission Planner*, e o planejamento do voo da área de Santa Maria.

**Figura 2:** Plano de voo realizado no software livre *Mission Planner* 1.3.41.



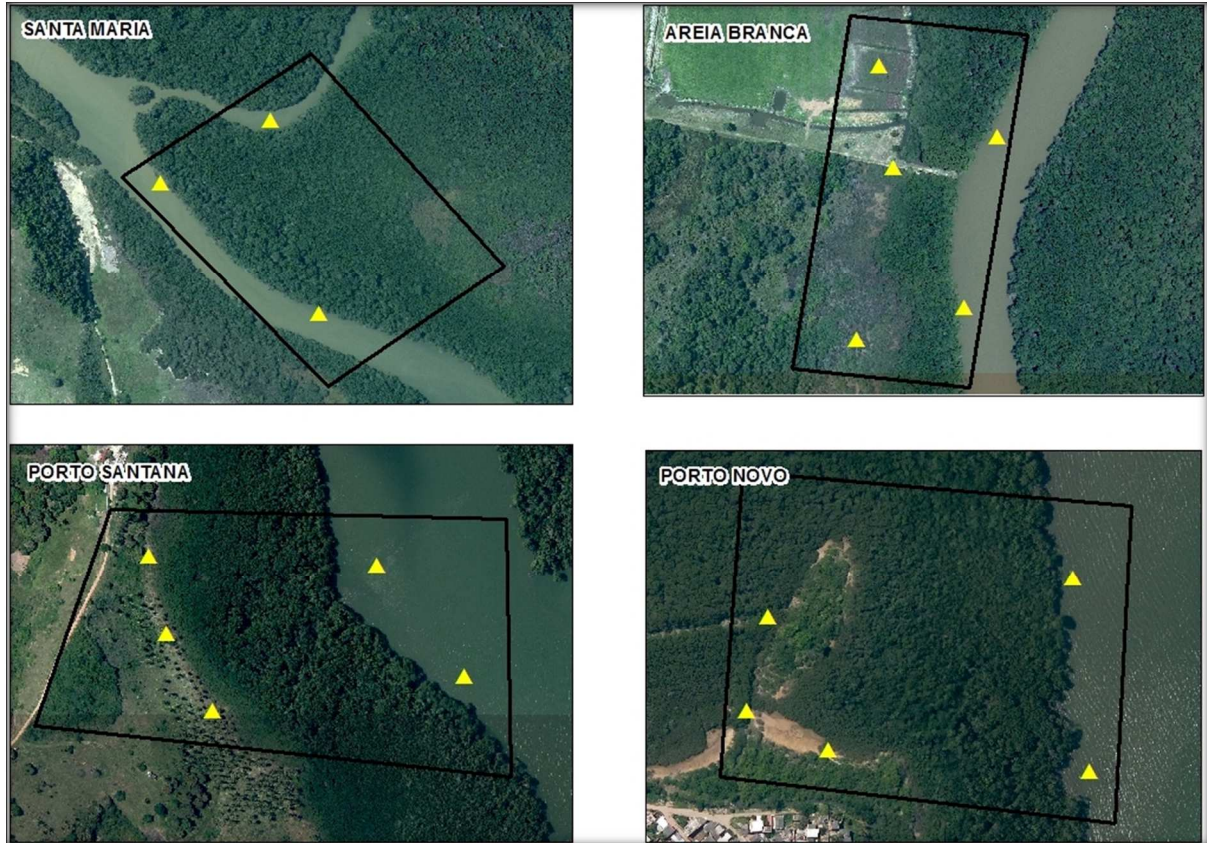
**Tabela 1:** Planos de voo das quatro áreas sobrevoadas.

<b>Local de estudo</b>	<b>Número de Faixas</b>	<b>Número de Fotos</b>	<b>Tempo entre uma tomada e outra de foto (S)</b>	<b>Área Total Imageada (ha)</b>	<b>Tempo de voo (min)</b>
Santa Maria	8	213	2,18	13,5	10:10
Areia Branca – voo1	6	184	1,74	8,9	6:44
Areia Branca – voo2	7	214	1,74	10,3	7:51
Porto Santana – voo 1	6	174	1,82	7,3	6:50
Porto Santana – voo 2	6	188	1,82	7,3	7:25
Porto Novo – voo 1 (out)	6	325	1,31	12,9	8:58
Porto Novo – voo 2 (out)	6	336	1,31	12	9:19
Porto Novo – voo 1 (dez)	5	116	3,05	10	7:45
Porto Novo – voo 2 (dez)	5	120	3,05	11,6	7:55

Além do plano de voo foi necessário também realizar um planejamento para os pontos de apoio (Figura 3). Na Fotogrametria convencional, a orientação exterior é obtida por métodos que necessitam de pontos de apoio no espaço objeto (GCPs).

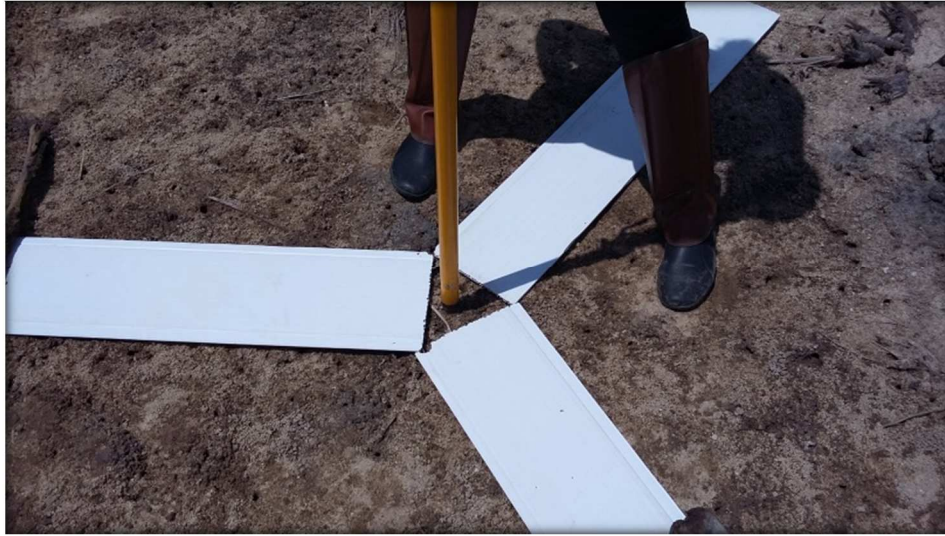
Em todas as áreas foram planejados cinco pontos de apoio, exceto a área de Santa Maria devido à dificuldade de acesso. O estabelecimento do número mínimo dos pontos de controle está condicionado à resolução do sistema que descreve o relacionamento entre os pontos no terreno e os pontos na imagem, ou seja, a resolução da expressão matemática (Brito e Coelho, 2007). De acordo com o método de ajustamento adotado pelo software são necessários no mínimo três pontos de controle para que os sistemas de observações tenha solução única.

**Figura 3:** Descrição da localização geográfica dos pontos de apoio em cada uma das áreas de estudo.



Os pontos de apoio tiveram dois formatos; os pontos em terra (Figura 4) foram confeccionados em PVC (Policloreto de vinila) no formato de uma estrela com três pontas, e cada ponta tinha as dimensões 20x60cm.

**Figura 4:** Pontos de apoio.



Os pontos da água foram confeccionados em PVC com dimensões 50x50 cm, e pintados para que ficassem com um quadriculado branco e preto (Figura 5). Foi construída nas mesmas dimensões uma placa de isopor e acoplada à placa de PVC. Foram realizados os fundeio desses alvos no momento do voo de modo que ficassem no mesmo nível da água do estuário.

**Figura 5:** Pontos de apoio confeccionados para água.



Os pontos de apoio foram medidos no terreno por meio de um par de receptores de sinais GNSS da marca Trimble, modelo RTK, configurado com máscara de elevação de 15° e taxa de gravação de 1 segundo com Base instalada em um marco geodésico anteriormente

implantado, usando este mesmo equipamento. O método de rastreamento utilizado foi estático rápido, com tempo de ocupação de aproximadamente 5 minutos. O receptor denominado base recebia em tempo real as correções das coordenadas da Base do IBGE por meio de sinal de telefonia. Os dados foram processados no Datum SIRGAS 2000 no sistema de projeção UTM, zona 24, meridiano central -39°. Os dados foram descarregados no software Trimble Business Center e exportados em planilha excel. Foi feita a transformação da altura elipsoidal para a ortométrica por meio do cálculo da ondulação geoidal no software gratuito Mapgeo 2015 v 1.0.

### **2.2.2. Autorização do Voo**

De acordo com a ANAC (2018), as aeronaves não tripuladas (de uso recreativo, corporativo, comercial ou experimental) devem seguir as regras da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que são complementares aos normativos de outros órgãos públicos como o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

A norma (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC –E nº 94) publicada em 2 de maio de 2017, e a Instrução Normativa ICA 100-40 (Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro) publicada em 19 novembro de 2015 representam um marco regulatório nas atividades que envolvem Aeronaves Remotamente Pilotadas.

Seguindo as instruções normativas da RBAC-E nº 94, a aeronave utilizada nesta pesquisa enquadrava-se na classe 3. A aeronave possuía peso de decolagem inferior a 25 kg, o voo foi realizado a menos de 400 pés (120 metros) acima da superfície terrestre, o voo foi em linha de visada visual (VLOS), e em área segregada, ou seja, distante de terceiros.

Foi realizado um cadastro da aeronave no Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) da ANAC. Foi obtido um número de identificação gerado na certidão de cadastro da aeronave. Com relação ao DECEA foi necessário o preenchimento de informações referentes ao voo no Sistema SARPAS com antecedência mínima de 48 horas. Como o RPA utiliza frequência de rádio foi necessário homologá-lo junto à ANATEL para obtenção da certidão de autorização de uso temporário de radiofrequência.

Para a segurança do voo foram empregadas três pessoas na operação. Sendo, um piloto de rádio controle, um operador da estação terrestre e um observador. O operador da estação terrestre controlava as informações fornecidas pelo sistema de telemetria, isto é, posição da RPA, altitude, velocidade de voo, nível da bateria, qualidade do sinal e velocidade do vento. Por sua vez, o observador visual ficava a todo o momento observando a aeronave.

Atualmente é necessário durante a operação com RPA o porte de documentos obrigatórios, como apólice de seguro (seguro com cobertura contra danos a terceiros) e documento de avaliação de risco.



### 2.2.3. Análise de Sensibilidade do Sensor

A simulação de bandas considera a sensibilidade espectral do sensor para cada banda espectral, que pode ser conhecida ou não, sendo equivalente à sua eficiência para o intervalo de comprimento de onda da banda, ou seja, em quais comprimentos de onda cada banda registra mais energia e como ela é registrada (MIYOSHI ET AL., 2013).

Segundo Chen (2013), as variações na função de resposta espectral (SRF) que caracterizam a sensibilidade de cada banda espectral têm sido reconhecidas como uma das mais importantes fontes de incerteza para o uso de dados espectrais.

A função de sensibilidade espectral do sensor, conhecida como *Spectral Response Function* (SRF), pode ser simulada na forma de uma função gaussiana, correspondendo à eficiência máxima do sensor em determinada banda. A SRF pode ser calculada utilizando a resposta espectral do alvo, conforme equação 3 (STEIN ET AL., 1999).

$$\rho_{res}(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

Em que

$\rho_{res}(\lambda_i)$  é a resposta espectral simulada da banda espectral correspondente a banda espectral centrada no comprimento de onda  $\lambda_i$  [nm];

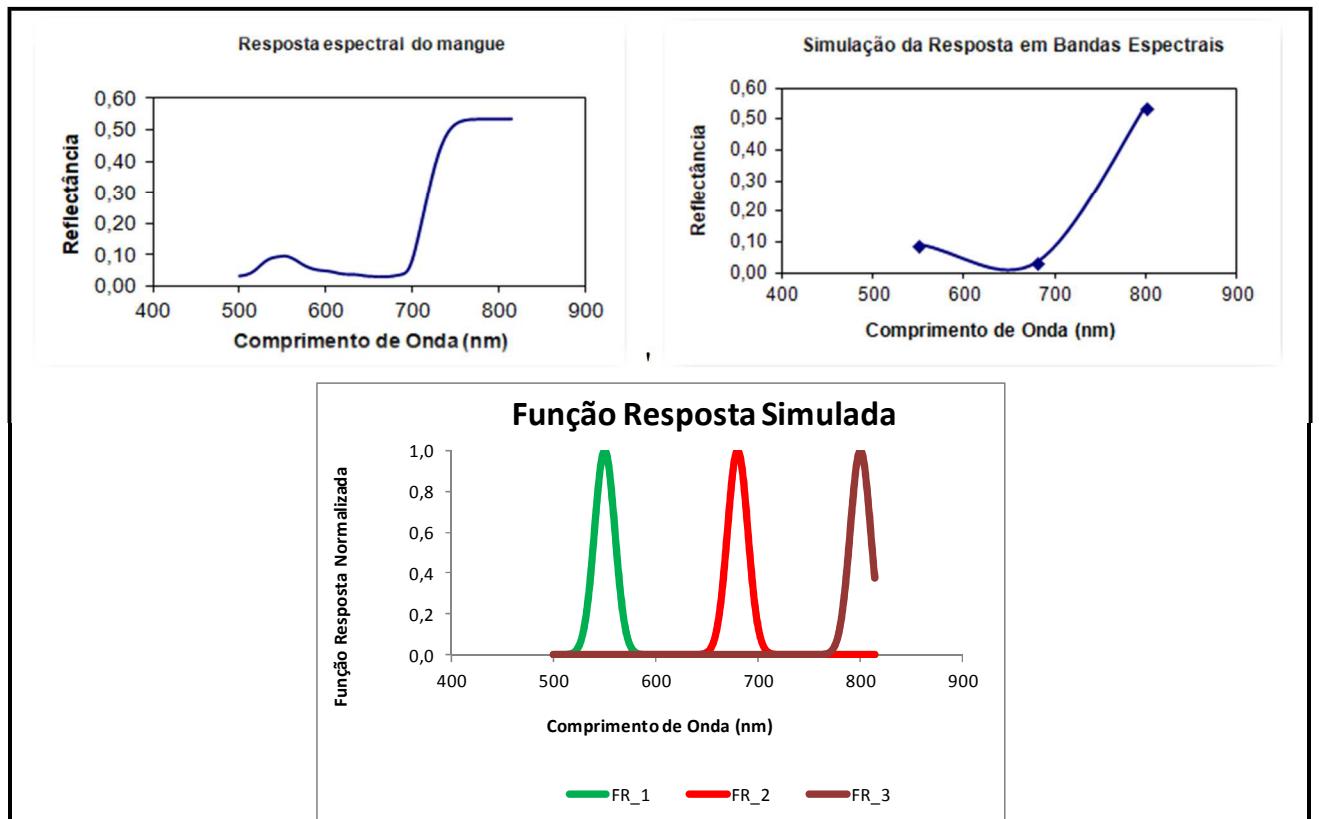
$R_i(\lambda)$  é a sensibilidade espectral do sensor para a banda espectral centrada no comprimento de onda  $\lambda_i$  [nm];

$\rho(\lambda)$  é a resposta espectral conhecida do alvo; e

os sub-índices 1 e 2 correspondem aos comprimentos de onda inicial e final, respectivamente, da banda espectral.

Foi realizada a análise de sensibilidade para as três bandas do sensor Tetracam ADC *Snap* considerando os comprimentos de onda 550, 680 e 800 nm, e resolução espectral da largura à metade do máximo (FWHM) de 10 nm,. A Figura 6 apresenta os gráficos da simulação de bandas do sensor.

**Figura 6:** Simulação de bandas do sensor Tetracam ADC *Snap*. FR\_1 é referente a Função de Resposta da banda verde, FR\_2 referente a banda vermelha e FR\_3 referente a banda do infravermelho próximo.



#### 2.2.4. Calibração Radiométrica

A calibração radiométrica é um processo de conversão de números digitais (ND) das imagens para valores de parâmetros físicos como a radiância ou a reflectância. Tal conversão é possível e tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, bem como a elaboração de cálculos que incluem dados de imagens de diferentes bandas espectrais ou de diferentes sensores (PONZONI ET AL., 2012).

Foram coletadas medidas de irradiância no momento do voo, conforme descrito por Hakala et al. (2013). O ajuste relativo das imagens é obtido selecionando uma imagem de referência e calculando os fatores de correção multiplicativos relativos  $C_j(\lambda)$ , segundo a equação 4:

$$C_j(\lambda) = \frac{E_{ref}(\lambda)}{E_j(\lambda)} \quad (4)$$

Onde

$E_j(\lambda)$  e  $E_{ref}(\lambda)$  são as medidas de irradiância espectral durante a aquisição da imagem;

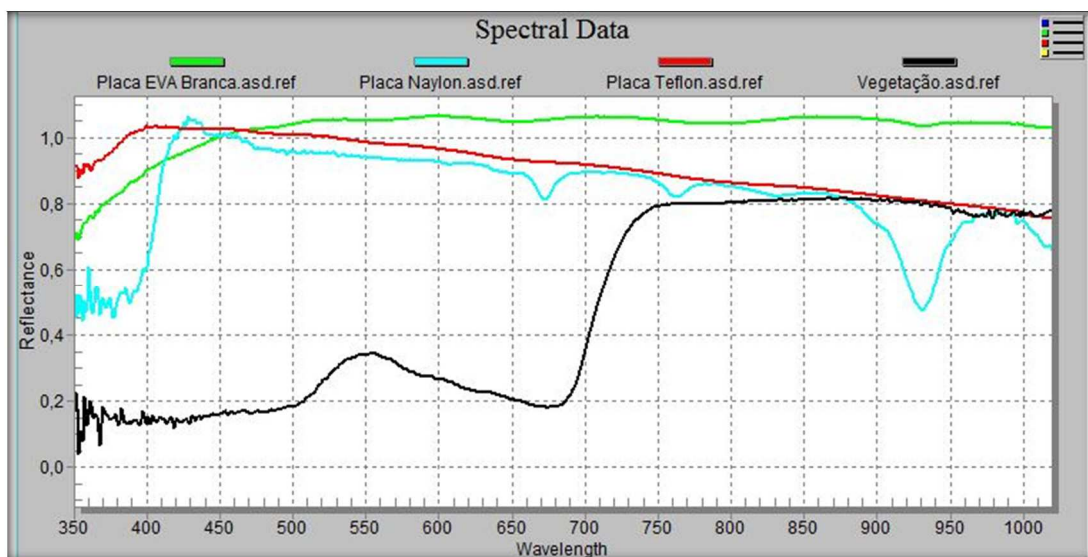
$j$  e da imagem de referência  $ref$ .

Ao multiplicar os DN's da imagem  $j$  usando  $C_j(\lambda)$ , as diferenças radiométricas causadas pelas mudanças na irradiância são eliminadas.

A imagem de referência é aquela cuja superfície é considerada ideal e de reflexão difusa, também chamada de superfície lambertiana. Lambert definiu superfície de reflexão perfeitamente difusa como aquela que reflete a mesma quantidade de radiância em todas as direções de visada com função de distribuição de reflectância bidirecional equivalente a  $1/\pi$  (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006). Uma superfície lambertiana muito utilizada é a placa Spectralon, confeccionada em resina termoplástica de reflexão altamente difusa (JENSEN, 2009).

Para o processo de calibração radiométrica foi necessário confeccionar uma placa (imagem de referência). Foi analisado no laboratório de radiometria do Ifes – Campus Vitória, o comportamento espectral do material nylon, teflon e E.V.A Branco por meio de um espectrorradiômetro FieldSpec Pro (ASD Inc.). Na Figura 7 é possível observar o comportamento espectral dos materiais analisados. A placa de E.V.A apresentou uma reflectância uniforme nos comprimentos de onda registrados pelo sensor da câmera; 550, 680 e 800 nm, aproximando-se muito do comportamento espectral da placa Spectralon. O cálculo da reflectância da placa de referência foi realizado ponderando a resposta espectral da média das medidas radiométricas centradas nos comprimentos de onda em 550, 680 e 800 nm para bandas estreitas (FWHM 10nm).

**Figura 7:** Comportamento espectral dos materiais nylon, teflon e E.V.A para identificação do comportamento espectral mais homogêneo nos comprimentos de onda de onda registrados pelo sensor.



Outro ponto a ser considerado para a confecção da placa de referência é a definição de suas dimensões. É preciso levar em conta o menor elemento de resolução no terreno (GSD). A placa precisa ser “resolvida” nas imagens, portanto extrapolou-se em muitas vezes o valor do

GSD, portanto ela foi construída nas dimensões de 50 x 50 cm. Uma placa ficou próxima ao operador do espectrorradiômetro para coleta das medidas de radiância no momento do voo, e outra placa ficou próxima ao manguezal e dentro da área de sobrevoo. Durante a aquisição dos dados, a pistola do espectrorradiômetro formou um ângulo de incidência ortogonal com a placa de E.V.A, e foram tomadas três medidas espectrais, uma no início do voo, durante e outra no fim, no intervalo de 10 minutos aproximadamente.

### 2.2.5. Efeito Vinhete

Segundo Kraus (1992), o efeito de vinhete é apresentado como a redução de brilho, do centro para as bordas, causado por anteparo físico aos feixes de raios que entram obliquamente em um sistema óptico.

A distribuição não uniforme de iluminação sobre o negativo é causada pelas características de construção das lentes, aliada a fatores atmosféricos que interferem na radiação que chega ao negativo (SILVA e CANDEIAS, 2009). Neste caso, os fatores atmosféricos não possuem tanta relevância devido à baixa altitude do voo. Ainda de acordo com Silva e Candeias (2009), o efeito vinhete causado por uma característica óptica é provocado pelas aberturas maiores do diafragma e pela profundidade do cone que impedem os raios oblíquos de atingirem uniformemente todo o negativo. Quanto maior a abertura do diafragma, maior é a obstrução dos raios oblíquos.

O efeito vinhete também pode ser causado por um problema mecânico devido a acessórios, como extensões colocadas sobre a objetiva e até por filtros, que também contribuem para que raios oblíquos não atinjam o ponto nodal anterior, agravando o vinhete (WALREE, 2007).

O efeito puro de vinhete pode também está relacionado a fatores externos, como o Fator de Refletância Bidirecional (BRF – *Bidirectional Reflectance Factor*). Sabe-se que quanto menor o ângulo entre a fonte de iluminação (sol) e o sensor, maior o retroespalhamento registrado em imagens aéreas (SILVA E CANDEIAS, 2009).

Segundo Liesenberg (2006) apud Miyoshi (2015), as diferenças de registro de dados espectrais devido às posições do sensor para um mesmo vetor de direção da trajetória da radiação solar podem ocasionar em três situações: (1) um retroespalhamento, com maiores proporções de dossel e solos iluminados; (2) proporções semelhantes de iluminação e sombra do dossel, e uma máxima porção de solo; e (3) espalhamento frontal, com maiores proporções de sombra do dossel e do solo.

Para comprovação desse efeito foi realizado um experimento em campo. Foram tiradas algumas fotos ao ar livre de um alvo branco de E.V.A, no final da tarde, com ângulo de inclinação do sol baixo. As condições de iluminação ainda estavam boas, mas sem exposição direta da câmera e do alvo aos raios solares. Foi registrado algumas fotos da placa de referência de E.V.A de modo que a placa ocupasse toda a foto. Ao processar as imagens no software PixelWrench II utilizou-se o arquivo cpf padrão, e um outro arquivo cpf para produzir uma imagem balanceada de igual iluminância nas três bandas. Observou-se que as imagens geradas a partir do primeiro arquivo (padrão) apresentou o efeito vinhete nas bandas

do infravermelho e verde. As imagens geradas utilizando o segundo arquivo de calibração apresentou o efeito vinhete levemente na banda vermelha e verde (Figura 8).

**Figura 8:** A – Imagem do alvo branco de E.V.A processada com a matrix padrão da câmera. B - Imagem do alvo branco de E.V.A processada com uma matrix simples, sem correção.



## 2.3. RESULTADOS

### 2.3.1. Processamento e Análise dos dados

As fotos aéreas foram gravadas no formato RWS, formato do tipo RAW (arquivo bruto), e transformadas para o formato tif no software da câmera PixelWrench (Tetracam Inc.). Para fazer a composição falsa-cor IV, vermelho, verde ou para fazer a decomposição das imagens nas três bandas separadamente é necessário usar um arquivo de calibração .cpf. Este arquivo define valores para uma matriz de cores, que é usada para colorir imagens brutas. Este arquivo leva em conta as condições de luz no meio dia na América do Norte. Ele modela a resposta espectral do sensor à curva ASTM G-173-03 para bandas estreitas (FWHM 10nm) centradas em 550, 680 e 800 nm (TETRACAM INC., 2012).

O cálculo da reflectância da placa de referência foi realizado ponderando a resposta espectral da média das medidas radiométricas centradas nos comprimentos de onda em 550, 680 e 800 nm para bandas estreitas (FWHM 10nm). As fotos aéreas foram decomposta em suas

componentes (B1, B2 e B3) e salvas no formato TIFF (*Tagged Image File Format*). A conversão do número digital em reflectância foi feita separadamente para cada componente no ambiente de processamento de imagem MatLab conforme a equação 1.

Em seguida as imagens foram processadas no software digital Agisoft Photo Scan Professional versão 1.0.4 usando os pontos de apoio medidos em campo (GCPs). Este software fotogramétrico realiza busca por pontos homólogos independente das variações angulares no momento da aquisição das imagens. É necessário inserir os dados do arquivo *log* (coordenadas do centro de cada imagem e inclinações,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ , ou Yaw, Pitch, Roll). Os dados de posição e atitude para cada exposição são fornecidos com objetivo de melhorar o desempenho do aplicativo refinando os dados de orientação exterior.

Todo o processamento, desde a orientação interna, correspondências automáticas entre todas as imagens que tenham alguma sobreposição, ajustamento simultâneo de feixes em bloco, e geração dos produtos, como MDS, MDT e ortomosaicos são realizados automaticamente (PHOTOSCAN, 2014). As intervenções do operador é apenas para definir alguns parâmetros como método de processamento das correspondências, densidade de pontos do MDT, tamanho do GSD ou tamanho dos recortes do ortomosaico. Existe ainda a possibilidade de ser gerado um arquivo da fototriangulação que pode ser exportado em formato compatível com os principais softwares de fotogrametria convencional, o que permite operações de restituição (SILVA ET AL., 2014).

As variações nos ângulos de Euler provenientes da instabilidade da plataforma podem ocasionar o registro de fotos inclinadas e fotos em diferentes escalas devido à variação de altitude durante o voo. Isto influencia diretamente no processo de alinhamento das fotos no software fotogramétrico.

Ramos e Lima (2006), afirmam que os acelerômetros e magnetômetros são os sensores de estabilização dos eixos *yaw*, *roll* e *pitch*. Os dados registrados pelo acelerômetro podem ser usados como bons indicadores de vibração ocasionados pelo vento. Em regiões costeiras as condições do vento no momento do voo precisam ter à devida atenção.

Outro problema relacionado ao alinhamento das fotos se deve ao objeto imageado; que neste caso é a vegetação densa. A vegetação possui textura, forma e contraste muito parecido, e assim fica mais difícil o processo de criação de nuvem de pontos por meio de pontos coincidentes em mais de uma imagem bem como o processo de amarração destes pontos. Outro alvo imageado que apresenta problema no processo de alinhamento é a água. Em algumas regiões, as fotos aéreas do canal de Vitória não foram alinhadas pelo software aerofotogramétrico.

A Tabela 2 apresenta o registro dos voos das quatro áreas de estudo com relação ao número de fotos planejadas, o número de fotos registradas no voo, e o número de fotos alinhadas pelo software.

**Tabela 2:** Descrição dos registros de fotos aéreas planejadas, registradas e alinhadas pelo software aerofotogramétrico.

Ortomosaicos	Número de fotos planejadas	Número de fotos registradas	Número de fotos alinhadas	Área recobrimento planejada	Área recobrimento obtida
Santa Maria	213	208	129	13 ha	10 ha
Areia Branca	398	373	197	19 ha	13 ha
Porto Santana	362	342	324	14 ha	13 ha
Porto Novo - 1° voo	661	396	145	25 ha	7,8 ha
Porto Novo - 2° voo	236	228	111	22 ha	8 ha

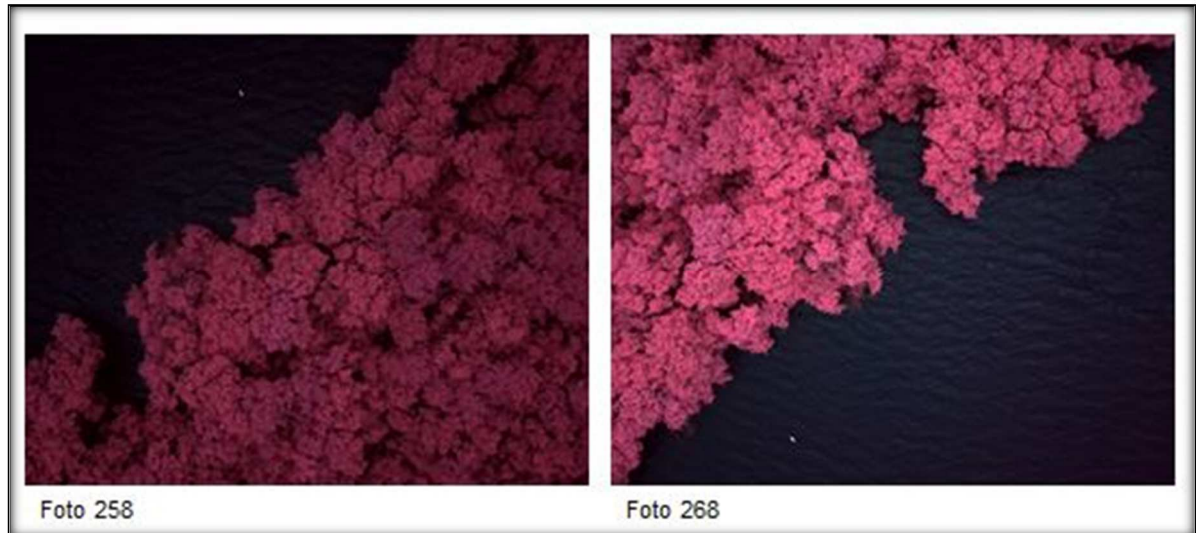
As variações na altura obtidas no *log* do voo podem ser observadas na Figura 9. Estas variações podem interferir na sobreposição lateral e longitudinal das faixas de voos e na escala das fotos causando o não alinhamento das mesmas.

**Figura 9:** Perfil de elevação da rota registrada pelo *log* de voo plotado no aplicativo *Google earth*. Área de Santa Maria.



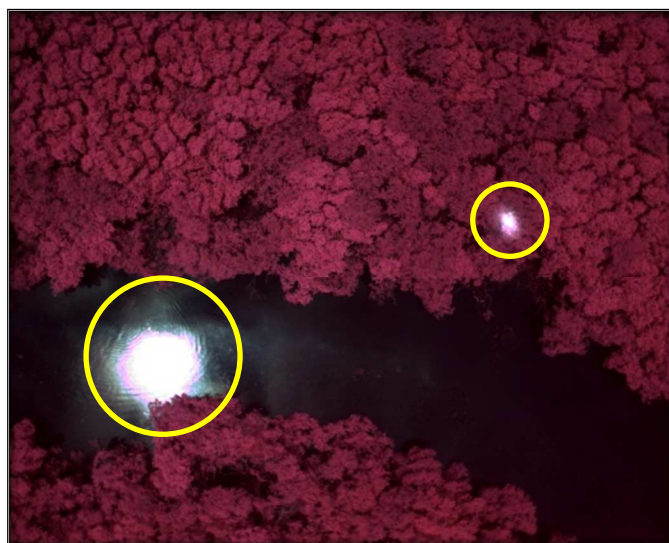
As diferentes posições do ângulo de visada do sensor somado à instabilidade dos sistemas sensores GNSS e IMU podem ocasionar imagens heterogêneas em relação ao brilho. Isto foi observado no voo realizado na área de Porto de Santana onde dependendo da faixa de voo, um mesmo dossel tinha mais ou menos brilho (Figura 10).

**Figura 10:** Diferenças de intensidade de brilho em fotos aéreas provocadas por efeito de retroespalhamento.



Outros problemas radiométricos como áreas brilhantes (*hot spot*) podem ocasionar a não uniformidade da intensidade do brilho nas fotos aéreas (Figura 11). Árvores mais altas de *R. mangle* localizadas no bosque de franja (mais próximo ao canal), e com maior desenvolvimento estrutural também apresentaram diferenças em relação ao brilho.

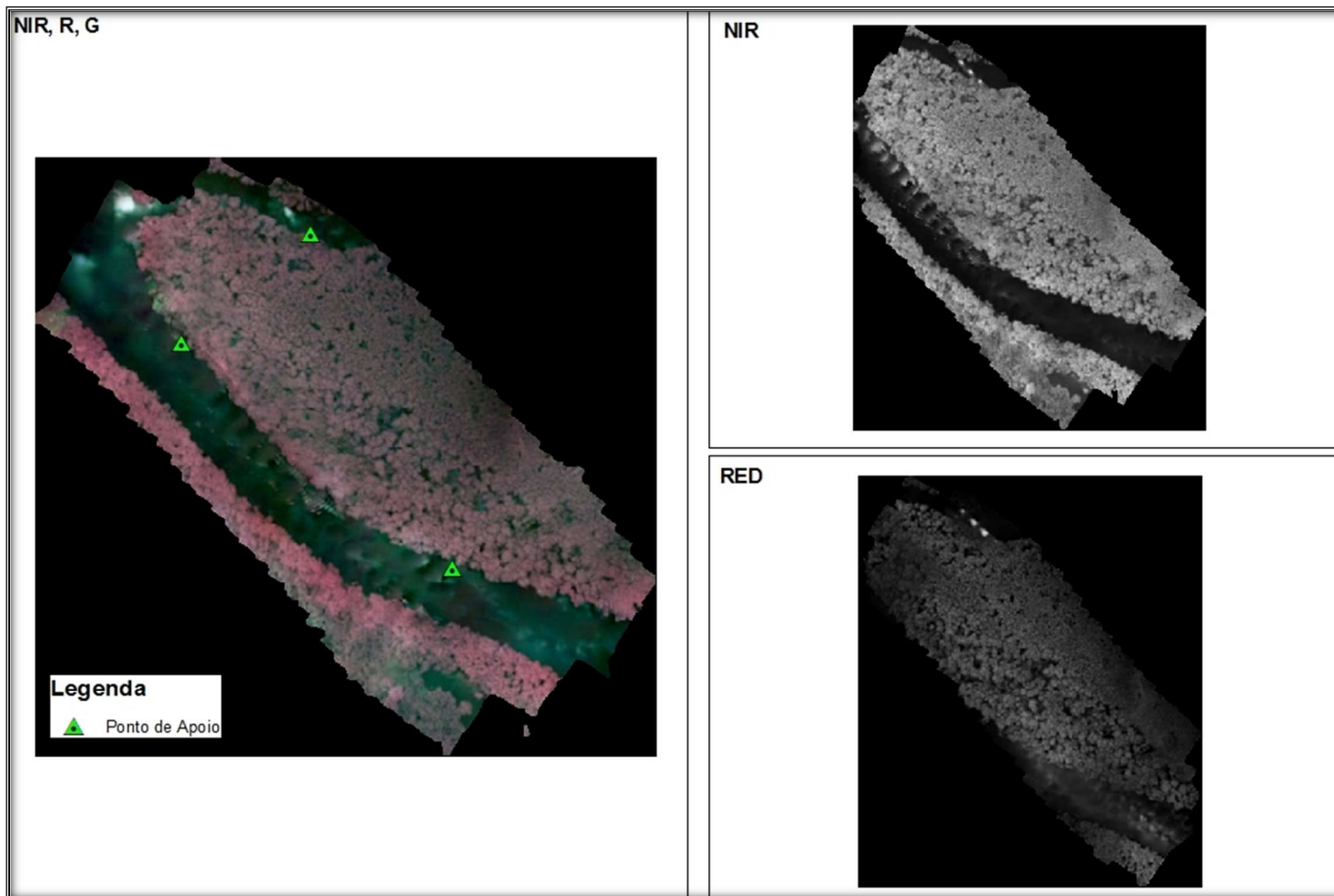
**Figura 11:** Imperfeições radiométricas (*hot spot*) causada nas imagens aéreas.



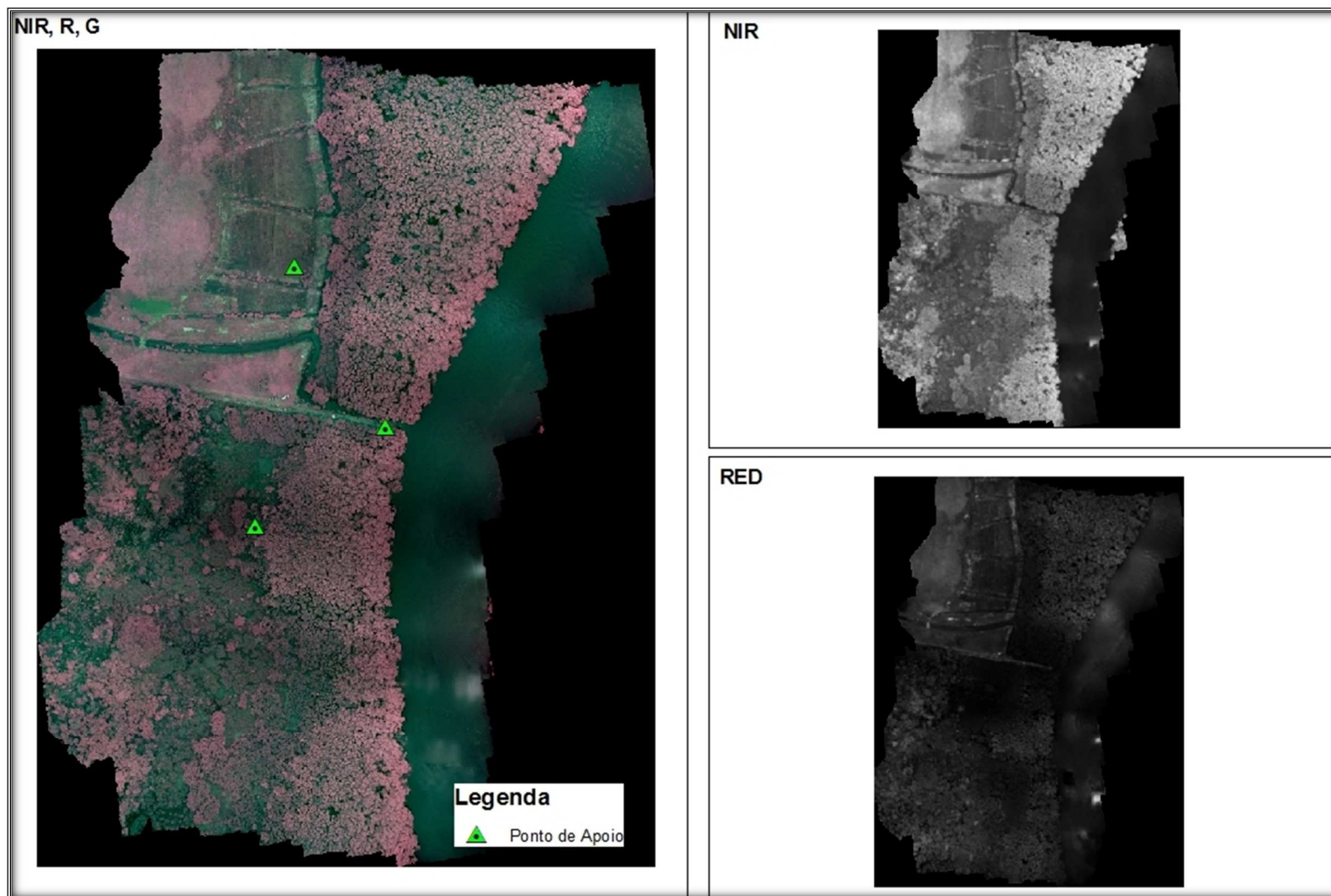
As Figuras 12,13,14 e 15 apresentam os ortomosaicos (composição colorida) e as bandas NIR e RED para cada área de estudo.



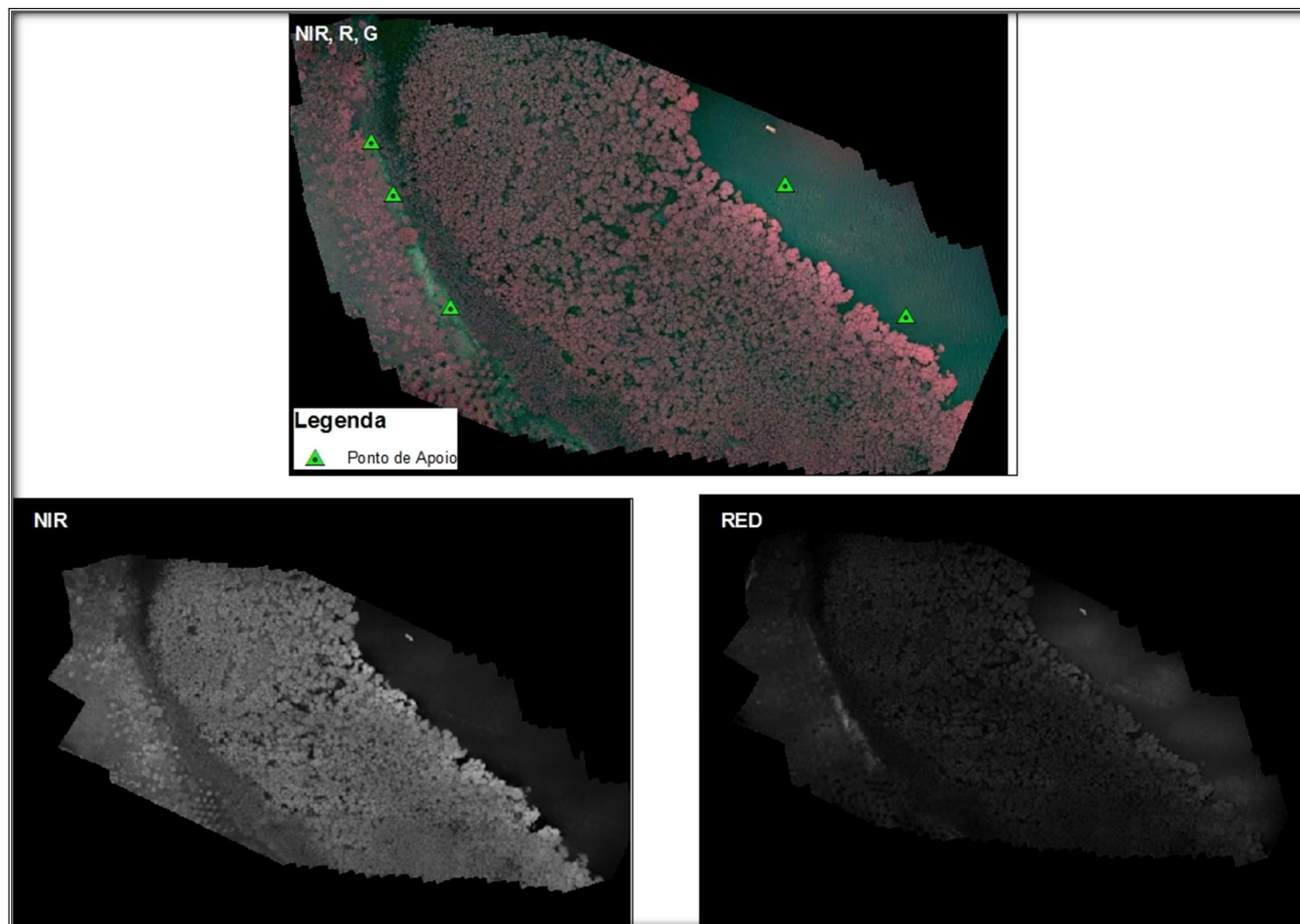
**Figura 12:** Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Santa Maria.



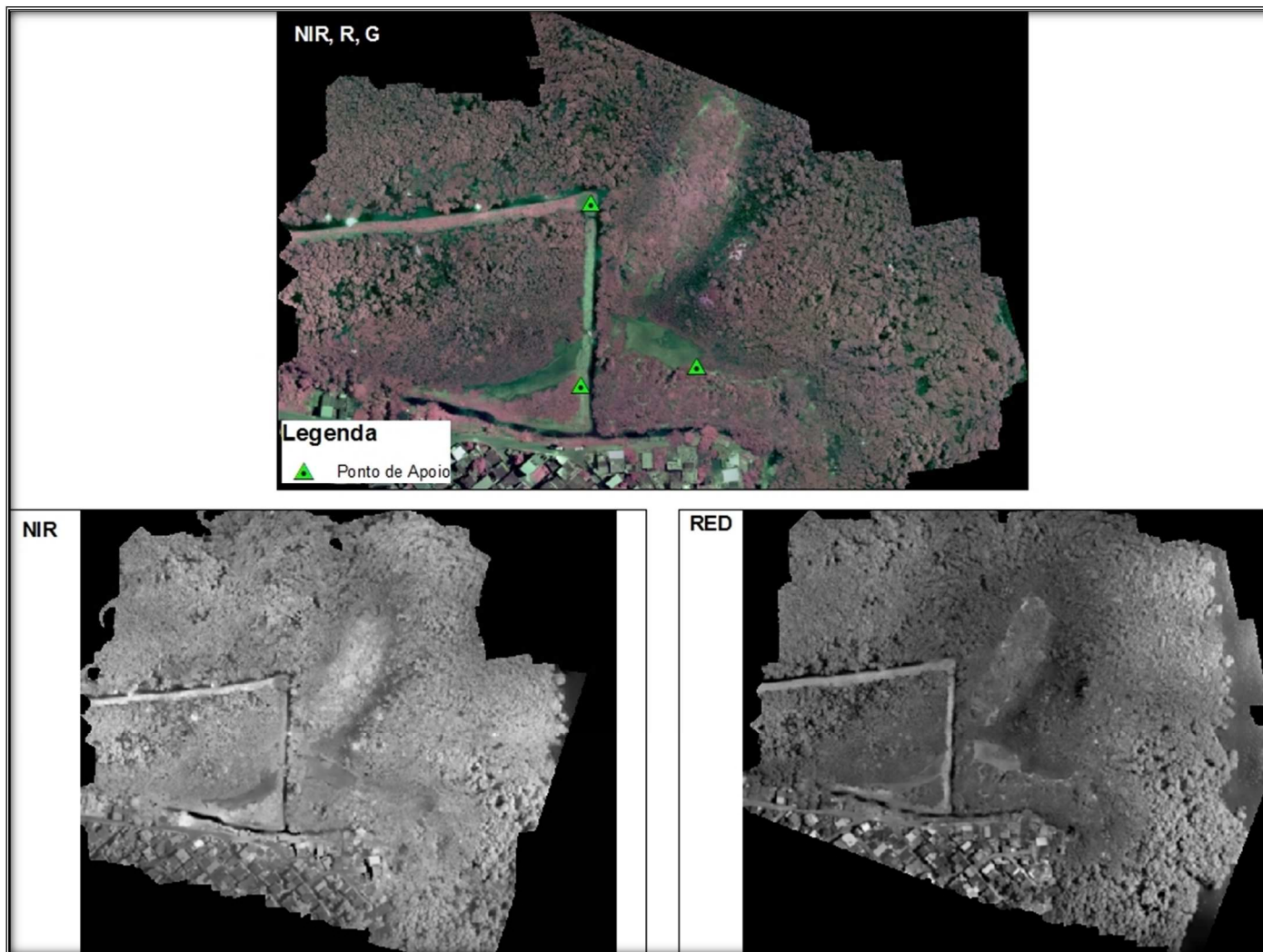
**Figura 13:** Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Areia Branca.



**Figura 14:** Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Porto Santana.

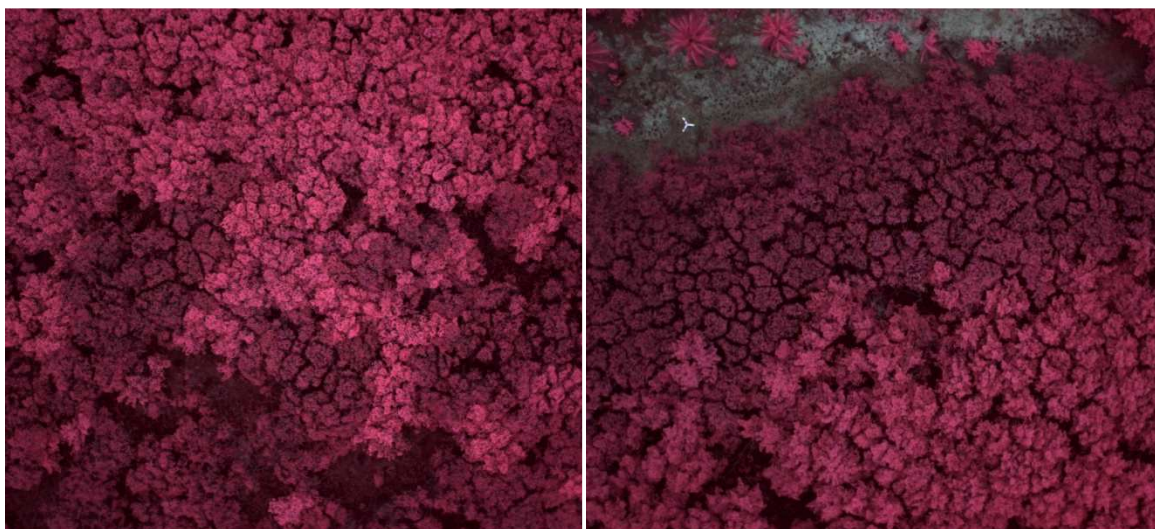


**Figura 15:** Ortomosaicos (composição colorida) e bandas NIR e RED da área de Porto Novo.

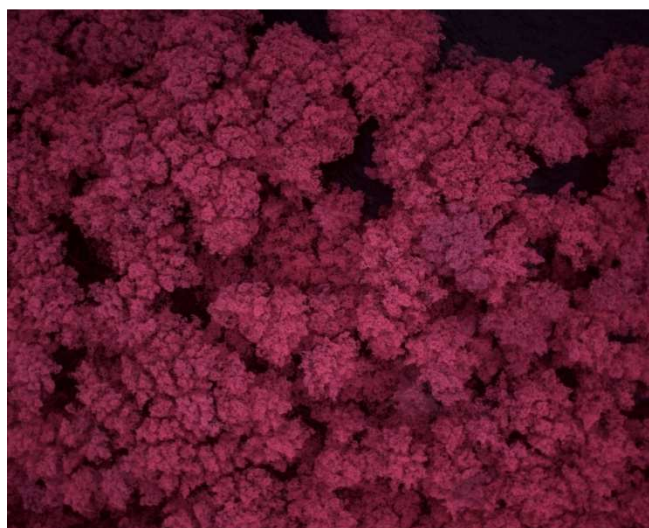


A partir da fotointerpretação do ortomosaico foi possível obter informações do manguezal, como a identificação duas espécies dominantes; *R. mangle* e *L. racemosa*, e o padrão de sucessão das espécies, por meio das diferentes formas do dossel (textura e forma) e tonalidade (Figura 16). Também foi possível identificar espécies isoladas de *A. shaueriana* (Figura 17). Esta última espécie apresenta a tonalidade mais acinzentada.

**Figura 16:** Identificação das espécies *R. mangle* e *L. racemosa* pelas diferenças de textura, forma e tonalidade.

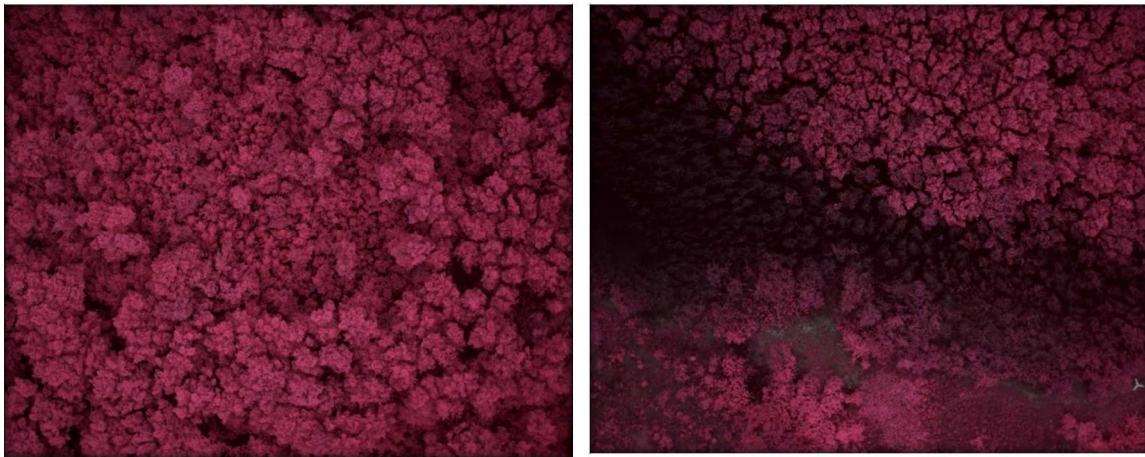


**Figura 17:** Identificação da espécie *A. shaueriana*. A tonalidade desta espécie é mais acinzentada.



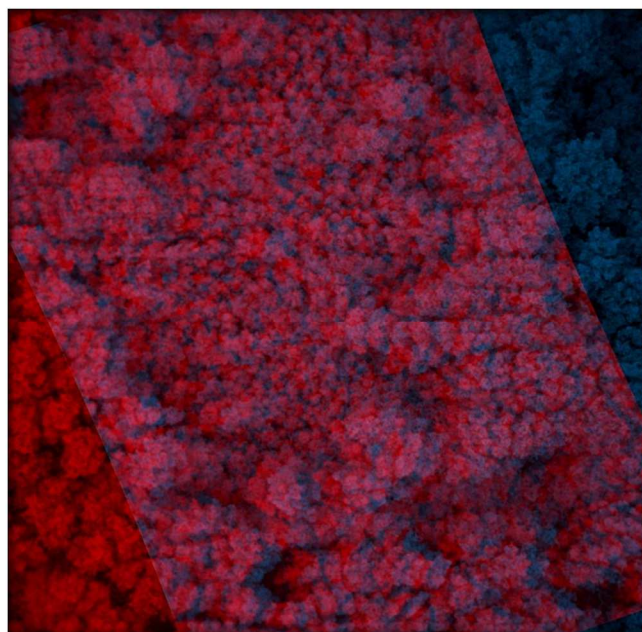
Na Figura 18 é possível identificar a colonização de uma clareira por indivíduos jovens de *R. mangle* (à esquerda). E à direita uma área onde está ocorrendo a morte de uma parte do bosque.

**Figura 18:** Colonização de uma área do bosque por indivíduos jovens de *R. mangle* (à esquerda), e outra área do bosque onde está ocorrendo a morte de indivíduos (à direita)



Utilizando o software Agisoft Photoscan é possível exportar um par de ortofotos em formato compatível com vários softwares livres, como a estação educacional livre E-Foto, que cortam e alinham um par de imagens para visualização 3D. Através do método de estereoscopia é possível obter a percepção de profundidade da imagem na área de superposição. Com um óculos anáglifo, o pesquisador têm uma visão tridimensional do mangue e pode observar as diferentes alturas das árvores, o que facilita na identificação das espécies e no acompanhamento da colonização da clareira (Figura 19).

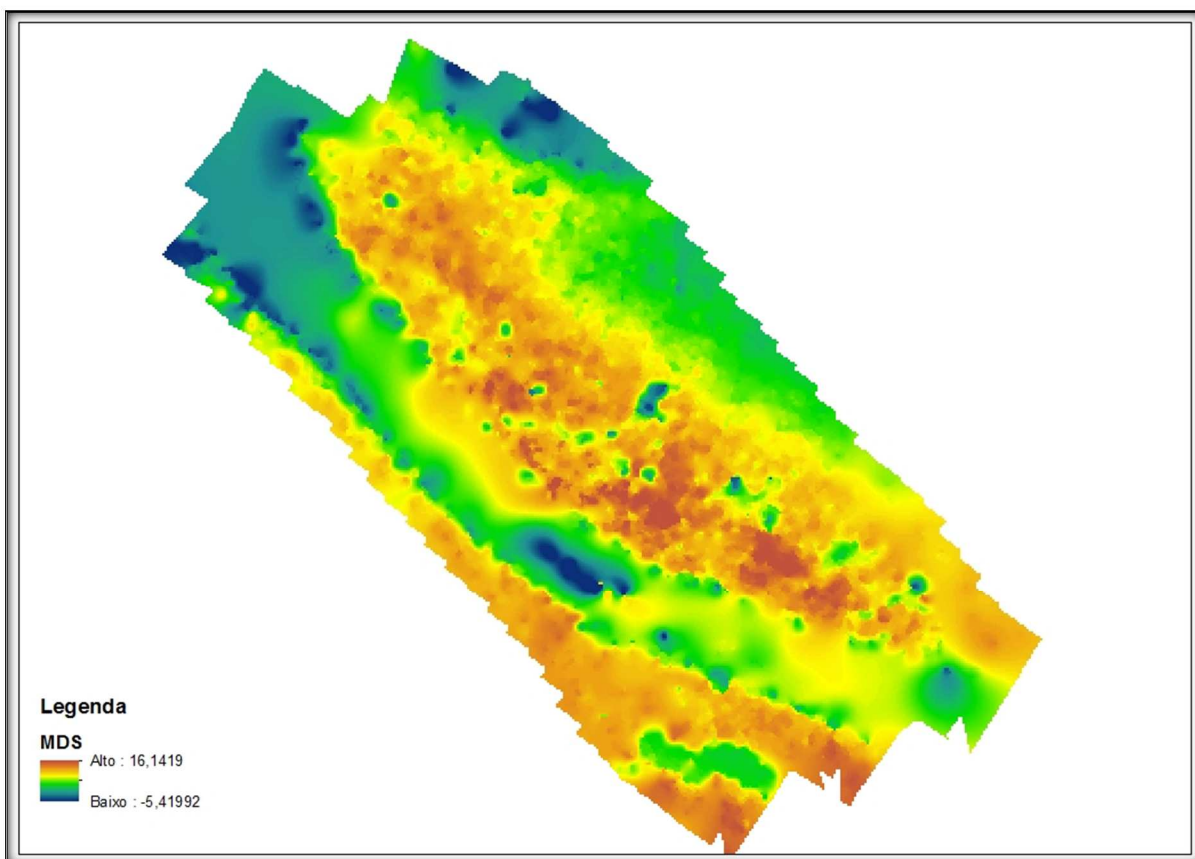
**Figura 19:** Modelo estereoscópico criado a partir de um par de ortofotos. A visão tridimensional pode ser obtida utilizando um óculos anáglifo.



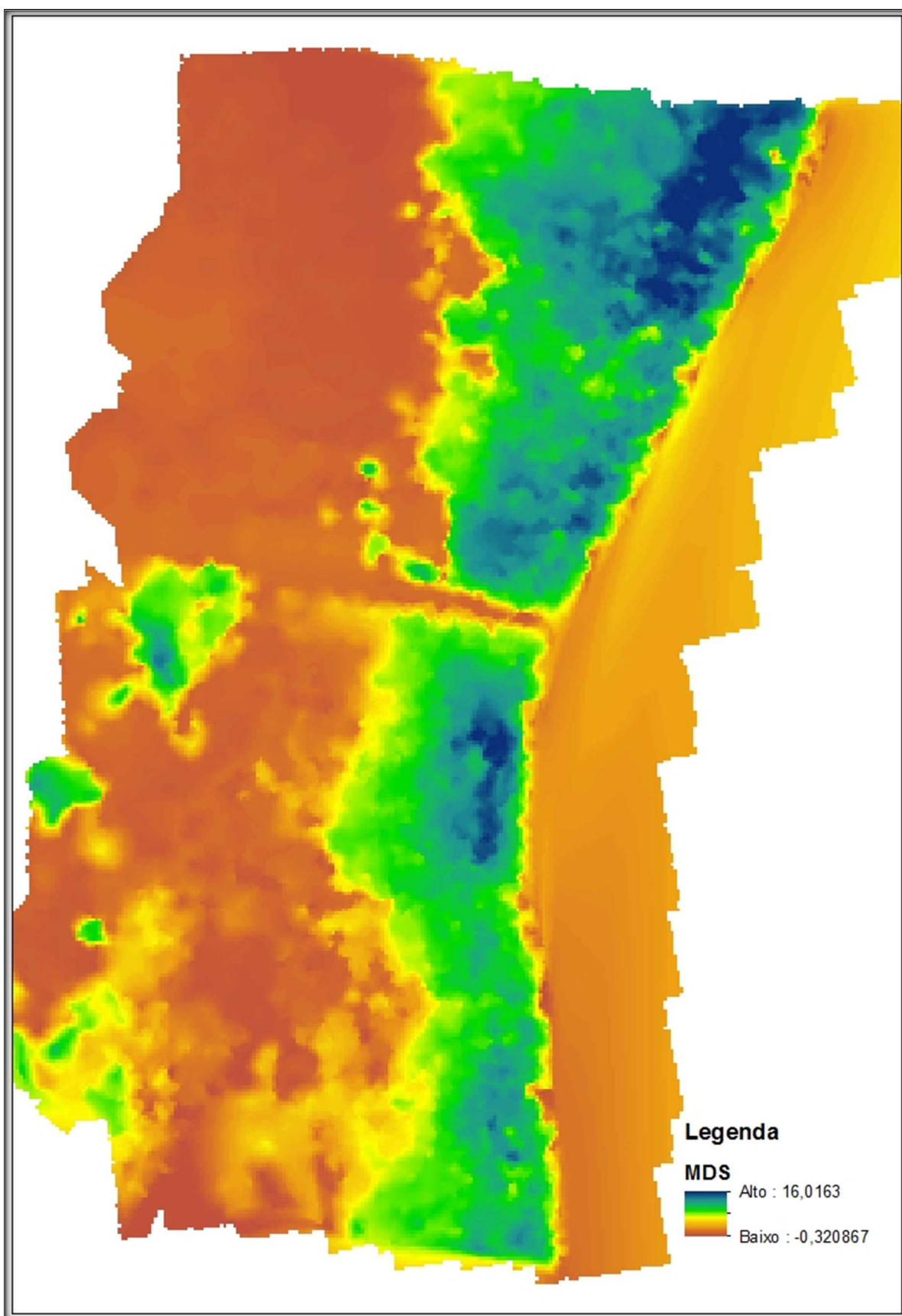
No processo de ortorretificação, uma vez que as imagens estejam orientadas devido ao processo de fototriangulação, utiliza-se uma nuvem densa de pontos homólogos para calcular suas posições tridimensionais com base nas diferenças de paralaxe, e assim, produzir o Modelo Digital de Superfície (MDS).

Estimativas diretas da altura das árvores e cálculo de biomassa são indicadores ecológicos importantes. O laser de varredura é amplamente empregado no estudo da vegetação florestal, porém esse método tem um custo muito elevado, além do que algumas espécies precisam de monitoramento com alta periodicidade devido à mudanças rápidas em sua estrutura (Li et al., 2015a,c). Por meio do MDS obtido por voos aerofotogramétricos utilizando uma RPA é possível obter de forma indireta a altura das árvores, e com custo mais acessível. Como a planície costeira é uma região muito plana, o MDS foi considerado igual ao Modelo digital do Terreno (MDT). As figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam respectivamente os Modelos Digitais de superfície de cada área de estudo.

**Figura 20:** MDS da área de Santa Maria.

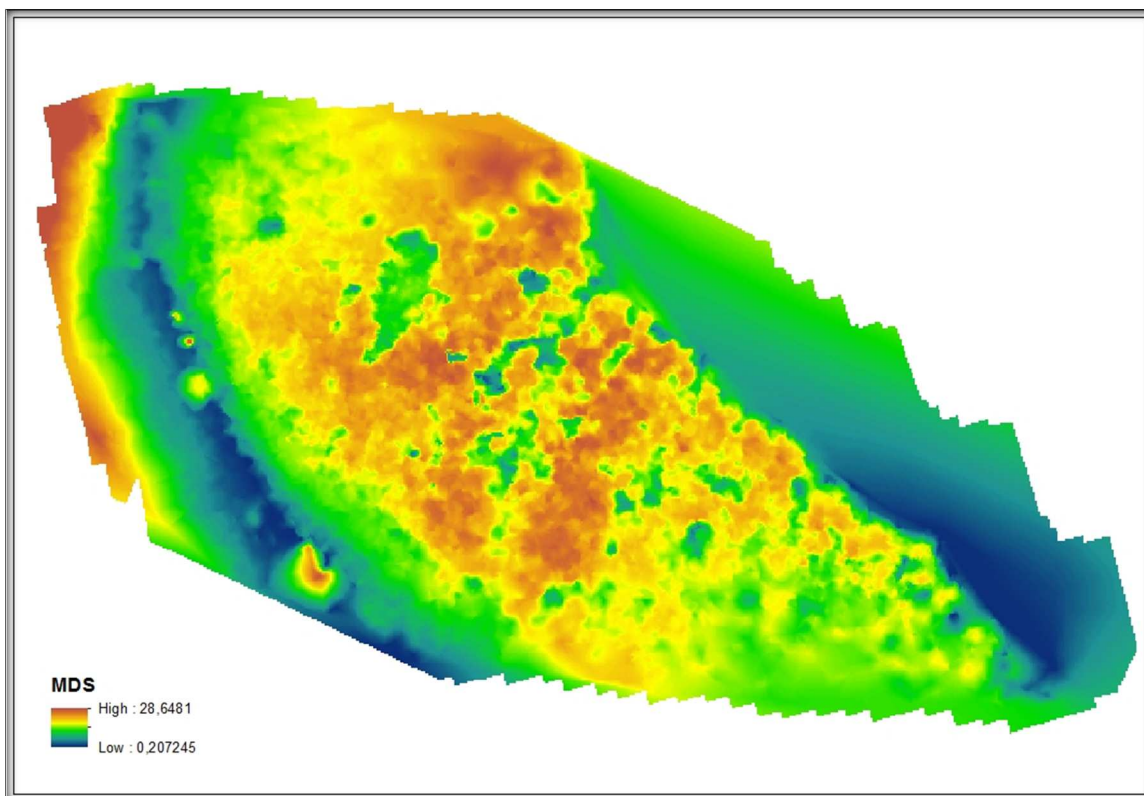


**Figura 21:** MDS da área de Areia Branca.

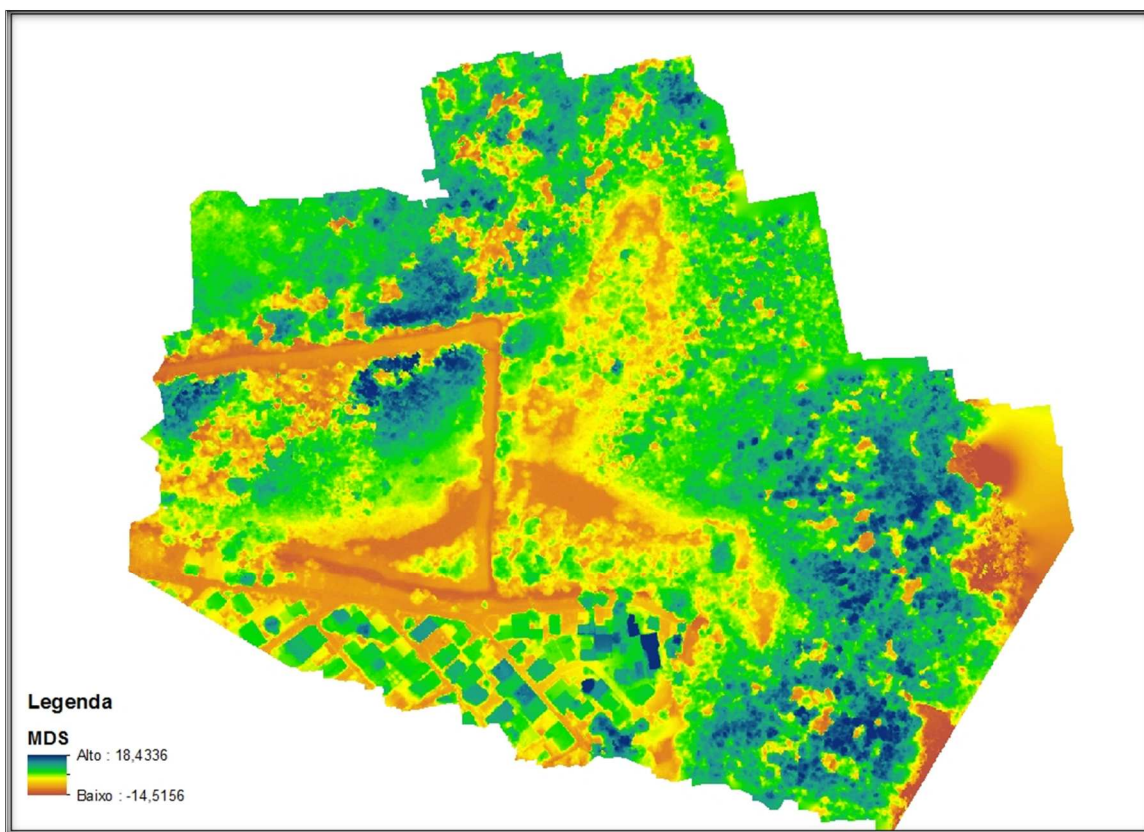




**Figura 22:** MDS da área de Porto Santana.



**Figura 23:** MDS da área de Porto Novo.



Para comprovar a possibilidade de uso do MDS para obtenção indireta da altura das árvores do mangue realizou-se uma análise de correlação das alturas médias de 18 parcelas medidas em campo utilizando o aparelho Vertex laser e a altura média das parcelas extraída do MDS. O coeficiente de correlação foi de 0,6 ( $r^2$  0,3,  $P < 0,05$ ).

Foi identificado que no MDS é possível obter somente a altura dos maiores dosséis da parcela, ou seja, as árvores menores que estão no sub-bosque não são detectáveis no MDS. Foi realizada uma nova análise estatística correlacionando dados da altura média das cinco maiores árvores de cada parcela medida em campo e das alturas médias das parcelas extraídas do MDS. O resultado da análise estatística apresentou um melhor resultado.

O MDS pode ser utilizado para inferir a respeito da altura média da parcela, fornecendo uma visão geral do padrão de distribuição de alturas do manguezal em trabalhos que não exige alta exatidão. Mesmo o manguezal estando situado em uma planície costeira com cotas muito próximas a zero, ainda é preciso considerar que existe uma microtopografia. Foi observado que o manguezal possui muitas áreas com clareiras, sendo assim é possível por meio de estereoscopia fazer a marcação de pontos no terreno e criar um Modelo Digital do Terreno. A obtenção do MDT a partir da filtragem de pontos do MDS permite a subtração dos dois modelos e obtenção da altura de árvores.

## 2.4. CONCLUSÕES

A partir das fotos aéreas obtidas com a câmera não métrica Tetracam ADC *Snap* embarcada em uma RPA, e por meio dos pontos de controle usados no terreno, foi possível realizar a aerotriangulação e obter ortomosaicos das fotos aéreas bem como uma nuvem de pontos cotados (MDS) para cada área de estudo. Os mosaicos de imagens apresentaram m GSD de 6,81 cm.

No planejamento de voo a previsão do tempo é de extrema importância, pois a velocidade média superficial do vento no momento do voo influencia em grande parte a estabilidade da RPA causando irregularidade da linha de voo. De acordo com as características da aeronave, como o peso, pode ser mais ou menos influenciada pelas condições meteorológicas. Sendo assim, pode ocorrer a inclinação do sensor comprometendo a aquisição da foto aérea vertical.

Os problemas na aquisição de fotos aéreas, principalmente por conta das variações da altitude e posição da plataforma, causam consequentemente dificuldades de correspondências de imagens homólogas pelo software aerofotogramétrico podendo ser melhorados com o aperfeiçoamento do sistema de posicionamento de GPS e o sistema inercial da RPA. A dificuldade em fazer a correspondência de fotos homólogas pode ser resolvida em parte, pela grande sobreposição lateral e longitudinal das faixas de voo, o que faz com que ocorra o registro de um mesmo objeto em várias fotos aéreas. Sendo assim é possível eliminar fotos aéreas com escala, rotação e translação variantes.

A qualidade dos dados radiométrico das fotos aéreas dependem em grande parte do sensor, como também da geometria formada entre a posição do Sol e o sensor no momento da aquisição das fotos. Tais geometrias governam as variações decorrentes da anisotropia ou do BRDF do alvo e precisam ser considerados durante a aquisição, processamento e análise dos dados espectrais. Nesta pesquisa realizou-se uma calibração radiométrica absoluta para transformação do número digital da foto aérea em reflectância.

Ainda em relação ao processo de calibração radiométrica, atualmente foram lançados no mercado câmeras com sensores que medem a radiância no momento do voo, e que facilitam o processo de calibração radiométrica. Isto é um ponto positivo para trabalhos em manguezal, pois elimina o uso do espectrorradiômetro em campo. Outra possibilidade seria desenvolver um modelo de calibração radiométrica com base na linha empírica. Recentemente estão sendo comercializadas RPA com tecnologia de posicionamento RTK, isto pode em um futuro breve eliminar o GCPs, que precisam ser colocados na área do sobrevoo para posterior orientação exterior. Este avanço tecnológico será importante para os trabalhos em manguezais considerando que é muito difícil o deslocamento bem como identificação de áreas propícias para a inserção dos GCPs.

Os pares estereoscópicos e o Modelo Digital de Superfície são produtos fotogramétricos importantes e que ajudam o pesquisador a entender a dinâmica do ecossistema manguezal e até mesmo eliminar ou minimizar os trabalhos de campo. A obtenção do MDT a partir da filtragem de pontos do MDS permite a subtração dos dois modelos e obtenção da altura de árvores. Nos casos em que o pesquisador precise de dados com maior exatidão ainda é recomendado o uso do sistema de perfilamento a LASER, baseado na tecnologia Light Detection and Ranging (LIDAR) ou coleta dos dados em campo.

## 2.5. REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, ANAC. **Regulamento brasileiro da aviação civil especial RBAC-E nº94, Requisitos gerais para Veículos Aéreos Não Tripulados e Aeromodelos** 2018. Disponível em:< <http://goo.gl/W2XrZY>> Acesso em: 03 março de 2018.

ALEMU G.; CHEN, J. M. **Spectral Response Function Comparability Among 21 Satellite Sensors for Vegetation Monitoring**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013.

ALVES JR. L. R.; CÔRTEZ J. B. R.; FERREIRA M. E. F.; SILVA J. R. **Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT**. In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil. 2015.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE. 243p. 1998.

BRITO, J. L. N. S.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. 196p. 1ª Ed. Rio de Janeiro, Ed UERJ, 2007.

CHANDELIER, R., MARTINOTY, G. **Radiometric aerial triangulation for the equalization of digital aerial images and orthoimages**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. pp 193-200. 2009.

DEL POZO, S.; RODRIGUEZ-GONZÁLEZ, P.; HERNADEZ- LÓPEZ, D.; FELIPE-GARCIA, B. **Vicarious Radiometric Calibration of a Multispectral Camera on Board an Unmanned Aerial System**. *Remote Sensing*. pp 1918-1937. 2014.

GAO, F.; JIN, Y.; LI, X.; SCHAAF, C. B; STRAHLER, A. H. **Bidirectional NDVI and Atmospherically Resistant BRDF Inversion for Vegetation Canopy**. *IEEE Transactions on Geoscience and RemoteS*, vol. 40, no. 6. 2002.

GAO, F.; JIN, Y.; LI, X.; SCHAAF, C. B; STRAHLER, A. H. JIN, Y.; LI, X. **Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model**. *Remote Sensing of Environment*. pp 98–205. 2003.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos N. Epiphanyo, Antonio R. Formagio, Athos R. Santos, Bernardo F. T. 138

JORGE, L.A.C.; INAMASU. R. Y.; CARMO R. B. **Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações de Precisão no Brasil**. In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, Brasil. P 399. 2011.

JUNIOR. L. R. A.; CÔRTEZ J. B. R.; FERREIRA M. E.; SILVA J. R. **Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT**. In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil. 2015.

HAKALA, R.; SUOMALAINEN, J.; PELTONIEMI, J. I. **Acquisition of Bidirectional Reflectance Factor Dataset Using a Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Consumer Camera**. *Remote Sensing*. pp 819-832. 2010.

HAKALA, T.; HONKAVAARA, E.; SAARI, H.; MÄKYNEN, J.; KAIVOSOJA, J.; PESONEN, L.; PÖLÖNEN, I. **Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions**. *Int. Arch. Photogramm.Remote Sens. Spat. Infor. Sci.* XL-1/W2, 189–194. 2013.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY E.; ZARCOTEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. **Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture**. *Remote Sensing of Environment*. v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>.

HONKAVAARA, E., JAAKKOLA, J., MARKELIN, L., PELTONIEMI, J., AHOKAS, E., BECKER, S. **Complete photogrammetric system calibration and evaluation in**

**the Sjökkulla test field – case study with DMC.** In *the Proceedings of EuroSDR Commission I and ISPRS Working Group 1/3 Workshop EuroCOW*, 25-27 January 2006, Castelldefels, Spain, unpaginated CD-ROM, 6p. 2006.

HONKAVAARA, SAARI, H.; KAIVOSOJA, J.; POLONEN, I.; ET AL. **Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture.** *Remote Sensing* doi:10.3390/rs5105006. 5(10), 5006-5039. 2013.

KAMAL, M., PHINN, S.; JOHANSEN, K. **Characterizing the spatial structure of mangrove features for optimizing image-based mangrove mapping.** *Remote Sensing*, 6, 984–1006. 2014.

KANNAN, T. T.; KUMAR, A., D. A. **Remote Sensing for Mangrove Forest Management.** CAS in Marine Biology, Annamalai University, Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/application/environment/wetland/envwm0002.htm>>. Acesso: 31/7/2005.

KRAUS, KARL. **Photogrammetry.** Bonn: Dümmler. Volume 1 397 p. 1992.

MAIGNAN, F ; BRÉON, F.-M ; LACAZE, R. *Remote Sensing of Environment.* Vol.90(2), pp.210-220. 2004.

MAIN, R., CHO, M. A., MATHIEU, R., O’KENNEDY, M.M., RAMOELO, A., KOCH, S. **An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2011): 751-761. 2011.

MANFREDA S.; MCCABE M. F.; MILLER P. E.; ET AL. **On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring.** *Remote Sensing.* 2018. 10, 641.

MARKELIN, L., E. HONKAVAARA, PELTONIEMI E. A.; KUITTINEN R.; HYYPPÄ J.; SUOMALAINEN J.; A. KUKKO,. **Radiometric Calibration and Characterization of Large-format Digital Photogrammetric Sensors in a Test Field.** *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* Vol. 74 N° 12. pp 1487-1500. 2008.

MARKELIN, L. **Radiometric Calibration, Validation and Correction of Multispectral Photogrammetric Imagery.** Doctoral Dissertation. 2013.

MCCOY, R. M. **Field methods in Remote Sensing.** The Guilford Press. 159 p. 2005.

MILTON, E. J. **Review Article Principles of field spectroscopy.** *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 12, p. 1807–1827, 1987.

NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, R. C.; GINSBERG, J. W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance.** U.S. Department of Commerce/ National Bureau of Standards. Washington DC: Unites States Government Printing Office. 52 p. 1977.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed. p.111-118. 2007.

REBELO-MOCHEL, F.; PONZONI, F. J. **Spectral characterization of mangroves leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State**. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 79. 2007.

TETRACAN Inc. 2012,. Disponível em: <<http://www.tetracam.com/PDFs/ADC%20SNAP%20Users%20Guide%20V1.1.pdf> > Acesso em: 01 mar. 2017.

SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHAEPMAN, M. E.; PAINTER, T. H.; DANGEL, S.; MARTONCHIK, J.V. **Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies**. Remote Sensing of Environment, v. 103, p. 27-42, 2006.

SCHOWENGERDT, R.A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. Third Edition. Elsevier. 2007.

SILVA D. C. da G.; CANDEIAS A. L. B. **Causas da Iluminação não Uniforme em Fotografias Aéreas Coloridas**. Revista Brasileira de Cartografia No 61/02, 2009.

SILVA, D. C. da G.; TOONSTRA W. A.; SOUZA H. L. S.; PEREIRA T. Á. J. **Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de Vant Processados com os Softwares Aps, Pix4d E Photoscan**. V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 12- 14 de Nov de 2014.

WANG, L., SOUSA, W.P., GONG, P. and BIGING, G.S. **Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of panama**. Remote Sensing of Environment, 91, pp. 432–440. 2004.

WANG, L.E., SOUSA, W.P. **Distinguishing mangrove species with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance**. Int. J. Remote Sens. 30 (5), 1267–1281. 2009.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. **The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review**. Precis. Agric. 13, 693. 2012.

ZHANG, C.; WALTERS, D.; KOVACS, J.M. **Applications of low altitude remote sensing in agriculture upon farmer requests - A case study in northeastern Ontario, Canada**. PLoS ONE. 9, e112894. 2014.

### 3. ESTIMATIVAS DE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR MEIO DE IMAGENS OBTIDAS POR UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA EM UM MANGUEZAL URBANO DA BAÍA DE VITÓRIA

#### RESUMO

O manguezal urbano da Baía de Vitória possui diversos tensores antrópicos, e isso interfere na resposta espectral foliar das espécies de mangue. Identificar o comportamento espectral dessas espécies, e criar modelos de regressão para obter de forma indireta dados de estrutura, como o Índice de Área Foliar (IAF) se torna uma poderosa ferramenta de monitoramento ambiental desse ecossistema. As imagens orbitais já comprovaram sua eficiência para este propósito, porém as imagens obtidas por uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) ainda precisam ser mais bem avaliadas, principalmente os métodos de calibração radiométrica. Se por um lado imagens orbitais possuem elevado grau de qualidade geométrica e espectral, por outro a RPA possui altíssima resolução espacial, permitindo ao pesquisador uma escala com um nível de detalhe da árvore. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi testar a viabilidade do uso de uma RPA para aquisição de imagens espectrais e obtenção indireta dos dados estruturais do mangue. Foram coletados em campo dados de estrutura obtida em 32 parcelas distribuídas em quatro estações. As parcelas são monoespecíficas com dominância acima de 90% de indivíduos de *Rhizophora mangle* ou de *Laguncularia racemosa*. A partir das imagens foram gerados os índices de vegetação (IVs), como o NDVI e o SAVI. As análises de correlação do IAF *in situ* e os IVs resultaram em relações positivas significativas, porém o índice SAVI foi o que apresentou melhor resultado ( $r^2 = 0,43$ ). Quando realizada a análise somente dos dados das parcelas que apresentavam 100% de dominância das espécies (*R. mangle* ou *L. racemosa*), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para IAF versus SAVI aumentou para 0,52. Na análise dos dados utilizando somente as parcelas de *R. mangle*, os valores de  $r^2$  para o SAVI foi de 0,58. A variabilidade dos bosques com relação ao grau de maturidade e heterogeneidade estrutural e o IAF influenciaram no ajuste dos IVs. Os maiores valores do coeficiente de determinação foram obtidos a partir da imagem SAVI com dados de campo mais homogêneos representados pelas parcelas da espécie *R. mangle*, e com maiores valores de IAF. Os mesmos dados coletados em campo foram correlacionados com os IVs (NDVI e SAVI) obtidos por uma imagem *RapidEye* para efeito de comparação. Na análise de correlação os dados apresentaram significância e o coeficiente de determinação para IAF versus NDVI e para IAF versus SAVI foram de  $r^2 = 0,7$ . Os resultados apontam que mesmo usando dados espectrais de uma imagem *RapidEye*, a análise de correlação não apresentou um coeficiente de determinação elevado demonstrando que o uso de IVs aplicado ao estudo de manguezais urbanos e antropizados possui um grau de dificuldade ainda maior.

## ABSTRACT

The urban mangrove of the Bay of Vitória, Espírito Santo State, Southern Brazil suffers several anthropic tensors, which interfere in the foliar spectral response of its species. Identifying the spectral behavior of these species and creating regression models to indirectly obtain structure data like the Leaf Area Index (LAI) are powerful environmental monitoring tools for this ecosystem. Orbital images have been shown to be useful for this purpose; however, unmanned aerial vehicle (UAV) images still need to be better evaluated, particularly concerning the methods of radiometric calibration. Although the orbital images have a high degree of geometric and spectral quality, UAV has a very high spatial resolution that accesses a scale at tree-level. In this context, the present study tested the feasibility of the UAV use in acquiring spectral images and indirectly accessing the structural data of an urban mangrove in the Bay of Vitória, Brazil. Field data were collected in 32 plots distributed in four stations. The plots were monospecific, with > 90% dominance of *Rhizophora mangle* or *Laguncularia racemosa* trees. Two vegetation indices, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), were generated from the images. In situ LAI regression analysis with the Vegetation indices resulted in significant positive relationships, with SAVI presenting the best result (coefficient of determination -  $r^2 = 0.43$ ). In analyses of plots with 100% dominance of *R. mangle* or *L. racemosa*, the  $r^2$  value of LAI x SAVI increased to 0.52; when using the data only of the plots dominated by *R. mangle*, the  $r^2$  of SAVI was 0.58. Forest variability regarding the degree of maturity and structural heterogeneity and LAI influenced the adjustment of vegetation indices. The highest regression values were obtained for the SAVI image with the most homogeneous field data, represented by *R. mangle* plots, which also had higher LAI values. The same field data were correlated with NDVI and SAVI of a RapidEye image for comparison purposes. The data had significant values in the correlation analysis, with  $r^2 = 0.7$  for LAI x NDVI and LAI x SAVI. The results showed that, even for the satellite images, the correlation analysis did not show a high coefficient of determination, suggesting that the use of vegetation indices applied to the study of urban mangroves need to be better evaluated, noting the factors influencing foliar spectral response.



### 3.1. INTRODUÇÃO

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido como a área foliar total projetada por unidade de área de terreno ( $m^2/m^2$ ) (DAUGHTRY et al., 1992). Este índice permite estabelecer relações com a biomassa vegetal e caracterizar a arquitetura do dossel, dois parâmetros estruturais que fornecem informações sobre o vigor da cobertura vegetada. Estas estimativas permitem avaliação das condições fisionômicas e fisiológicas dos dosséis, bem como, análises quantitativas e qualitativas das trocas entre energia e matéria ocorridas nos mesmos (HABOUDANE et al., 2004).

Estudos de sensoriamento remoto utilizando sensores orbitais estabeleceram relações entre índices de vegetação (IVs) e o IAF (Green et al., 1997; Kovacs et al., 2004; Wang & Souza 2007), além de outras informações biofísicas, como biomassa e densidade do dossel (Proisy et al., 2007; Umarhadi & Syarif, 2017) e de distribuição de espécies (MIHSONI ET AL. 2018).

Segundo Ponzoni et al. (2012), a estimativa do IAF por meio de técnicas de sensoriamento remoto sofre influência do tipo de solo, e da sombra, sendo esta um elemento que também introduz discrepâncias nos resultados, normalmente acarretando diminuição na radiância refletida.

O tipo de cobertura vegetal, a orientação e espaçamento das árvores, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõem um dossel, diâmetro da copa da árvore, altura, teor de água na planta e no solo, condição fitossanitária, ângulo zenital e azimutal do Sol, latitude e tamanho de resolução do equipamento utilizado são fatores que contribuem para afetar o comportamento espectral de um dossel da vegetação (KOLLENKARK ET AL., 1982).

O Índice de Vegetação Ajustada ao Solo (SAVI) é um índice que busca amenizar os efeitos do *background* do solo e foi proposto por HUETE (1988), com base em estudos realizados em condições distintas de solo e de cobertura vegetal.

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (1)$$

Onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_V$  equivalem às reflectâncias das bandas 4 e 3 do satélite Landsat 5 TM e o L pode variar entre 0,1 a 0,5 de acordo com as características do dossel analisado.

O índice SAVI foi criado visando amenizar o efeito de solo e se baseia no princípio de que a curva de vegetação tende a aproximar-se da curva de solo para baixas densidades de vegetação, passando por uma mistura de respostas espectrais para densidades médias e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação (Huete, 1988). O SAVI consiste na própria fórmula do NDVI, acrescida de uma constante L, que varia de 0 a 1, dependendo do grau da maior ou menor cobertura do solo, respectivamente.

Seguindo o mesmo princípio vieram três modificações do SAVI: o TSAVI (Baret et al., 1989) e (Baret and Guyot, 1991), o MSAVI (Qi et al., 1994) e o OSAVI (Rondeaux et al., 1996).

Zhang et al. (2012) afirmam que com o surgimento de sensores hiperespectrais, outros índices de vegetação foram criados, como o Index of Pigment for Simple Reason (PSRR) que analisa pigmentos fotossintéticos, o Structure Index for Pigment Insensitive (SIPI) que analisa a estrutura e conteúdo de água (WI).

Para se trabalhar com índices de vegetação é fundamental realizar a calibração radiométrica. A calibração é o processo de transformação do número digital (ND) de cada pixel da imagem para valores de parâmetros físicos como a radiância ou reflectância (PONZONI ET AL., 2012).

De acordo com Schaepman-Strub et al. (2006), a reflectância de um alvo pode ser descrita como uma função do comprimento de onda e das direções de irradiação e observação denominada de Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (BRDF).

No processo de correção da BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) é considerado as variações da energia registrada nas imagens causadas pelas diferenças de geometria e instante de aquisição das imagens, e anisotropia dos alvos. Também é considerado informações angulares do Sol e do sensor e, pontos comuns nas imagens (HONKAVAARA et al., 2013b).

Embora os aspectos do BRDF muitas vezes possam ser negligenciados na análise de imagens de satélite detectadas na direção da visão vertical e com pequeno campo de visão angular (por exemplo, imagens Landsat), as propriedades de refletância direcional são importantes para dados de imagem de sensores com direção de visão direcionável (por exemplo, Ikonos) e de sensores com um grande campo de visão angular, por exemplo, sensor MODIS, scanners aéreos e câmeras aéreas (KOUKAL & SCHNEIDER 2010).

No processo de calibração radiométrica de fotografias aéreas obtidas por uma RPA a calibração é feita foto a foto, e não da cena inteira como nas imagens orbitais, e variação no sistema de navegação (GNSS) e do sistema inercial da RPA podem ocasionar variações do ângulo zenital de visada ( $\theta_v$ ). Segundo Koukal & Schneider (2010), é impossível realizar medições direcionais de dosséis em laboratório, e é muito difícil implementar medições de refletância direcional ao ar livre. No entanto, as fotos aéreas digitais, quando tiradas com alta sobreposição frontal e lateral, fornecem uma ferramenta conveniente para analisar os efeitos de refletância direcional.

Vários autores publicaram correlações positivas entre as estimativas coletadas em campo do IAF e os índices de vegetação (por exemplo, NDVI) derivados de imagens de satélite (Ramsey e Jensen, 1996; Green et al., 1997). Consequentemente, eles sugerem que os mapas temáticos altamente precisos de IAF podem ser derivados desses sensores repetidamente em áreas consideráveis sem a necessidade de um grande número de medições de solo. A grande maioria dos trabalhos é em florestas de manguezais bem desenvolvidas e, consequentemente, a robustez de tal relação em condições menos ideais, isto é, em parcelas de manguezais urbanos e antropizados precisam ser mais

estudadas (KOVACS ET AL., 2003). Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é testar a viabilidade do uso de uma RPA para extrair informações da estrutura das árvores do manguezal da Baía de Vitória. Foi realizada análise de correlação dos dados coletados *in situ* (IAF, DAP, Altura e Densidade de Indivíduos) e IVs (NDVI, SAVI) obtidos por meio de ortofotos adquiridas por uma RPA. Foram calculados também IVs por meio de imagem do satélite *Rapideye* e realizado análise de correlação com os mesmos dados de campo para que fosse possível comparar os resultados.

### 3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em cada área de estudo (Santa Maria, Areia Branca, Porto Santana e Porto Novo) foram delimitadas oito parcelas 10 x 10 metros contabilizando um total de 32 parcelas. Os dados foram coletados no período de junho a julho de 2016. A metodologia empregada para obtenção e análise dos dados estruturais está descrita em Schaeffer-Novelli e Cintron (1986). A altura das árvores foi obtida por meio do aparelho Vertex Laser e o diâmetro por meio de fita métrica calibrada em (*Forestry Suppliers*) produzindo com isto leituras diretas e não dados de circunferência. Foram medidas com GPS RTK Trimble as coordenadas dos vértices das parcelas para posterior criação de um arquivo shapefile georreferenciado em um Sistema de Informação Geográfica. O Índice de Área Foliar (IAF) foi coletado por meio do aparelho LAI 2000 *Plant Canopy Analyser* - LICOR. As medições de IAF foram feitas em dias nublados, para que os dados não fossem superestimados, e para cada parcela foram realizadas cinco medições. As medições ocorreram por tomadas em zigue zague orientadas pela linha transversal da parcela. Foi calculado no escritório a média das medições para cada parcela.

A RPA utilizado nesta pesquisa foi um Hexacóptero, modelo X700. O Hexacóptero possui dimensão de 1,05m x 0,72m e pesa sem bateria e guimbal 3 quilos. A bateria utilizada (LIPO 5200mah a 6000mah 4S Tattu) permite uma autonomia de 13 minutos de voo. Ele foi equipado com uma câmera multiespectral Tetracam ADC *Snap* (Tetracam Inc., Chatsworth, CA, USA) pesando 90 g. Esta câmera possui três canais com resolução do CCD - *Charge Coupled Device* de 1280 X 1024 pixels, resolução radiométrica de 10 bits, tamanho de pixel de 5 microns e distância focal de 8,43 mm. A abertura do diafragma é de f/3.2, com tempo de exposição de 110 % e de captura, aproximadamente, de 2 segundos. A Tetracam ADC *Snap* é uma câmera não métrica de pequeno formato e possui os canais verde, vermelho e infravermelho próximo, e registra os comprimentos de ondas no intervalo de 520 nm a 920nm.

Considerando-se a autonomia do equipamento e a distribuição das áreas de estudo, optou-se por executar voos curtos e individuais sobre cada área. O plano de voo foi elaborado no software livre Mission Planner 1.3.41 (*Copyright 2016, ArduPilot Dev Team*). Os voos foram executados no mês de outubro de 2016. A retificação geométrica foi feita por um ajuste de bloco usando informações sobre a orientação exterior coletada durante o vôo com uma instrumentação GPS / INS (Posicionamento Global Sistema de Navegação Inercial do Sistema) e medições GPS com pontos de controle no terreno (GCPs). Os GCPs foram medidos utilizando um par de receptores de sinais GNSS da marca Trimble, modelo RTK, configurado com máscara de elevação de 15° e taxa de

gravação de 1 segundo. O método de rastreamento utilizado foi estático rápido, com tempo de ocupação de aproximadamente 5 minutos. O receptor denominado base recebia em tempo real as correções das coordenadas da Base do IBGE por meio de sinal de telefonia. Os dados foram processados no Datum SIRGAS 2000 no sistema de projeção UTM, zona 24, meridiano central -39°. Os dados foram descarregados no software Trimble Business Center e exportados no formato planilha. Foi feita a transformação da altura elipsoidal para a ortométrica por meio do cálculo da ondulação geoidal no software gratuito Mapgeo 2015 v 1.0.

As ortofotos foram produzidas a partir do software fotogramétrico digital Agisoft Photo Scan Professional versão 1.0.4. Este software realiza operações, como orientação interna, correspondências automáticas entre todas as imagens que tenham alguma sobreposição, ajustamento simultâneo de feixes em bloco e geração dos produtos, como Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital do Terreno (MDT) e ortomosaicos. As intervenções do operador são necessárias no que diz respeito a definição de alguns parâmetros, como método de processamento das correspondências, densidade de pontos do MDT, tamanho do menor elemento no terreno ou tamanho dos recortes do ortomosaico (AGISOFT PHOTOSCAN, 2018).

O processo de calibração radiométrica baseou-se na conversão de número digital das imagens em fator de reflectância. A caracterização espectral do alvo de calibração (superfície de referência) foi obtida concomitante com a passagem do sensor sobre ele, por meio de um espectrorradiômetro modelo FieldSpec Pro (ASD Inc.). Este equipamento é um instrumento portátil que permite capturar dados espectrais na região de 350 nm a 2500 nm, com uma resolução espectral de 1 nm.

Foi utilizado uma placa de E.V.A (Etilvinilacetato) como padrão de referência absoluto, pois este material apresenta uma reflectância uniforme nos comprimentos de ondas do sensor utilizado, aproximando-se muito do comportamento espectral da placa Spectralon. Durante a aquisição dos dados, a pistola do espectrorradiômetro formou um ângulo de incidência ortogonal com a placa de E.V.A, e foram tomadas três medidas espectrais, uma no início do voo, durante e outra no final.

O cálculo da reflectância da placa de referência foi realizado ponderando a resposta espectral da média das medidas radiométricas sobre a placa às bandas estreitas 550, 680 e 800 nm. A função de sensibilidade espectral do sensor, conhecida como *Spectral Response Function* (SRF), pode ser simulada na forma de uma função gaussiana, correspondendo à eficiência máxima do sensor em determinada banda. A SRF pode ser calculada utilizando a resposta espectral do alvo (STEIN ET AL., 1999).

A conversão do número digital de cada componente B1, B2 e B3 em fator de reflectância foi realizado separadamente no ambiente de processamento de imagem MatLab com base na equação 1 sugerida por Miura e Huete (2009):

$$R = \frac{NDt(t\theta)}{NDr(t1)} * Rr \quad (2)$$

Em que:

NDt é o número digital da placa de referência na imagem;

NDr é o número digital da imagem a qual a placa de referência está inserida; e

Rr é o fator de reflectância da placa de referência medido com o espectrorradiômetro, durante o voo.

A imagem *RapidEye Analytic Ortho* é uma imagem multiespectral, ortorretificada cedida pela empresa Planet © 2017. A cena foi adquirida no dia 08/10/2016 às 13:23 h (UTC) ao nadir.

Foi realizado o processo de calibração radiométrica a partir do aplicativo computacional ENVI 5.1 por meio do algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH). Todas as bandas foram transformadas de números digitais (DN) para medidas de radiância no topo da atmosfera, e posteriormente para valores de reflectância. Tal conversão só é possível para cenas que apresentam arquivos de metadados (MTL), possibilitando o processo presente na Equação 3 (EXELIS, 2014).

$$L\lambda = G_{an} \cdot o * DN \text{ do pixel} + offset \quad (3)$$

Foi utilizado a calculadora raster do software ArcGIS v.10.1 (ESRI) para realizar operações aritméticas entre as bandas espectrais, e gerar os índices espectrais NDVI e SAVI tanto dos ortomosaicos quanto da imagem *RapidEye*. Em seguida, neste mesmo software foi criado arquivos shapefiles dos polígonos das parcelas (10 x 10 metros), a partir de pontos de coordenadas medidos em campo com GPS RTK Trimble. As imagens dos índices espectrais foram recortadas utilizando os shapefiles e determinado os valores médios desses índices para cada parcela.

As relações existentes entre as variáveis dependentes IAF, Altura, Densidade e DAP obtidas *in situ*, e as variáveis independentes NVDI e SAVI (Índices de vegetação) calculadas com base nas imagens, foram testadas uma a uma. O procedimento de análise de regressão teve que passar no teste F e no teste T para determinar o resultado da modelagem de regressão. A análise de regressão utilizou o método de modelagem de regressão linear simples. O valor de acurácia do modelo de regressão foi obtido a partir do cálculo dos erros padrão do valor de estimação. Este erro pode ser convertido em precisão mínima e máxima com nível de confiança de 95% (Wicaksono et al, 2011). O valor de precisão máxima é usado como a comparação de precisão de cada modelo.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram elaborados mapas dos índices de vegetação NDVI e SAVI para as quatro estações. Observou-se que no mapa de NDVI as clareiras do manguezal apresentaram índices altos por conta do solo úmido e conteúdo de matéria orgânica. No mapa de SAVI utilizou-se o fator de ajuste de 0,5 obtendo-se um resultado melhor se comparado ao mapa de NDVI. Foi possível separar as clareiras do dossel, e os valores do índice para *L. racemosa* foram mais baixos do que para *R. mangle*, possibilitando a discriminação das espécies e identificando do padrão de sucessão (Figura 1a e 1b).

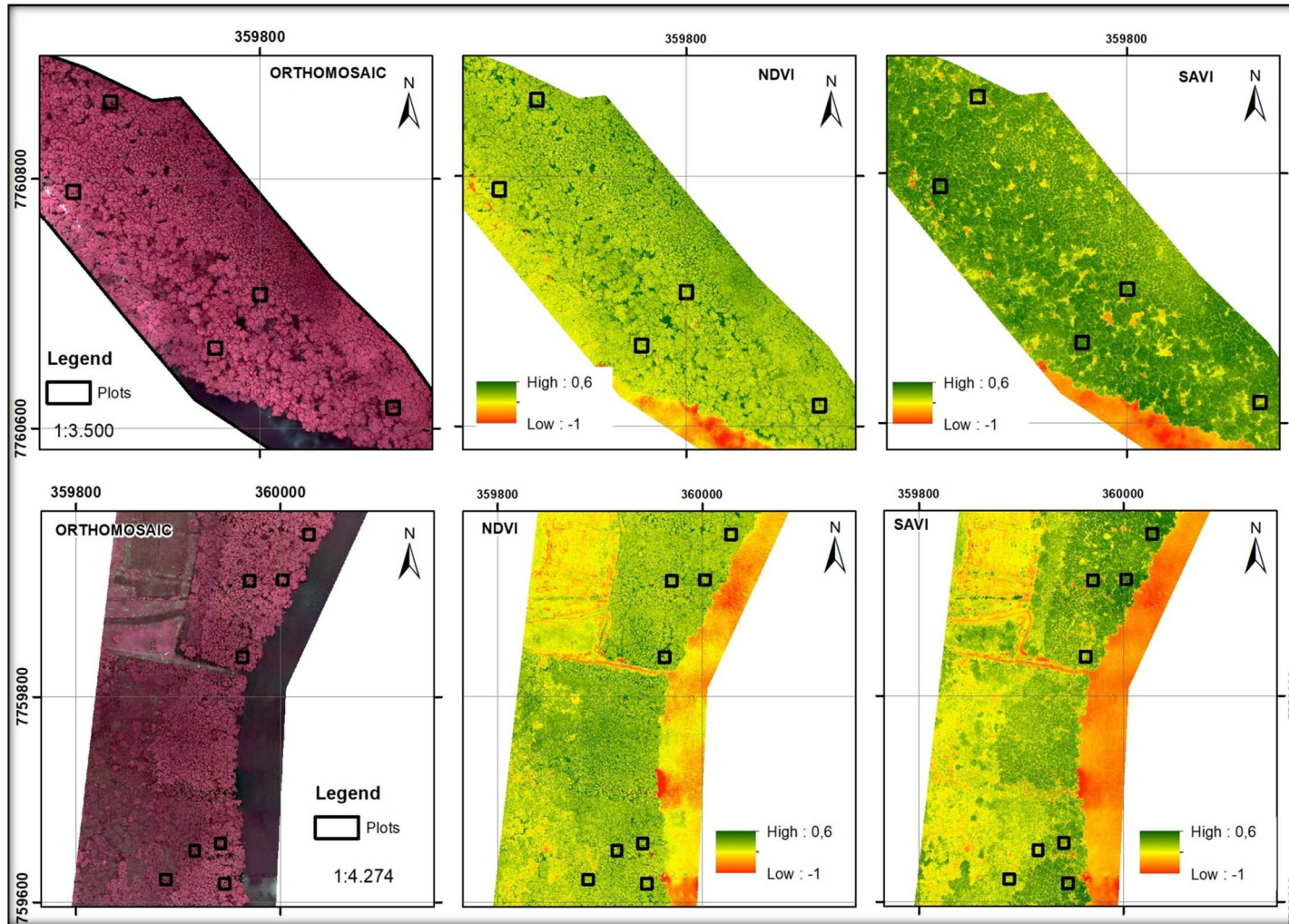
Os dados estruturais coletados em campo e os índices espectrais obtidos dos ortomosaicos e da imagem *Rapideye* estão apresentados na Tabela 1.

Os dados de estrutura das parcelas foram convertidos em estimativas de dominância de área basal por parcela (Figura 2), isto é, área de solo ocupada por biomassa de indivíduos. A espécie *R. mangle* foi dominante na maioria das parcelas com destaque para a área de Santa Maria, sendo que *L. racemosa* foi dominante em apenas oito parcelas.

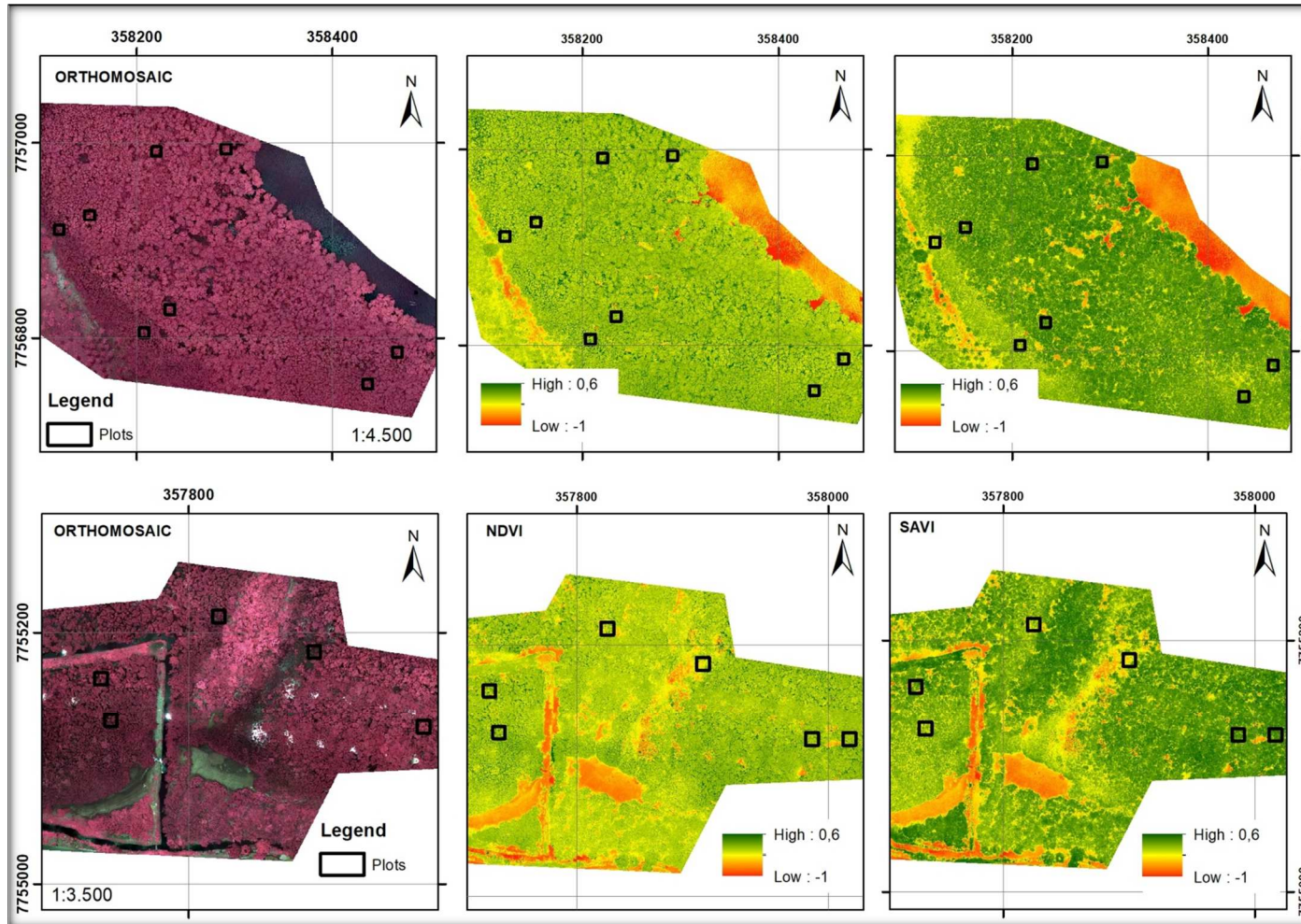
A densidade dos bosques foi correlacionada negativamente com o DAP médio ( $R = -0,78$ ,  $p < 0,05$ , Teste de Spearman). Esses resultados estão em conformidade com o pressuposto por Schaeffer-Novelli e Cintrón (1986) que demonstraram que a densidade se reduz em bosques mais maduros quando o DAP médio passa a ser maior. Esses bosques se caracterizam por possuir poucas árvores de maiores diâmetros.

Os bosques de Santa Maria apresentaram menores valores de densidade do que as demais áreas, exibem maior desenvolvimento estrutural (Figura 3), e são caracterizadas por bosques monoespecíficos de *R. mangle*. As estações estão localizadas em áreas mais lamosas, e estão mais distantes da ocupação urbana. Os valores de IVs são mais altos que os da média.

**FIGURA 1a: Ortomosaicos e Imagens NDVI e SAVI para quatro áreas de estudo no manguezal da Baía de Vitória. Os mapas da superior são da área de Santa Maria, e parte inferior da área de Areia Branca.**



**FIGURA 1b: Ortomosaicos e Imagens NDVI e SAVI para quatro áreas de estudo no manguezal da Baía de Vitória. Os mapas da superior são da área de Porto Santana, e parte inferior da área de Porto Novo.**

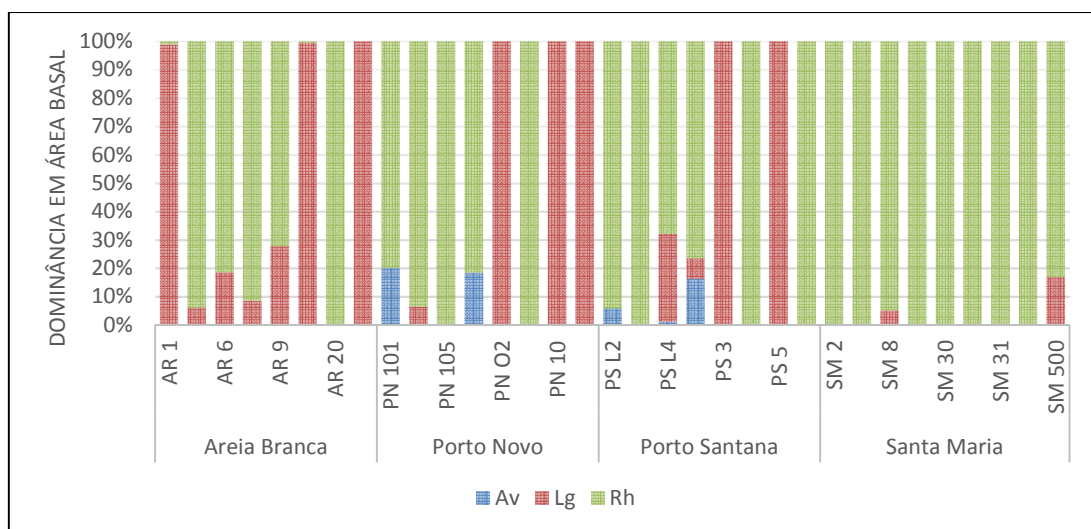




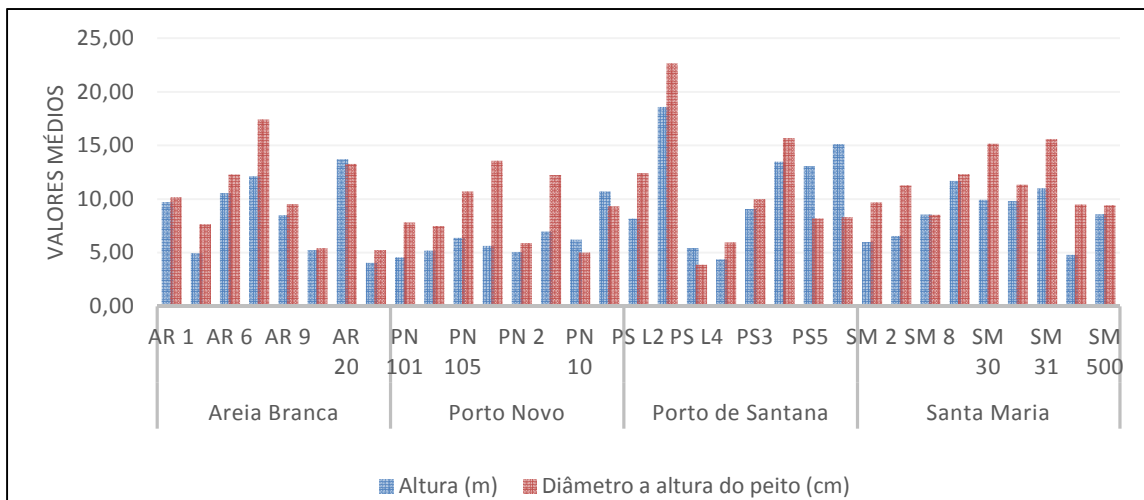
**Tabela 1:** Dados de estrutura e índice de vegetação das quatro áreas de estudo. RZ, *Rizophora mangle*; LG, *Laguncularia racemosa*; IAF, Índice de área foliar; DAP, Diâmetro a altura do peito; F, mangue de franja; B, mangue de bacia.

LOCAL	TIPO	Parcelas	IAF campo (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Densida de	DAP Médio	Tr./Ind.	Tipo de Bosque	Altura (m)	NDVI VANT	SAVI VANT	NDVI Rapideye	SAVI Rapideye
Porto Novo	RZ	101	1,97	4600	7,8	1,1	F	4,57	0,54	0,45	0,84	0,49
Porto Novo	RZ	102	2,24	2400	7,48	1	F	5,19	0,54	0,43	0,82	0,46
Porto Novo	LG	ponto 10	2,06	7900	5,02	1,15	B	6,21	0,55	0,34	0,73	0,35
Porto Novo	LG	ponto 11	2,27	5100	9,32	1,1	B	10,7	0,56	0,36	0,79	0,41
Porto Novo	LG	ponto 2	1,82	5700	5,91	1,2	B	5,07	0,49	0,34	0,6	0,3
Porto Novo	RZ	ponto 3	0,85	800	12,24	1,5	B	6,98	0,42	0,28	0,6	0,3
Porto Santana	LG	PS3	0,96	3500	9,98	1	B	9,07	0,57	0,29	0,6	0,3
Porto Santana	RZ	PS4	1,68	1200	15,7	1	B	13,47	0,59	0,38	0,82	0,45
Porto Santana	LG	PS5	1,48	5400	8,21	1	B	13,08	0,63	0,33	0,76	0,34
Porto Santana	RZ	PS7	2,22	2400	8,33	1,1	B	15,13	0,59	0,41	0,87	0,5
Porto Santana	RZ	100	1,82	7300	5,96	1	F	4,4	0,59	0,4	0,82	0,49
Porto Santana	RZ	L2	1,49	2600	12,42	1	B	8,16	0,61	0,36	0,79	0,44
Porto Santana	RZ	L3	2,61	900	22,66	2	F	18,6	0,59	0,42	0,84	0,53
Porto Santana	RZ	L4	3,93	9800	3,88	1	B	5,41	0,64	0,4	0,84	0,47
Areia Branca	LG	AR1	1,57	6100	10,19	1,3	F	9,73	0,66	0,32	0,77	0,37
Areia Branca	RZ	AR6	2,36	2200	12,28	2,7	B	10,55	0,6	0,36	0,87	0,47
Areia Branca	RZ	AR5	2,88	3000	7,68	1,1	F	4,95	0,62	0,41	0,88	0,49
Areia Branca	RZ	AR7	2,26	1100	17,42	1,3	F	12,1	0,57	0,43	0,84	0,5
Areia Branca	RZ	AR9	1,92	1300	9,51	1,3	F	8,5	0,62	0,33	0,85	0,46
Areia Branca	LG	AR11	2,12	6500	5,43	1,3	B	5,22	0,63	0,28	0,72	0,31
Areia Branca	LG	AR 1000	1,65	7200	5,26	1,5	B	4,07	0,56	0,28	0,61	0,25
Areia Branca	RZ	AR20	2,77	1500	13,29	1,3	F	13,13	0,57	0,4	0,85	0,49
Santa Maria	RZ	STA2	2,39	2200	9,69	1,3	F	6	0,63	0,37	0,85	0,48
Santa Maria	RZ	STA3	3,03	3200	11,28	1,2	B	6,56	0,56	0,45	0,86	0,47
Santa Maria	RZ	STA 30	2,33	1000	15,15	1,3	F	9,92	0,59	0,45	0,85	0,51
Santa Maria	RZ	STA 31	2,42	1800	15,6	2,2	B	10,98	0,61	0,41	0,87	0,5
Santa Maria	RZ	STA 20	2,03	1800	12,31	1,4	B	11,68	0,61	0,33	0,84	0,45

**Figura 2:** Dominância de indivíduos de *R. mangle* (Rz), *L. racemosa* (Lg) e *Avicennia schaueriana* (Av) das quatro áreas de estudo.



**Figura 3:** Valores médios de altura (m) e diâmetro médio (cm) para as parcelas das quatro áreas de estudo



O manguezal situado na área de Porto Novo sofre grande pressão antrópica (ZAMPROGNO, 2015). Foi possível visualizar em campo esgoto *in natura* e aterros nas áreas de manguezal. Porto Novo apresentou maior diversidade de estrutura de bosque com parcelas com dominância de *R. mangle* e outras de *L. racemosa*. Isto explica maior variabilidade observada para os dados de NDVI extraídos dos ortomosaicos. Esta floresta como um todo está passando por modificações na sua estrutura que se tornam mais claras quando se analisa os dados da parcela 3, com poucos indivíduos de maior porte (DAP acima de 15 cm) e ingresso massivo de juvenis. Essas características refletem nos dados de IAF *in situ* com valores abaixo da média para *R. mangle*, e menores valores de IVs.

Na área de Porto Santana, constatou-se que a parcela L4 com dominância de *R. mangle* possui os valores mais altos de densidade, porém apresenta o menor diâmetro médio, visto que neste local foi observado uma clareira com colonização de indivíduos jovens. No restante, foi possível constatar que as parcelas com os maiores valores de densidade tiveram dominância de *L. racemosa*. A parcela L3, dominada por *R. mangle*, possui os maiores valores de altura e DAP. Este bosque está localizado na franja do mangue, e possui manutenção de grandes árvores vivas. Quando comparado os IVs, os dados ficam próximos aos de Areia Branca, entretanto, não difere significativamente das demais áreas. Isto ocorre porque esta floresta apresenta uma alta variabilidade estrutural que é exclusiva dos bosques dominados por *R. mangle*. A floresta dominada por *L. racemosa* tem padrões de estrutura similares a média da região como um todo, refletindo nos dados de IVs que são bastante similares aos das florestas de *R. mangle*.

Avaliando a estrutura da floresta em termos de distribuição de indivíduos por classes de diâmetro, os bosques de Areia Branca possuem estágios intermediários com características semelhantes aos bosques da área de Porto Santana.

Com relação ao IAF, o valor médio das parcelas analisadas foi de 2,08, sendo que para *R. mangle* o valor médio foi de 2,25, enquanto que para *L. racemosa* o valor médio foi de 1,74. Vale ressaltar que embora as medições tenham sido realizadas no mês de outubro, que é um mês tipicamente chuvoso na região Sudeste, em outubro de 2016 foi um mês atípico com valores de precipitação de 125 mm e evapotranspiração de 17 mm (INCAPER, 2018).

Ao serem comparados com Florestas Tropicais, que possuem sub-bosque, os manguezais apresentam valores de IAF medidos em campo baixos (JENSEN e RAMSEY 1996). Estudos realizados em Porto Rico e no Sudeste da Flórida apresentaram IAF de 4,4 e 3,5 para *R. mangle*. Outros autores, como Kovacs et al. (2005) ao medirem o IAF do manguezal no México, encontraram valores de 2,49 para *R. mangle* e de 1,74 para *L. racemosa* em florestas maduras, e em algumas parcelas registraram valores de 0,85 para *L. racemosa*. Flores-de-Santiago et al. (2012) realizaram medidas de IAF em um período chuvoso e seco em uma floresta de mangue no Pacífico Mexicano. Os valores de IAF para a espécie *R. mangle* caracterizada como mangue pobre variaram entre uma estação e outra de 2.1 a 2.4. Já a espécie *R. mangle* saudável variou de 5.7 a 5.1. Para a espécie *L. racemosa* caracterizada como pobre teve variação de 1.4 a 1.2, e *L. racemosa* saudável variou de 2.5 a 3.6. A espécie *A. germinans* caracterizada como mangue anão não teve variação entre um período e outro, e o valor do IAF foi 1.5. Em parcelas com essa mesma espécie e caracterizada como saudável os valores foram de 3.6 e 2.9. Lima (2009) ao estudar uma área do manguezal de Barra do Ribeira (Brasil) com dominância de *R. mangle*, observou valores de IAF diferentes para a estação chuvosa e seca, sendo 1,18 e 0,96, respectivamente. A autora propôs que na estação chuvosa ocorre um aumento da produção foliar por redução da salinidade intersticial, favorecendo a formação de novas folhas.

O exame da correlação levou à identificação apenas de IAF como variável dependente candidata a regressão; uma vez que as demais (Altura, Densidade e DAP) não possuem correlações estatisticamente significativas com as variáveis independentes (NDVI e SAVI).

O maior valor obtido foi para a regressão da variável IAF x SAVI ( $r^2 = 43\%$ ) com coeficiente significativo, uma vez que pela análise da significância estatística do teste t de *Student* pode-se rejeitar a hipótese nula de não significância ( $p\text{-value} < 0,05$ ).

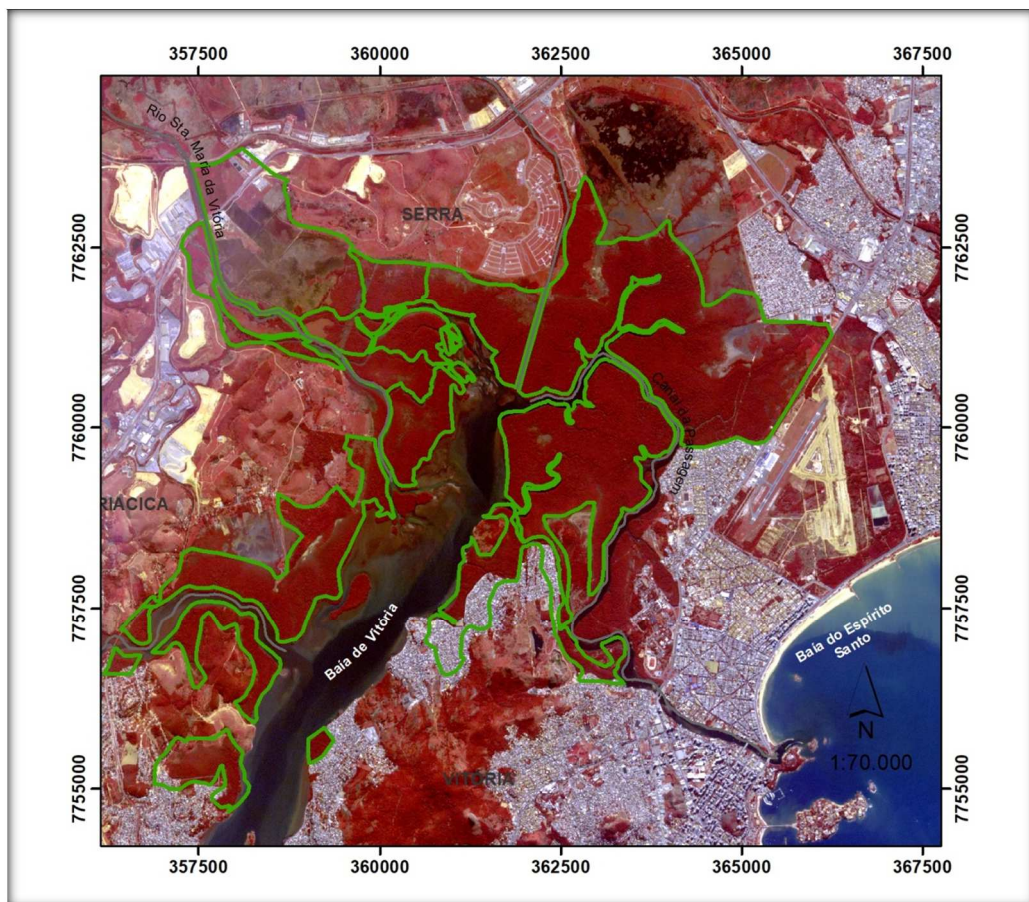
Na tabela 2 observa-se que na análise de regressão da variável dependente IAF *in situ* com as variáveis independentes (NDVI e SAVI) resultaram em relações positivas significativas, porém o índice SAVI foi o que apresentou melhor resultado. Quando realizada a análise somente dos dados das parcelas que apresentavam 100% de dominância das espécies (*R. mangle* e *L. racemosa*), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para IAF x SAVI aumentou para 0,53. Na análise dos dados utilizando somente as parcelas de *R. mangle*, os valores de  $r^2$  para o SAVI foi de 0,58.

**Tabela 2:** Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) da regressão da variável dependente IAF e das variáveis independentes NDVI e SAVI de imagens RPA e de imagem *RapidEye*.

Variável Dependente	Estatística	Variável Independente		Espécie Dominante	Imagem
		NDVI ( $r^2$ )	SAVI ( $r^2$ )		
IAF	$r^2$	0.23	0.43	Parcelas com dominância > 90% <i>L. racemosa</i> e <i>R. mangle</i>	RPA
	$p$ -value ( $\alpha$ )	0.01	0.00		
IAF	$r^2$	0.07	0.53	Parcelas com 100% de dominância <i>L. racemosa</i> e <i>R. mangle</i>	
	$p$ -value ( $\alpha$ )	0.22	0.00		
IAF	$r^2$	0.36	0.58	Parcelas com 100% de dominância de <i>R. mangle</i>	
	$p$ -value ( $\alpha$ )	0.06	0.01		
IAF	$r^2$	0.7	0.7	Parcelas com 100% de dominância de <i>R. mangle</i>	<i>Rapideye</i>
	$p$ -value ( $\alpha$ )	0.002	0.003		

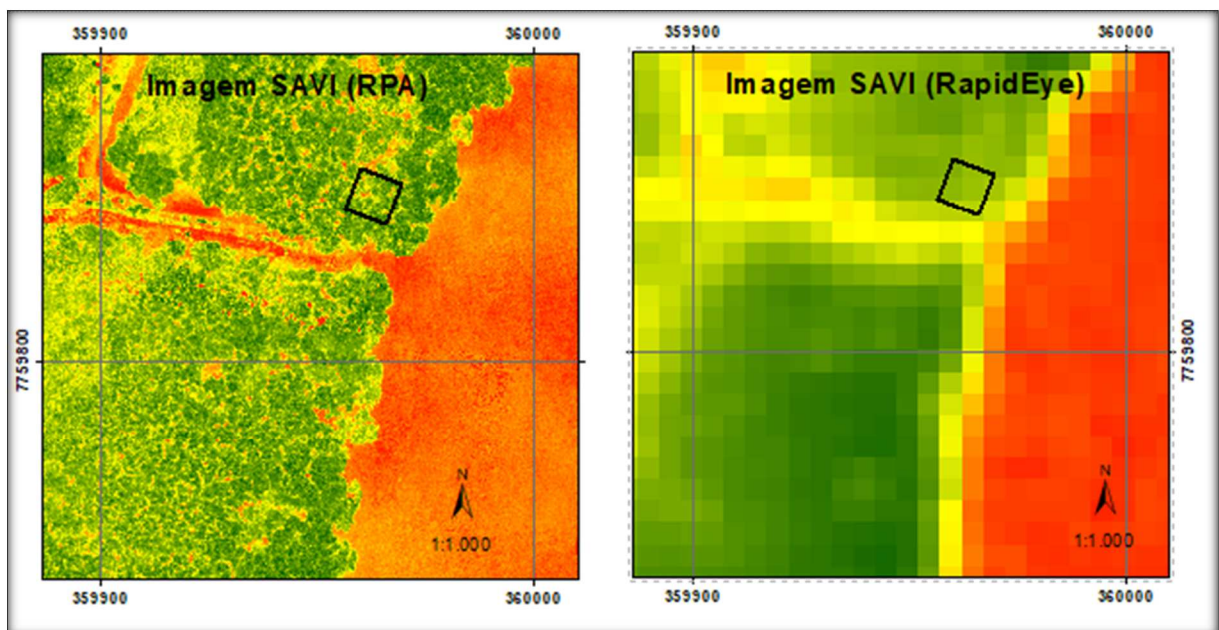
A Figura 4 apresenta a imagem de reflectância (*RapidEye*) com composição RGB 532. As bandas 5 (NIR) e 3 (RED) foram utilizadas para a elaboração dos mapas NDVI e SAVI.

**Figura 4:** Imagem de reflectância (*RapidEye*) com composição RGB 532

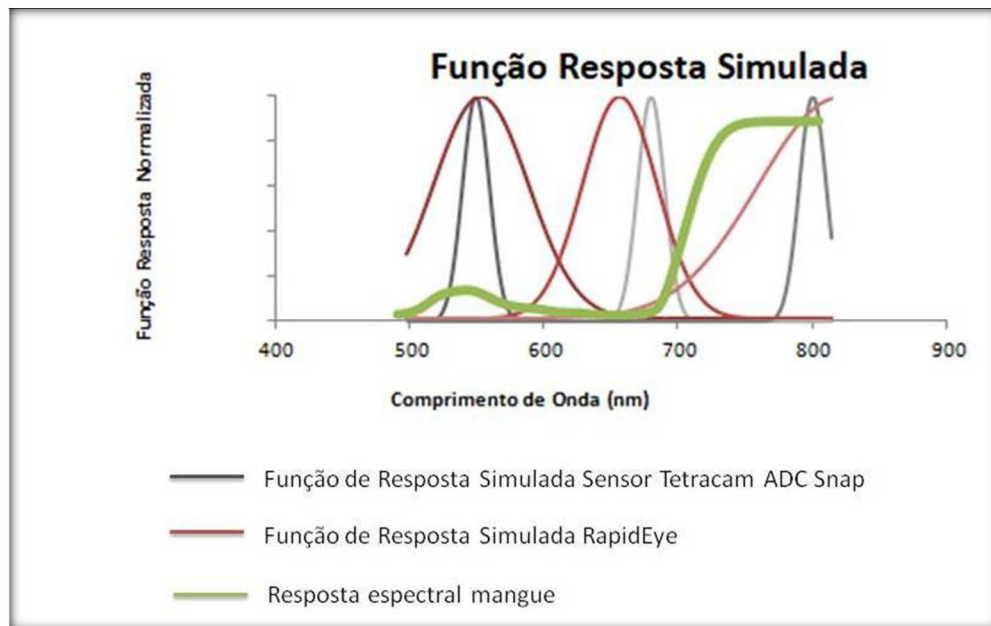


A Figura 4 apresenta a diferença entre os dois sensores com relação a resolução espacial, o sensor da Tetracam ADC *Snap* possui o tamanho do pixel de 5mm, enquanto o sensor *RapidEye* possui o tamanho do pixel de 5m. Quanto a resolução espectral também existe diferenças, o sensor da câmera Tetracam ADC *Snap* possui as bandas RED e NIR centrados em 680 e 800 nm respectivamente. A resolução espectral da largura à metade do máximo (FWHM) é de 10 nm. O satélite *RapidEye* possui as bandas RED e NIR centradas em 660 nm (FWHM = 60 nm) e 820 nm (FWHM = 120 nm) respectivamente. Na Figura 5 é apresentado a Função de Resposta espectral dos dois sensores e o comportamento espectral do mangue. O sensor *RapidEye* possui menor resolução espectral, porém a a banda NIR dos dois sensores não apresenta diferenças com relação a resposta espectral do mangue. A banda RED do sensor Tetracam possui a banda estreita centrada em 680 nm, o que teoricamente registraria melhor as diferenças espectrais do objeto alvo. O satélite *RapidEye* possui a banda RedEdge (690 nm a 730 nm) muito útil para o monitoramento da vegetação, porém ela não foi utilizada nessa pesquisa porque o objetivo era usar as mesmas bandas do sensor Tetracam.

**Figura 5:** Imagens de índice de vegetação SAVI; a imagem à esquerda é referente ao sensor Tetracam ADC *Snap*, e a imagem à direita referente ao satélite *RapidEye*.



**Figura 6:** Função de Resposta Espectral dos sensores Tetracam ADC *Snap* e *RapidEye* conjuntamente com a resposta espectral do mangue (objeto de estudo).



Os mesmos dados coletados de estrutura em campo foram correlacionados com os IVs (NDVI e SAVI) obtidos a partir de uma imagem *RapidEye*. Na análise de correlação, os dados apresentaram significância, e os maiores valores do coeficiente de determinação foram para as variáveis IAF versus NDVI e IAF versus SAVI ( $r^2 = 0,7$ ). Esses resultados foram melhores se comparados à análise de correlação utilizando os dados de reflectância obtidos da imagem RPA. Porém mesmo sabendo que imagens de satélite possuem elevado grau de qualidade geométrica e radiométrica, os resultados da análise de correlação não apresentaram um coeficiente de correlação e determinação elevado.

Gao (1998) afirma que em parcelas de mangue com densidade mais baixa e copa mais esparsa, a influência da superfície do solo é maior. Meza Diaz e Blackburn (2003) descreveram que as variações espectrais relacionadas à reflectância da copa do mangue se devem a variáveis como IAF, características do substrato e inclinação da folha.

A análise de regressão positiva indica que quanto maior os valores de SAVI maior o IAF. Quanto maior o IAF melhor é a distribuição da altura do dossel na floresta, e uma sobreposição maior de folhas ocasionando menor influência do substrato nos dados espectrais. Os dados de densidade são menores nas parcelas de *R. mangle*, porém estas parcelas possuem maior desenvolvimento estrutural, e maior IAF se comparado a espécie *L. racemosa*. A maior cobertura do solo pela serrapilheira, e maior número de indivíduos jovens menores de 50cm não contabilizados na estatística podem ter contribuído para minimizar o efeito do fundo do solo, e conseqüentemente melhor ajuste do IAF com o índice SAVI nas parcelas homogêneas de *R. mangle*. Foi observado que a diferenças na estrutura do mangue, como o IAF entre as espécies de *R. mangle* e *L. racemosa*, e entre as estações estudadas influenciaram nos resultados da análise de correlação.

### 3.4. CONCLUSÃO

A alta resolução espacial das ortofotos obtidas por uma RPA permitem diversas análises do manguezal por meio de fotointerpretação, como análise da distribuição da vegetação, diferenças entre as estruturas das espécies *R. mangle* e *L. racemosa*, identificação de espécies dominantes, padrão de sucessão, mapeamento de clareiras entre outras. Com relação ao uso das imagens de reflectância e seus derivados ainda é necessário estudos mais detalhados sobre as influências das variáveis como IAF, características do substrato e inclinação da folha. Além das variáveis ambientais, como salinidade, e padrão de inundação da maré.

O sensor embarcado na RPA precisa ser avaliado com relação a sensibilidade das bandas espectrais e sua Função de Resposta Espectral. Com relação a calibração radiométrica das fotos aéreas, a função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF) precisa ser considerada em trabalhos futuros, devido as variações do ângulo zenital de visada do sensor ( $\theta_v$ ). O grande problema em criar o BRDF é que ele deve ser feito no campo, e isto se torna bastante complicado visto que o objeto de estudo é o manguezal.

O mapa de NDVI não apresentou um resultado satisfatório, pois as clareiras do manguezal apresentaram índices altos por conta do solo úmido. O mapa de SAVI apresentou um resultado melhor para diferenciação das espécies e identificação de clareiras. Os valores do índice SAVI para *L. racemosa* foram mais baixos do que para *R. mangle*, possibilitando a discriminação das espécies e identificação do padrão de sucessão.

Na análise estatística a correlação entre a variável dependente IAF (*in situ*) e a variável independente SAVI teve o coeficiente de determinação aumentado de 0,43 para 0,53 quando utilizado os dados de campo das parcelas com 100% de dominância de *R. mangle* ou *L. racemosa*. Quando correlacionado somente os dados de campo de *R. mangle* das variáveis IAF versus SAVI, o coeficiente de determinação aumentou para 0,58.

As parcelas de *L. racemosa* apresentaram maior densidade e menores valores de IAF, além de maior variabilidade nos dados de estrutura. Os menores valores de IAF contribuíram para aumentar a influência do substrato na resposta espectral do sensor. O maior desenvolvimento estrutural dos bosques de *R. mangle*, maior IAF e florestas mais homogêneas contribuíram para o melhor ajuste dos dados.

Os IVs extraídos das imagens RPA, e os dados de IAF coletados em campo apresentaram um baixo valor do coeficiente de determinação, em parte pela alta variabilidade estrutural das estações estudadas, principalmente com relação a espécie *L. racemosa*. As florestas de manguezal da Baía de Vitória estão sujeitas à diferentes tensores ambientais induzidos pelo homem, como aterros, esgoto *in natura*, e isto também pode interferir na homogeneidade dos dados estruturais, e conseqüentemente nos dados espectrais.

As diferentes composições do solo do manguezal, a taxa de cobertura do solo por serrapilheira, o padrão de inundação da maré, a salinidade intersticial, e até mesmo poluição atmosférica como particulados de minério de ferro depositados sob a folha precisam ser consideradas em trabalhos futuros, pois podem interferir na reflectância do dossel.

Em relação a imagem *Rapideye*, a correlação das variáveis IAF (*in situ*) x NDVI (imagem *RapidEye*) e IAF (*in situ*) x SAVI (imagem *RapidEye*) apresentaram o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,7. Isto mostra que mesmo utilizando imagens de satélite com elevado grau de qualidade geométrica e radiométrica, a análise de correlação não apresentou um coeficiente de determinação elevado. O uso de índices de vegetação para monitoramento de manguezais antropizados e com bosques heterogêneos em relação à estrutura ainda é desafiador.

Se por um lado, as imagens orbitais possuem um elevado grau de qualidade geométrica e espectral, as imagens obtidas por RPA possuem altíssima resolução espacial, além do que o tempo de revisita ao objeto estudado pode ser definido de acordo com o interesse do pesquisador (por exemplo na maré baixa). Sendo assim, imagens obtidas por uma RPA são ótimas ferramentas de gestão costeira e monitoramento do ecossistema manguezal, porém é necessário um cuidado maior com relação à obtenção de imagens espectrais. Esse tipo de imagem requer um sensor apropriado e um processo de calibração radiométrica baseada em um modelo de Fator de Reflectância Bidirecional.

### 3.5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL. **Surface Energy Balance Algorithm for Land – Advanced Training and Users Manual**. Idaho Implementation, version 1.0, 2002a.

BARET, F.; GUYOT, G. **Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment**, *Remote Sensing Environment*. 35:161-173.1991.

BARET, F., GUYOT, G.; MAJOR, D. **TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation**. In: 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSSX30, Vancouver, Canada, 10-14. 1989.

EXELIS, 2014. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH). Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>>. Acesso em: 7 novembro 2014

HUETE, A. R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI)**. *Remote Sens. Environ.* 25:295-309. 1988.

HUETE, A. R. **Soil influences in remotely sensed vegetation canopy spectra, in Theory and Applications of Optical Remote Sensing** (G. Asrar, Ed.), pp 107-141. 1989.

HUETE, A. R., JACKSON, R. D., AND POST, D. F. **Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds**. *Remote Sens. Environ.* 17:37-53. 1985.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphânio et al. São José dos Campos. SP. 2009.



KROSS, A.; MCNAIRN, H.; LAPEN, D.; SUNOHARA, M.; CHAMPAGNE, K. **Assessment of *RapidEye* vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 235–248. 2015.

LUGO, A.E. and SNEDAKER, S.C., **The ecology of mangroves.** *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, pp. 39–64. 1974.

PLANET TEAM. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. <https://api.planet.com>. 2017.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação.** In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (org) Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

NICODEMUS, F.E.; RICHMOMD, J.C.; HSIA, J.J.; GINSBERG, I.W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance.** Washington: US Department of Commerce.. 52 p. 1977.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H; SOROOSHIAN, S. **A Modified Soil Adjusted Vegetation Index.** Remote Sens. Environ. 48: 119126 1994.

RAMSEY, E., JENSEN, J.R.. **Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data.** Photogramm. Eng. Remote Sens. 62, 939–948. 1996.

RONDEAUX, G., STEVEN, M., & BARET, F. **Optimization of soil adjusted vegetation indices.** Remote Sensing of Environment, 55, 95–107. 1996.

T. KOUKAL.; W. SCHNEIDER. **Analysis of BRDF characteristics of forest stands with a digital aerial frame camera.** In: Proc. ISPRS Symp. Tech. Comm. VII, Vienna, Austria, Jul. 5–7, vol. XXXVIII, pp. 100–105, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2010.

ZHANG, C.; LIU, Y.; KOVACS, J. M.; FLORES-VERDUGO, F.; FLORES DE SANTIAGO, F.; CHEN KE. **Spectral response to varying levels of leaf pigments collected from a degraded mangrove forest.** Journal of Applied Remote Sensing. Vol, 6. 2012.

#### 4. CAPITULO 4 - ANÁLISE HIPERESPECTRAL DE TRÊS ESPÉCIES DE MANGUE LOCALIZADAS NA BAÍA DE VITÓRIA E IDENTIFICAÇÃO DE BANDAS ESPECTRAIS PARA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES NOS PIGMENTOS DE CLOROFILA A, B E TOTAL

##### RESUMO

Foi analisado o comportamento espectral de três espécies de mangue; *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana* por meio de um espectrorradiômetro, e realizadas medidas em campo dos índices de clorofila com um medidor eletrônico ClorofiLOG CFL-1030 (Falker).

As três espécies analisadas apresentaram comportamento espectral típico de vegetação com maior reflectância em NIR e SWIR e menor reflectância na região do visível (R, G, B). A menor reflectância na região do visível se dá pela alta absorção da irradiância por conta dos pigmentos foliares. A alta reflectância no NIR está associada à estrutura interna da folha, enquanto que alteração na reflectância na região SWIR podem estar relacionadas ao conteúdo de água na folha.

Os índices de clorofila das diferentes espécies foram correlacionados com bandas espectrais estreitas (350 nm a 2500 nm) e índices de vegetação. A máxima reflectância da borda do vermelho (*red edge*) foi identificada e correlacionada com os índices de clorofila. Na análise estatística de correlação o valor de reflectância obtido por meio do índice de vegetação das bandas estreitas 736 nm e 821 nm, e o índice de clorofila b (espécie *L. racemosa*) apresentaram coeficiente de determinação de  $r^2$  0,77.

Para a espécie *R. mangle* não foi possível identificar uma banda estreita ótima ou um índice de vegetação que apresentasse alta correlação com os índices de clorofila a, b ou total. Os resultados apontam para a necessidade de caracterizar mais detalhadamente as condições ambientais, e também as condições biofísicas do bosque para obtenção de modelos de regressão precisos e específicos para cada área em particular.

## ABSTRACT

The spectral behavior of three mangrove species was analyzed; *R. mangle*, *L. racemosa* and *A. schaueriana* by means of a spectroradiometer, and field measurements of the chlorophyll index were carried out with an electronic meter ClorofiLOG CFL-1030 (Falker).

The three species analyzed showed spectral behavior typical of vegetation with higher reflectance in NIR and SWIR and lower reflectance in the visible region (R, G, B). The lower reflectance in the visible region is due to the high absorption of irradiance due to the foliar pigments. The high reflectance in the NIR is associated with the internal structure of the leaf, whereas the change in the reflectance in the SWIR region can be related to the water content in the leaf.

The chlorophyll indices of the different species were correlated with narrow spectral bands (350 nm at 2500 nm) and vegetation index. The maximum red edge reflectance was identified and correlated with the chlorophyll index. In the correlation statistical analysis, the reflectance value obtained by means of the vegetation index of the narrow bands 736 nm and 821 nm, and the chlorophyll b index (*L. racemosa* species) presented a coefficient of determination of  $r^2$  0.77.

For the *R. mangle* species it was not possible to identify an optimal narrow band or vegetation index that showed high correlation with the chlorophyll a, b or total indexes. The results point to the need to characterize in more detail the environmental conditions, as well as the biophysical conditions of the forest to obtain accurate and specific regression models for each particular area

#### 4.1. Introdução

O sensoriamento remoto é a ferramenta capaz de fornecer informações espaço-temporais sobre a distribuição do ecossistema manguezal, diferenciação de espécies, estado de saúde e mudanças contínuas das populações de manguezais. Tais estudos podem ser baseados em vários sensores, desde fotografia aérea a imagens ópticas de alta e média resolução e de dados hiperespectrais até dados de microondas ativos (SAR), que permitem entender as mudanças fisiológicas da planta em florestas de mangue impactado (KUENZER ET AL. 2011).

As aeronaves remotamente pilotadas (RPA) estão se tornando uma possibilidade de obtenção de vários tipos de dados de sensoriamento remoto de baixo custo, incluindo cor verdadeira, multiespectral, dados hiperespectrais, LIDAR, microondas e térmicos, em altíssimas resoluções espaciais e em períodos de aquisição flexíveis (TIAN ET AL. 2011).

Segundo Zhang et al. (2018), sensores óticos de banda espectral e RADAR, como Radar de Abertura Sintética Avançada Landsat, QuickBird, IKONOS, Radarsat e ENVISAT, foram aplicados com sucesso no estudo de manguezais. Estes estudos mostram que os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para mapear manguezais degradados com base em medições qualitativas, bem como estimar mudanças na densidade da folha (por exemplo, Índice da Área da Folha). No entanto, foram encontrados poucos estudos que examinassem as relações entre o conteúdo de pigmentos foliares dos manguezais e a variação nas respostas espectrais dentro de espécies individuais de manguezais.

Segundo Sinha (1986), o conhecimento e a compreensão prévia sobre as características de absorção e refletância do objeto de estudo e os parâmetros que os influenciam, permitem interpretar os dados de sensoriamento remoto de maneira mais significativa e precisa. O estudo de assinaturas espectrais fornece a opção de selecionar as bandas espectrais ou larguras de banda, e selecionar o tipo de sensor mais adequado para o estudo específico.

O grande número de bandas estreitas nas imagens hiperespectrais leva a etapas de processamento de imagens que exigem muito tempo, bem como a informações altamente correlacionadas. Consequentemente, procurar as bandas mais úteis para a discriminação de manguezais é necessário. Essas bandas espectrais que são capazes de fornecer a maior distinção espectral entre as espécies de mangue são as mais apropriadas para atividades consecutivas de mapeamento (KUENZER ET AL., 2011).

Segundo Zhang et al. (2018), pigmentos de folhas, principalmente clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) e carotenóides, são compostos significativos responsáveis pela fotossíntese, dissipação de radiação luminosa e outras funções biológicas. Além disso, a variação na quantidade desses pigmentos pode ser indicativa de mudanças no desenvolvimento, na senescência ou de estresse.

O teor de clorofila foliar e a concentração de nitrogênio são importantes bioindicadores de fisiologia vegetal e desempenham papéis-chave no processo de fotossíntese (Lichtenthaler 1998).

Flores-de-Santiago et al. (2013), utilizaram um medidor de clorofila portátil (CCM-200) em um manguezal degradado no México, e identificaram que existe uma relação linear moderada a forte entre pigmentos foliares, especialmente Clorofila a e total, e os índices de clorofila medidas pelo CCM-200. A variabilidade do coeficiente de determinação foi atribuída aos períodos secos e chuvosos, e as diferentes condições ambientais em que as espécies se encontravam.

Skidmore e Cho (2005), a região da borda vermelha (680 a 780 nm) é afetado por parâmetros bioquímicos e biofísicos e tem sido usado como um meio para estimar o teor foliar de clorofila ou nitrogênio.

Kuenzer et al. (2011), analisaram dados espectrais de duas espécies de mangue no Vietnã, e mostraram que elas diferem devido às suas principais propriedades biofísicas e químicas, como conteúdo de água, celulose e lignina e de proteínas, bem como dos principais pigmentos foliares, isto é, clorofila a e b e carotenóides. O sinal de resposta espectral também depende da estrutura interna da folha, composta principalmente de parênquima paliçádico e ou esponjoso que vão compor o mesófilo foliar, assim como, o número de camadas celulares, de espaços intercelulares e interfaces ar-água e o tamanho das células.

Garbulsky et al. (2011) concluíram que os ecossistemas possuem propriedades bioquímicas e biofísicas que nos permitem explorar seu comportamento fotossintético aparentemente complexo usando métodos ópticos relativamente simples. Entretanto, entender a ecofisiologia que rege essas respostas continua sendo o principal objetivo das pesquisas nessa área.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento hiperespectral de três espécies de mangue identificadas na Baía de Vitória por meio de espectrorradiometria. Também foi investigada a correlação entre os índices de clorofila (a, b e total) medidos por um equipamento portátil CCM -200 e bandas espectrais. Foram identificados bandas estreitas e índices de vegetação com maior valor preditivo para estimar de forma indireta os índices de clorofila a, b e total.

## **4.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.2.1. Coleta em campo e Processamento dos dados**

As medidas de clorofila *in situ* bem como a coleta das folhas para a análise da reflectância em laboratório foram realizadas nas 32 parcelas (10 x 10 metros) estabelecidas em campo, e distribuídas nas quatro áreas de estudo; Santa Maria, Areia Branca, Porto Santana e Porto Novo. O campo foi realizado em maio de 2016. O mês de maio foi um mês atípico, pois a precipitação média mensal (12,3 mm) ficou muito abaixo da média histórica (INMET, 2018).

As coletas dos valores de Clorofila a (Chl *a*), Clorofila b (Chl *b*) e Clorofila Total (TChl = Chl *a* + Chl *b*) foram realizadas utilizando o medidor eletrônico ClorofiLOG CFL-1030 (Falker) que emprega fotodiodos emissores de três faixas de frequência de luz para obter o índice de pigmentos. Este equipamento emite luz dentro do espectro de absorção da clorofila ( $\lambda = 635$  e  $660$  nm) e do infravermelho ( $\lambda = 880$  nm). Este último comprimento de onda serve como referência interna para avaliar a espessura da folha e o teor de água. Os dados produzidos vão gerar um índice que é igual a absorbância da clorofila (Barbieri Junior et al. 2012). As leituras são realizadas com emissão de luz e resposta do sensor em torno de 2s, sendo a área ativa de recepção da folha de  $9 \text{ mm}^2$  e de foliar de  $50,3 \text{ mm}^2$ .

Para cada árvore foram medidas seis folhas (amostra) do segundo par foliar de cada ramo, consideradas como completamente expandida e em cada folha foram feitas seis medições (réplicas). Não foi realizada medição de clorofila para a espécie *A. schaueriana*, pois esta espécie de mangue ocorre de forma pontual e isolada inviabilizando a coleta de um número amostral representativo. Na estação de Santa Maria não foi realizada a medição de clorofila para a espécie *L. racemosa* por também não haver representatividade. Posteriormente, os dados foram digitados em uma planilha Microsoft Excel<sup>®</sup> e calculado a média dos valores do índice de clorofila *a*, *b* e total para cada árvore.

Para a análise hiperespectral foram coletadas 6 folhas de cada indivíduo entre 30 e 40 cm do ápice do ramo exposto ao sol, com características similares, utilizando os critérios para escolha das folhas: adultas, aspecto saudável e indivíduos de maior porte e volume de copa. Para amostragem das folhas foi empregada tesoura de poda aérea com haste telescópica (Marca Carpa). O horário de coleta ocorreu entre 09:00 h e 11:00 h em todas as áreas para padronização da informação. As folhas foram colocadas em sacos plásticos de cor preta evitando com isto a degradação dos pigmentos fotossintéticos. As amostras foram identificadas por indivíduo de coleta e por parcela. Depois foram acondicionadas em caixa térmica com gelo para diminuição das atividades enzimáticas e perda do teor de água da folha, onde permaneceram até as 14:00 hs quando se iniciou a captura da resposta espectral.

A reflectância foliar foi medida utilizando um espectrorradiômetro ASD FieldSpec<sup>®</sup> 3 JR (Analytical Spectral Devices, Inc., EUA). O intervalo de medição deste equipamento é de 350 a 2500 nm com uma resolução espectral de 1 nm. Uma luz de halogênio de 50 W foi usada como fonte de luz para essas medições internas. Cada amostra de reflectância foi medida com base em duas camadas de folhas de mangue que foram empilhadas voltadas para cima em uma placa preta 30 cm x 30 cm. O sensor *Plant Probe* foi montado acima da placa a uma distância de 30 cm, com ângulo de visada de 25 graus. Para cada folha (amostra) foram obtidas três capturas (réplicas). A cada quinze minutos foi realizado a calibração do instrumento com uso da placa de referência branca (Spectralon). Posteriormente, foi utilizado o aplicativo computacional *ViewSpec* para obter a média das curvas espectrais para cada árvore.

#### 4.2.2. Análise das bandas estreitas

A análise Derivativa pelo método de extrapolação linear considera a posição do ponto de inflexão na região da borda vermelha (680 a 760 nm) da assinatura espectral, denominada de posição da borda vermelha (REP - *Red Edge Position*). Este comprimento de onda é afetado por parâmetros bioquímicos e biofísicos e têm sido usados como um meio para estimar o teor foliar de clorofila ou nitrogênio (CHO E SKIDMORE, 2006).

O método utilizado para definição da borda do vermelho foi o da máxima primeira derivada do espectro de reflectância (DAWSON; CURRAN, 1998). A Equação 1 usada para o cálculo da máxima primeira derivada do espectro de reflectância (FDR) é apresentada a seguir:

$$\text{FDR}_{(\lambda i)} = \frac{(R_{\lambda(j+1)} - R_{\lambda(j)})}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

Onde,

FDR é a primeira derivada do espectro de reflectância para um comprimento de onda  $i$ ,

$j$  e  $j + 1$  é ponto médio entre as bandas,

$R_{\lambda(j)}$  é a reflectância do comprimento de onda  $j$ ,

$R_{\lambda(j+1)}$  é a reflectância no comprimento de onda  $j + 1$ ,

e  $\Delta\lambda$  é a diferença nos comprimentos de onda entre  $j$  e  $j + 1$ .

#### 4.2.3. Análise Estatística

A Análise de Variância (ANOVA) é um teste de hipóteses de médias de duas ou mais amostras e visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Realizou-se ANOVA one way com os dados das variáveis ambientais (clorofila a, b e total) para detectar diferenças entre espécies (*R. mangle* e *L. racemosa*), e entre as quatro áreas de estudo.

Para entender as possíveis relações existentes entre as variáveis clorofila a, b e total (variáveis dependentes) uma a uma com as variáveis bandas estreitas ou índices de vegetação (variáveis independentes), utilizou-se a técnica regressão linear simples.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições ambientais e fitossociológicas do manguezal estão diretamente relacionadas ao conteúdo do pigmento (clorofila a, b e total). Em relação às diferenças entre as espécies coletadas no manguezal da Baía de Vitória, as folhas de *L. racemosa* mostram um conteúdo global de clorofila ligeiramente maior (Tabela 1). A espécie *A. schaueriana* apresentou os menores valores. Essa discrepância explica as diferenças entre as espécies em relação à coloração das folhas.

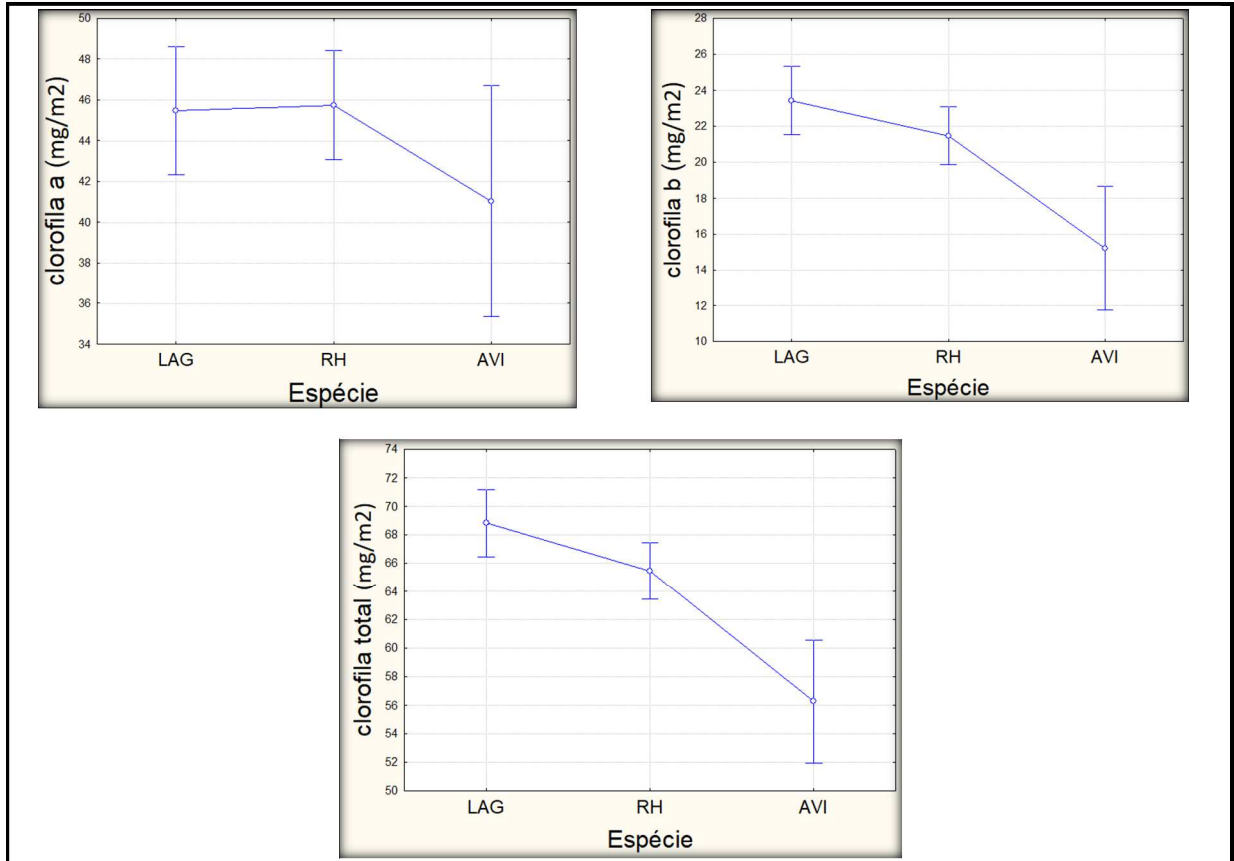
**Tabela 1** – Índices de clorofila (Chla, Clhb e TChl) das espécies *R. mangle* e *L. racemosa*

ESTAÇÃO	ESPÉCIE	Clh a (mg/m <sup>2</sup> )	Clh b (mg/m <sup>2</sup> )	Clh total (mg/m <sup>2</sup> )
Areia Branca	<i>L. racemosa</i>	42,91	21,23	64,02
Areia Branca	<i>R. mangle</i>	44	24,23	68,24
Porto Santana	<i>L. racemosa</i>	45,05	22,22	67,01
Porto Santana	<i>R. mangle</i>	44,47	20,3	64,78
Porto Novo	<i>L. racemosa</i>	47,14	25,5	72,64
Porto Novo	<i>R. mangle</i>	44,82	19,53	64,35
Santa Maria	<i>R. mangle</i>	42,9	22,27	65,17

A análise estatística de variância (ANOVA) *one-way* ( $p < 0,05$ ) foi usada para examinar as diferenças significativas entre os índices de clorofila a, b e total e entre as três espécies de mangue. O resultado da análise estatística indicou diferenças significativas entre o índice de clorofila a, b e total e entre a espécie *A. schaueriana* (Figura 1). Os índices de clorofila b são ligeiramente maiores para a espécie *L. racemosa* quando comparados com *R. mangle* e *A. schaueriana*. Dados não publicados de Pascoalini (2014) para a Baía de Vitória descrevem comportamento similares aos descritos na Tabela 1 e a autora correlaciona o aumento da concentração de clorofila (inclusive total) em *L. racemosa* como resposta ao aumento da salinidade. Em relação a *A. schaueriana*, Pascoalini (2014) encontrou variabilidade na concentração de clorofila (a, b e total) bem como de carotenóides, levando a espécie a ter concentrações similares a *R. mangle* nas áreas mais salinas, e nos locais de menor salinidade, comportamento igual a *L. racemosa*.

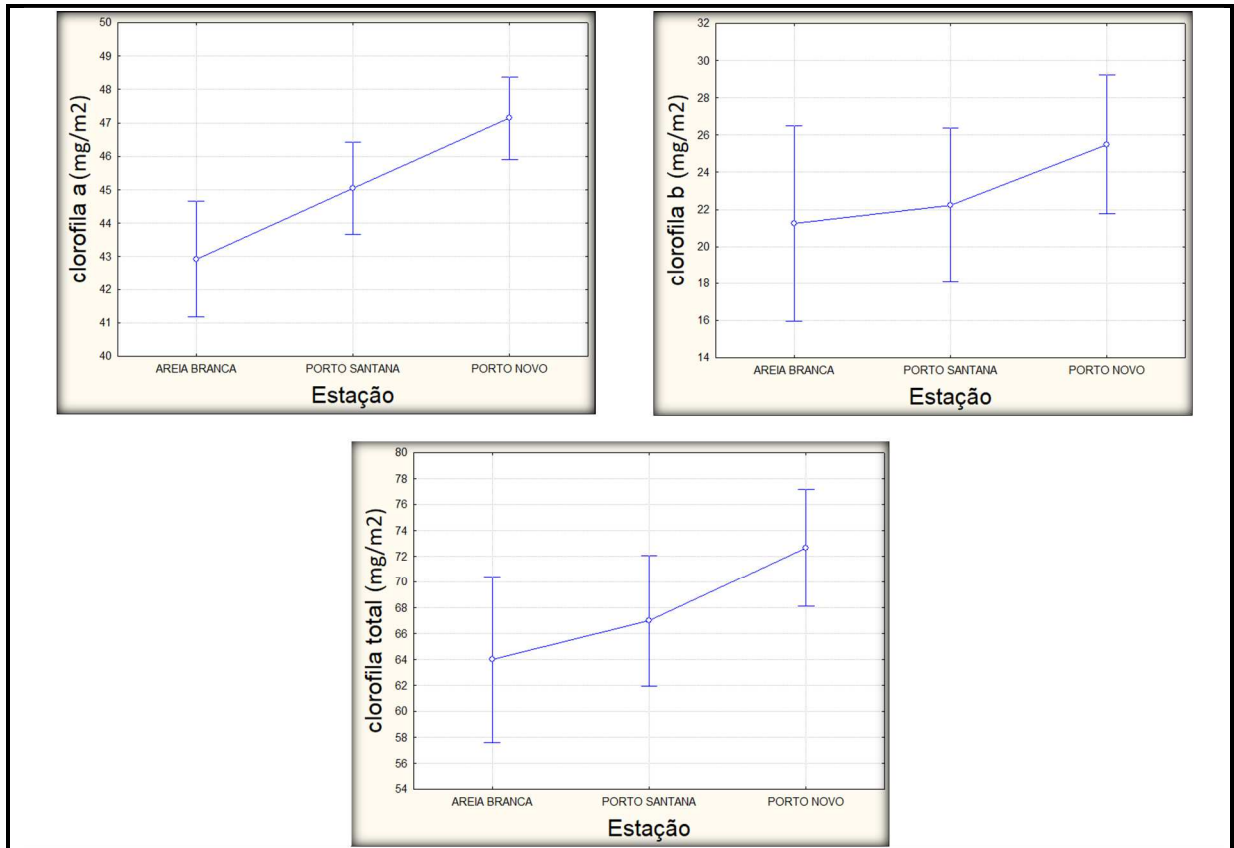


**Figura 1:** Análise de variância (ANOVA) dos índices de clorofila a, b e total entre as espécies *L. racemosa*, *R. mangle* e *A. schaueriana* ( $P < 0,05$ ).

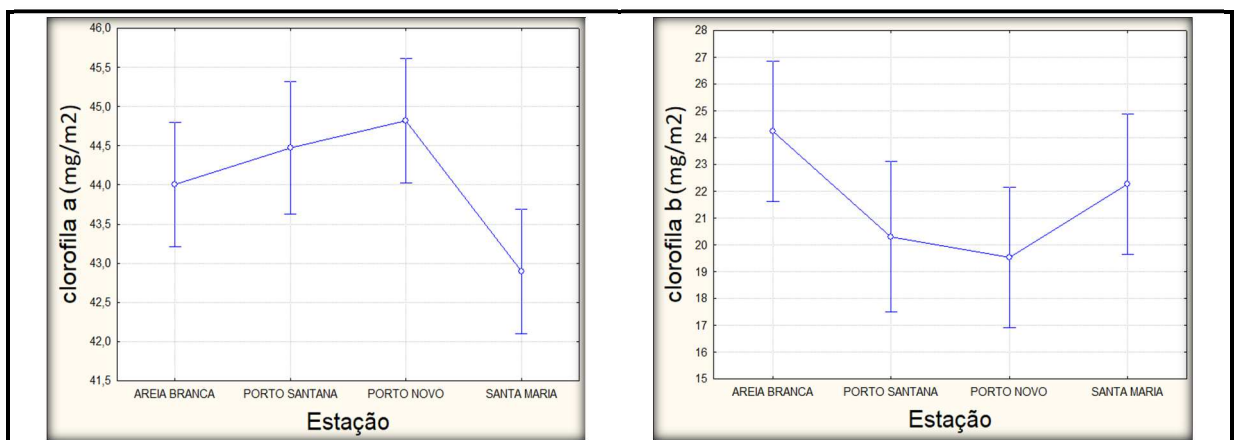


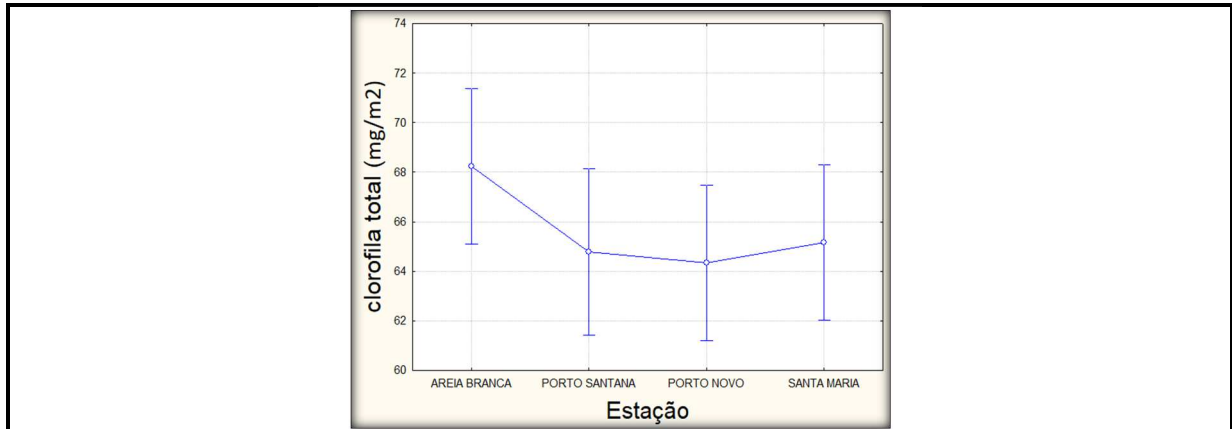
Foi realizado também análise de variância dos índices de clorofila a, b e total entre as estações de estudo por espécie: *L. racemosa* e *R. mangle*. A Figura 2 apresenta os gráficos da espécie *L. racemosa* e a Figura 3 da espécie *R. mangle*. Na estação de Santa Maria (ST) não foi encontrado um número representativo de árvores da espécie *L. racemosa*, por isso nessa área não teve coleta desta espécie, somente de *R. mangle*.

**Figura 2:** Análise de variância (ANOVA) dos índices de clorofila a, b e total entre as estações de estudo para a espécie *L. racemosa*.



**Figura 3:** Análise de variância (ANOVA) dos índices de clorofila a, b e total entre as estações de estudo para a espécie *R. mangle*.





A estação Porto Novo apresentou valores maiores de clorofila a, b e total para a espécie *L. racemosa*. Com relação a espécie *R. mangle*, a estação de Areia Branca apresentou os maiores índices de clorofila b e total, a estação de Porto Novo apresentou os maiores índices de clorofila a, enquanto a estação de Santa Maria apresentou os menores índices de clorofila a. Estudos realizados com *L. racemosa* em experimentos *ex situ* identificam aumento da clorofila total com aumento da salinidade, e este aumento é mais significativo para as concentrações de clorofila b em relação a clorofila a (Sobrado, 2005), aspecto similar observado no estudo para *L. racemosa*. Estudos realizados por Zamprogno et al (2015) na Baía de Vitória, identificam a região do Porto Novo como sendo uma das áreas mais salinas (Estação 7). Por sua vez, os autores identificam a região de Santa Maria como uma das áreas de menor salinidade no sistema.

A clorofila b possui um espectro de absorção maior que a clorofila a ampliando a capacidade das folhas em absorver o espectro luminoso incidente sobre elas, diversos estudos descrevem que aumento no teor de clorofila b é um indicativo de estresse ambiental (Larcher 2000). As análises de estrutura realizada neste estudo caracterizam a região do Porto Novo como aquela mais sujeita aos tensores humanos que associados à salinidade ampliam os tensores que atuam sobre a planta, refletindo nos seus mecanismos de ajuste para aumentar a eficiência na assimilação de energia luminosa.

As folhas de mangue exibem a curva de vegetação típica, com alta refletância no infravermelho próximo (NIR) e baixa refletância na região do visível e no comprimento de onda do infravermelho de onda curta (SWIR). A refletância na região visível é menor do que no NIR devido à absorção de clorofila e à dispersão da parede celular foliar, enquanto que a menor refletância nas regiões SWIR pode refletir mudanças no conteúdo de água das folhas (ZHANG ET AL., 2012).

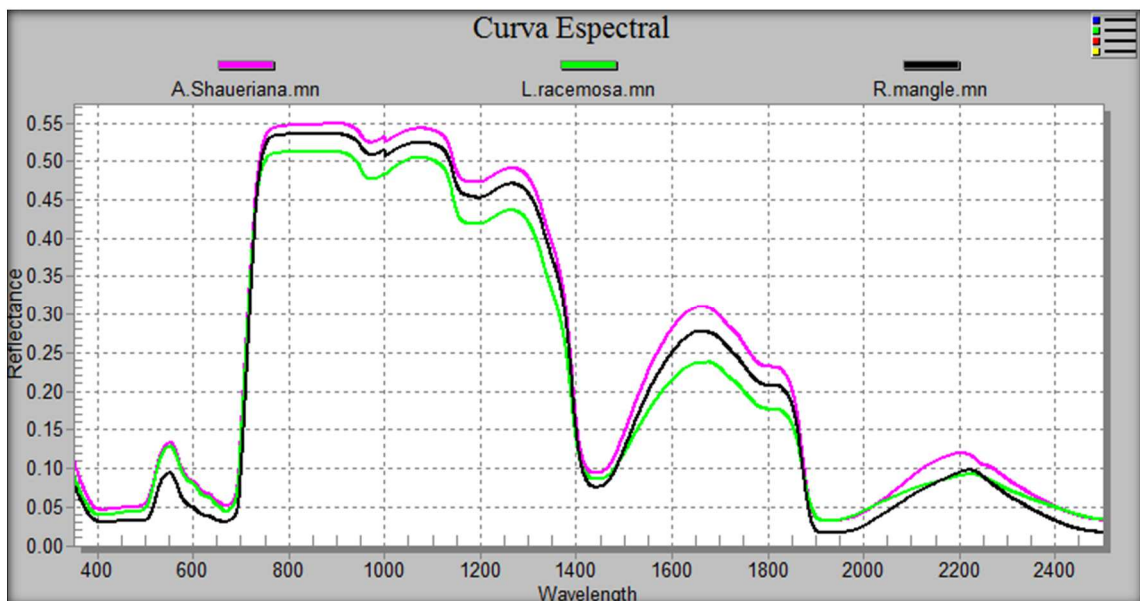
A Figura 4 apresenta a média do comportamento espectral de três espécies de mangue identificadas em quatro estações na Baía de Vitória. A espécie *R. mangle* apresentou maior refletância no comprimento de onda do infravermelho médio e maior absorção na região do vermelho quando comparado a espécie *L. racemosa*. As espécies *R. mangle* e *A. schaueriana* apresentaram um comportamento espectral muito parecido, e isto dificulta a discriminação espectral dessas duas espécies por meio do sensoriamento remoto.

Segundo Kuenzer et al. (2011), o sinal de resposta espectral também depende da estrutura interna da folha, composta principalmente de parênquima paliçádico e mesófilo esponjoso, assim como o número de camadas celulares, espaços intercelulares, interfaces ar-água e tamanho das células.

Zhang et al. (2014) ao analisar a resposta espectral do manguezal de Mazatlán (México) verificou que as folhas de *R. mangle* possuem uma cor verde escura e, conseqüentemente, têm menor refletância na região verde do espectro. As folhas de *L. racemosa* possuem tipicamente uma cor verde brilhante e, por isso maior refletância no espectro verde. Entre as três espécies analisadas, a *R. mangle* apresentou valores consideravelmente mais altos na região de comprimento de onda NIR, e isso se deve a estrutura das folhas que são mais grossas, em relação às outras espécies.

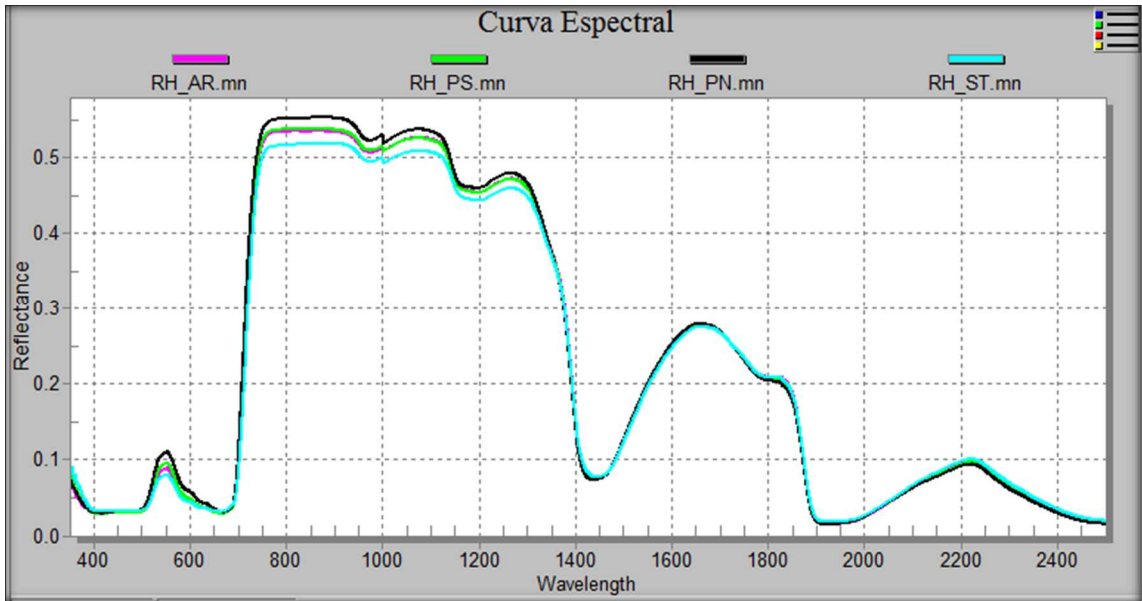
Silva (2012) analisou a resposta espectral das espécies *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana* no manguezal do estuário de Pernambuco (BR), e verificou que a resposta espectral da espécie *R. mangle* apresentou valores de refletância no NIR entre 0,8 a 0,9, *A. schaueriana* apresentou valores médios de 0,78 e 0,85, enquanto *L. racemosa* foi de 0,82. Na região do verde o comportamento das três espécies foi semelhante.

**Figura 4:** Refletância média de três espécies de mangue identificados na Baía de Vitória.

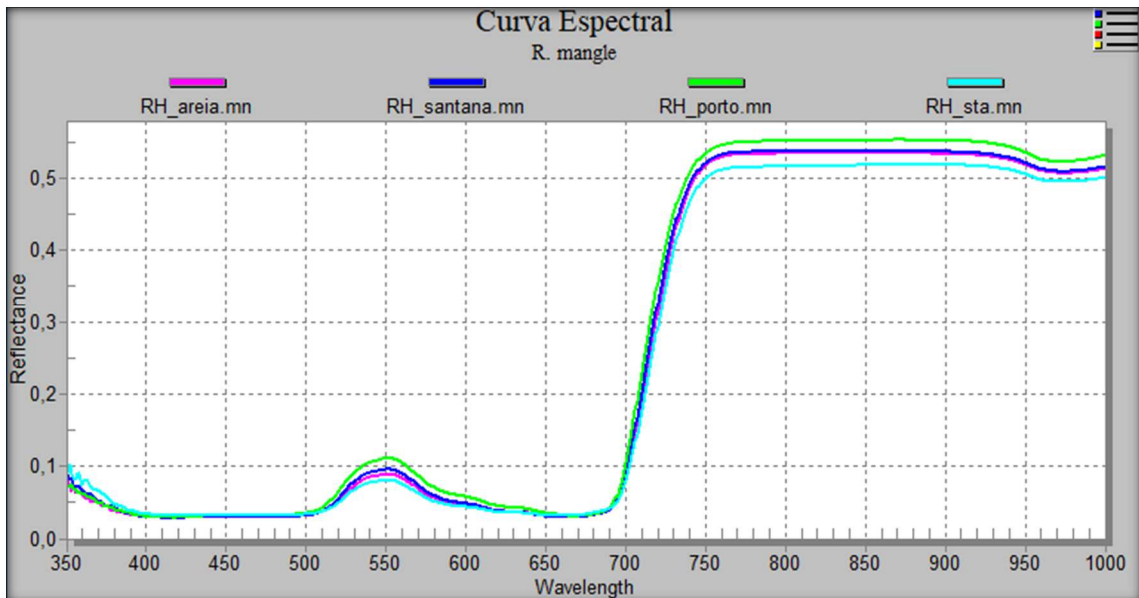


Foram analisadas as curvas espectrais de *R. mangle* para as quatro estações (Figura 5a), e como pode ser observado a absorvância na região do espectro azul e vermelho pelos constituintes químicos e pigmentos fotossintetizantes são praticamente iguais (Figura 5b). Na região do NIR as curvas espectrais apresentam diferenças no valor de refletância, e isto se deve em parte à estrutura foliar interna (LUCENA ET AL., 2011).

**Figura 5a:** Reflectância média de *R. mangle* nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST).

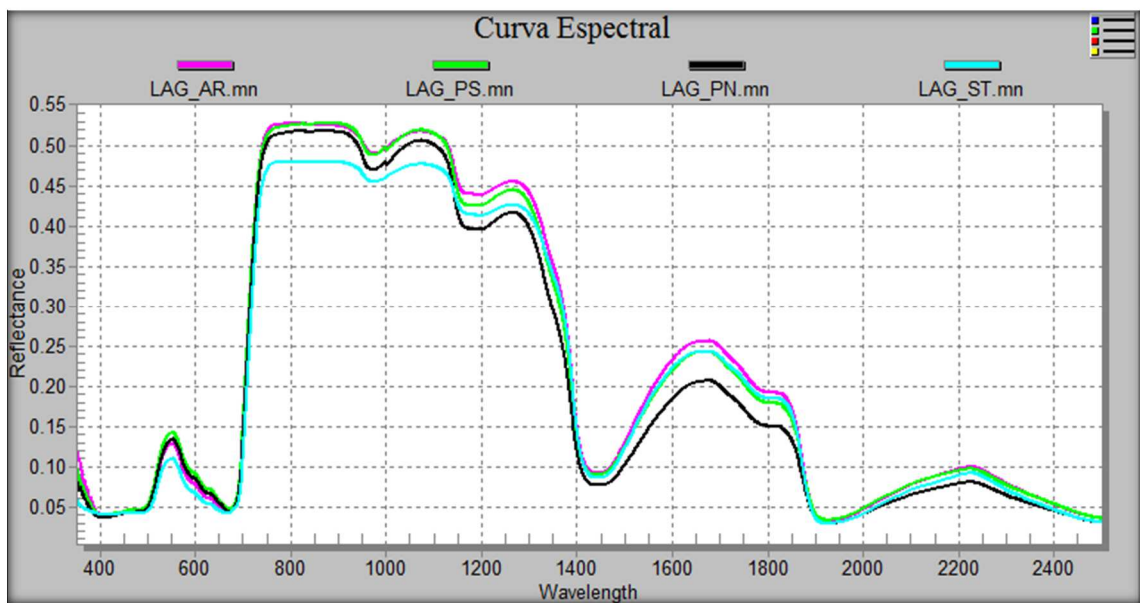


**Figura 5b:** Reflectância média de *R. mangle* nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST). No eixo x do gráfico, os comprimentos de onda foram restringidos em 350 a 1000 nm para facilitar a visualização das respostas espectrais nas regiões do azul e vermelho.

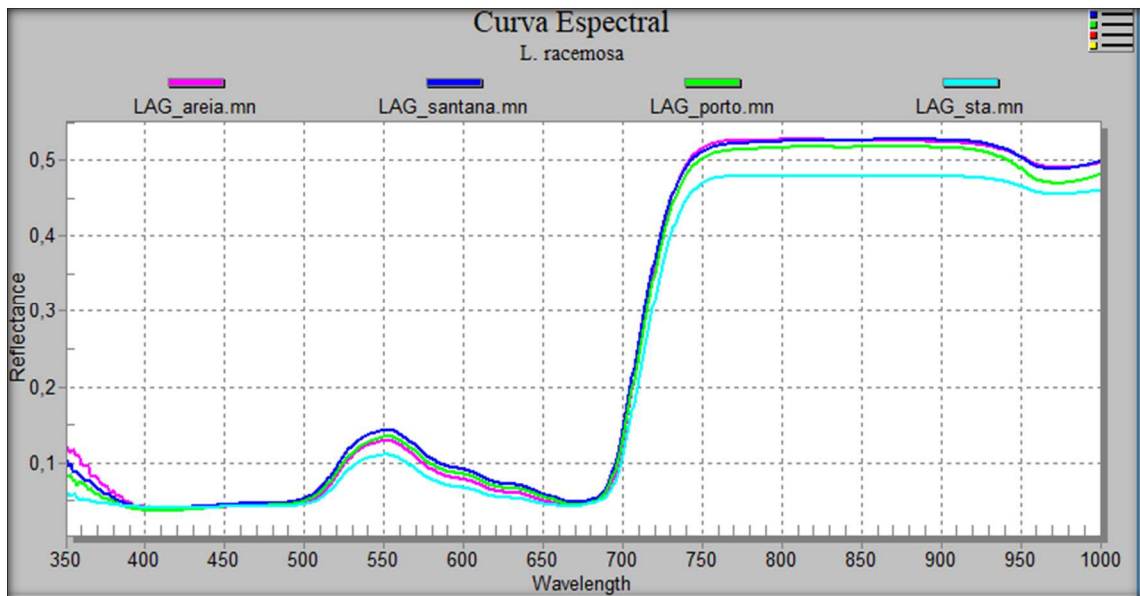


A Figura 6a apresenta o gráfico das curvas espectrais da espécie *L. racemosa* das quatro estações. Na região do visível, o comprimento de onda do azul e vermelho é praticamente igual com leve diferença no comprimento do verde (Figura 6b). Na região do infravermelho próximo as curvas espectrais apresentaram diferenças, com destaque para a estação de Santa Maria (ST). Na região do infravermelho médio também é possível observar diferenças na resposta espectral. Neste caso a reflectância foliar pode sofrer interferências de outros componentes, como sal, açúcar, água, proteína, óleo, lignina, amido e celulose (VAIPHASA ET AL. 2005).

**Figura 6a:** Reflectância média de *A. schaueriana* nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST).

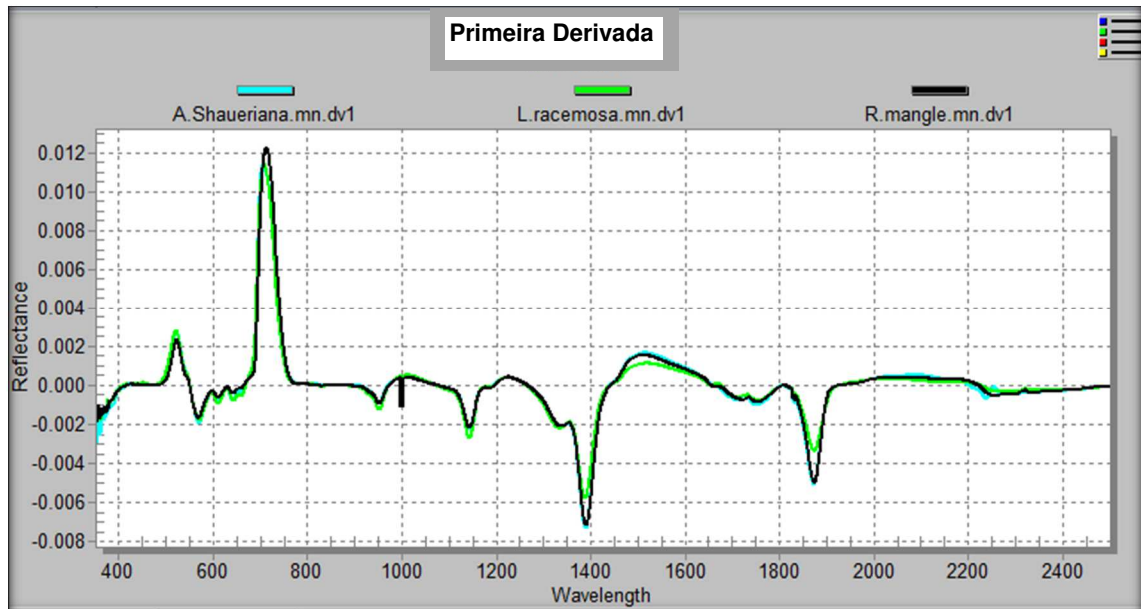


**Figura 6b:** Reflectância média de *A. schaueriana* nas estações de Areia Branca (AR), Porto Santana (PS), Porto Novo (PN) e Santa Maria (ST). No eixo x do gráfico, os comprimentos de onda foram restringidos em 350 a 1000 nm para facilitar a visualização das respostas espectrais nas regiões do azul e vermelho.



A análise derivativa (Figura 7) destaca as maiores variações dos espectros de reflectância, e pode ser um bom método de diferenciação das espécies *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana*. As regiões do espectro eletromagnético com maiores variações na curva espectral estão relacionadas aos comprimentos de onda: 520 nm (azul esverdeado), 710 nm (borda do vermelho) e 950 nm (NIR). Este resultado difere de outros trabalhos, como Wang & Souza (2009) e Flores-de-Santiago et al. (2012).

**Figura 7:** Primeira derivada da curva média de reflectância para três espécies de mangue; *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana*.



Segundo Barton (2011), no comprimento de onda em torno de 531 nm ocorre uma mudança sutil de reflectância como resultado do funcionamento do ciclo da xantofila. Ao incidir luz em uma folha, parte dessa energia pode ser usada no processo de fotossíntese e outra parte dissipada para evitar danos ao aparelho fotossintético.

Outra região do espectro que pode apresentar diferentes respostas espectrais em decorrência de alterações dos pigmentos é a região denominada de borda do vermelho. Esta região representa uma mudança abrupta na refletância foliar entre 680 e 780 nm causado pelos efeitos combinados da forte absorção de radiação por parte dos pigmentos de clorofila (GATES ET AL., 1965; HORLER ET AL., 1983). Aumentos na quantidade de clorofila, por exemplo, resulta em alterações das principais características de absorção de clorofila centrada no comprimento de onda de 680 nm (BUSCHMANN; NAGEL, 1993; DAWSON; CURRAN, 1998).

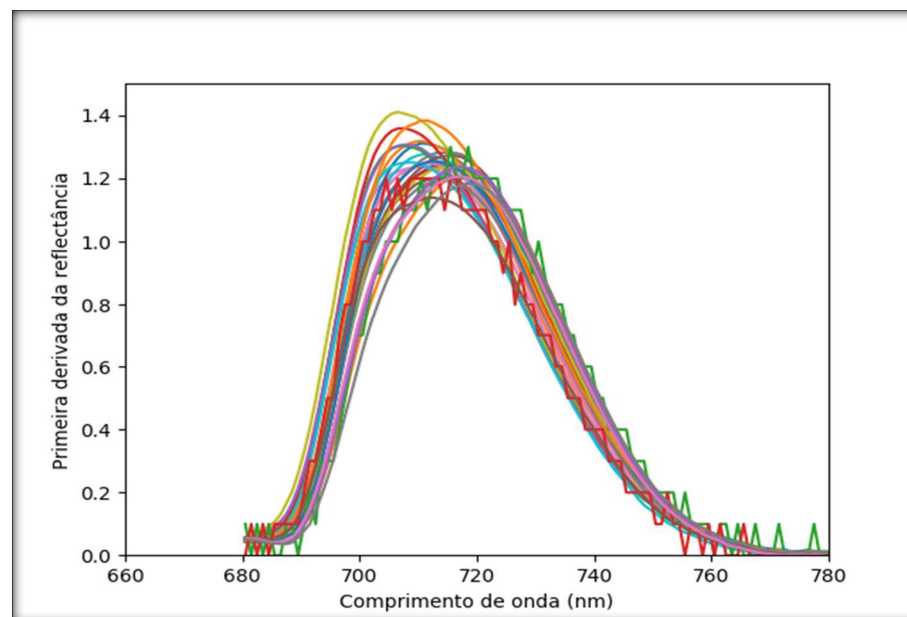
Os resultados dessa pesquisa mostram que a mesma espécie nas diferentes áreas de estudo não apresentou diferenças no comprimento de onda de 680nm, somente no comprimento de onda 780nm (Figuras 6b e 7b).



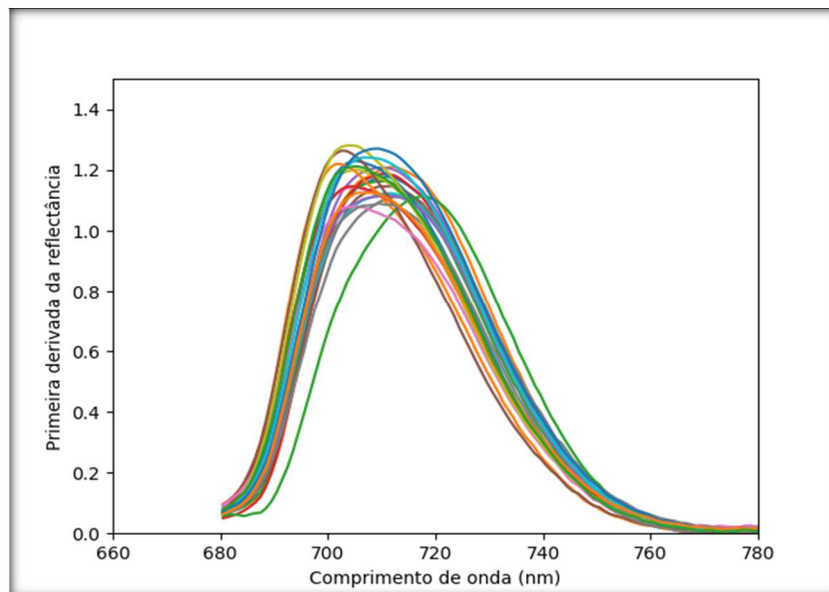
A resposta espectral referente ao comprimento de onda 950 nm (NIR) é controlada principalmente pelas paredes das células mesófilas esponjosas, com folhas mais saudáveis tendendo a ter uma maior refletância no NIR, uma vez que refletem uma quantidade excessiva de energia de entrada nesta região do espectro electromagnético. Em contraste, as folhas estressadas terão menor refletância devido às mudanças na estrutura celular. O teor de água foliar é o principal determinante da refletância na região SWIR (ZHANG ET AL. 2012). Para a espécie *L. racemosa* houve alterações nas respostas espectrais nesse comprimento de onda (950 nm). A área de Santa Maria apresentou os menores valores de refletância nesse comprimento de onda. Já Porto Novo apresentou menores valores de refletância na região SWIR (Figura 7a).

Foi obtido a refletância máxima da primeira derivada na região da borda do vermelho (660 e 780 nm) para a espécie *R. mangle* (Figura 8a) e para *L. racemosa* (Figura 8b). Os valores de refletância obtidos foram correlacionados com os valores de clorofila (a, b e total).

**Figura 8a:** Curvas espectrais da refletância máxima da primeira derivada para as espécies *R. mangle*.

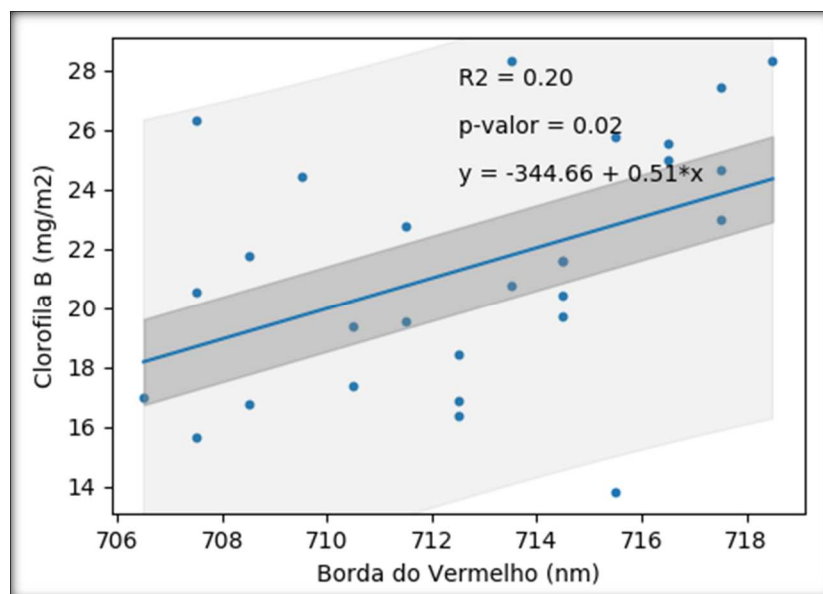


**Figura 8b:** Curvas espectrais da reflectância máxima da primeira derivada para as espécies *L. racemosa*.



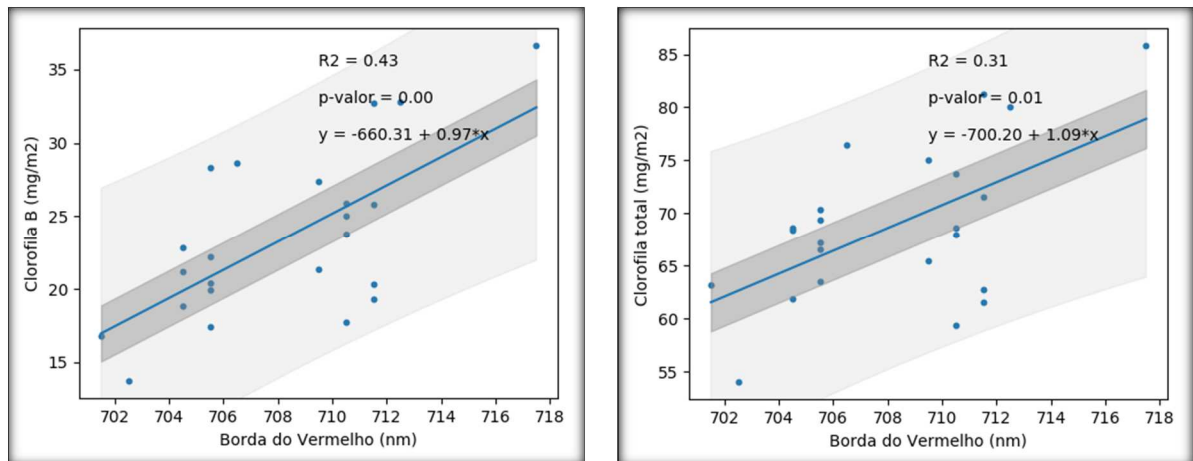
Para a espécie *R. mangle*, as variáveis dependentes Clorofila a, b e total foram correlacionadas uma a uma com a variável independente; reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho. Somente a correlação clorofila B x reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho foi significativa e apresentou coeficiente de determinação de 0,2 (Figura 9).

**Figura 9:** Análise de correlação clorofila b e reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho para a espécie *R. mangle*.



Para a espécie *L. racemosa*, as variáveis dependentes Clorofilas a, b e total foram também correlacionadas uma a uma com a variável independente; reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho. A correlação clorofila B x reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho foi significativa e apresentou coeficiente de determinação de 0,43 e a correlação clorofila total e a reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho apresentou coeficiente de determinação de 0,31 (Figura 10).

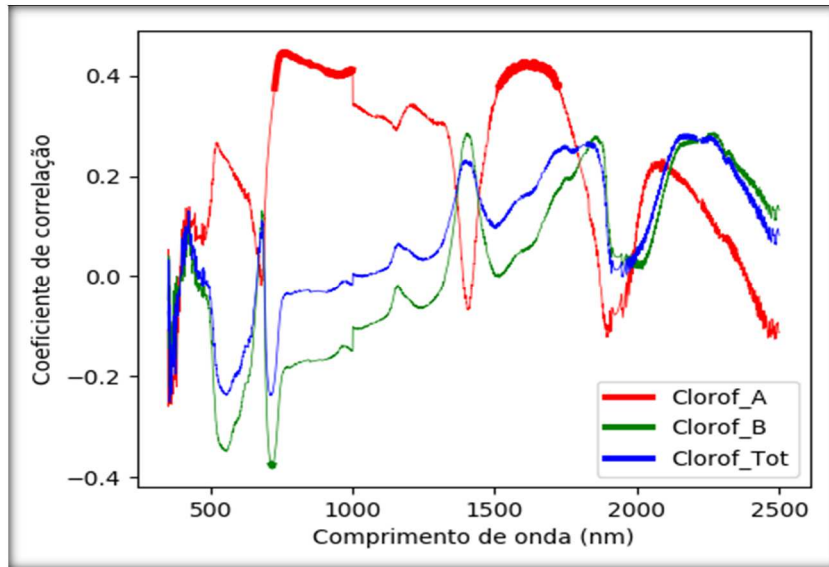
**Figura 10:** Análise de correlação clorofila b e reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho para a espécie *L. racemosa* (à esquerda). Análise de correlação clorofila total e reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho para a espécie *L. racemosa* (à direita).



Realizou-se também uma análise de correlação uma a uma das variáveis dependentes; banda estreita individual (2150 bandas), e as variáveis independentes; índices de clorofila (a, b e total). Na Figura 11, referente à espécie *R. mangle*, os valores máximos dos coeficientes de correlação foram negativos na região da borda do vermelho centrado em 716 nm para a variável clorofila b ( $r = 0,4$   $P < 0,05$ ). O maior coeficiente de correlação positivo para clorofila a está centrado na banda 761 nm ( $r = 0,45$   $P < 0,05$ ). A região do SWIR registrou coeficiente máximo de correlação positivo ( $r = 0,42$   $P < 0,05$ ) na banda 1620 nm.

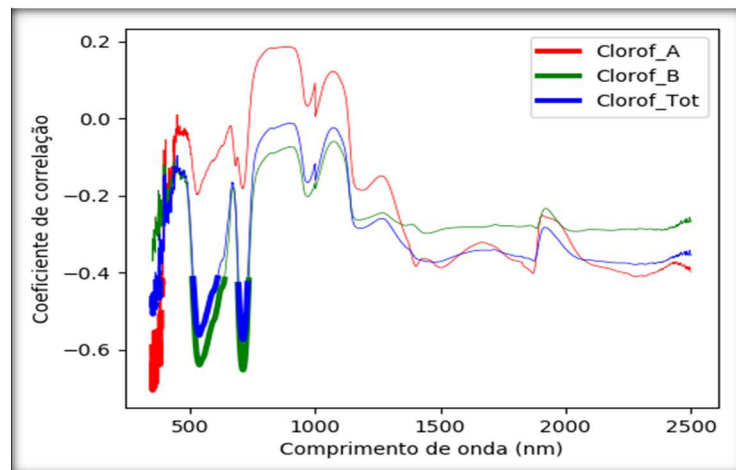
Na análise de regressão da variável dependente clorofila a, e a variável independente reflectância da banda estreita (761 nm), o coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,19$ ,  $P < 0,05$ . Para clorofila b, o coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,14$ ,  $P < 0,05$ .

**Figura 11:** Coeficientes de correlação ( $r$ ) entre a refletância espectral nos 2150 canais discretos e índices de clorofila para a espécie *R. mangle*.



A Figura 12 referente à espécie *L. racemosa* apresentou coeficiente negativo de correlação ( $r = 0,7$   $P < 0,05$ ) na região do azul centrado na banda 352 nm para a variável clorofila a. Para a clorofila b, o coeficiente máximo de correlação também foi negativo nas bandas 540nm ( $r = 0,64$   $P < 0,05$ ) e 713 nm ( $r = 0,65$   $P < 0,05$ ). Na análise de regressão da variável dependente clorofila a, e a variável independente refletância da banda estreita (352 nm), o coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,49$ ,  $P < 0,00$ . Na análise de regressão da variável dependente clorofila b, e a variável independente refletância da banda estreita (713 nm), o coeficiente de determinação foi de  $r^2 = 0,42$ ,  $P < 0,00$ .

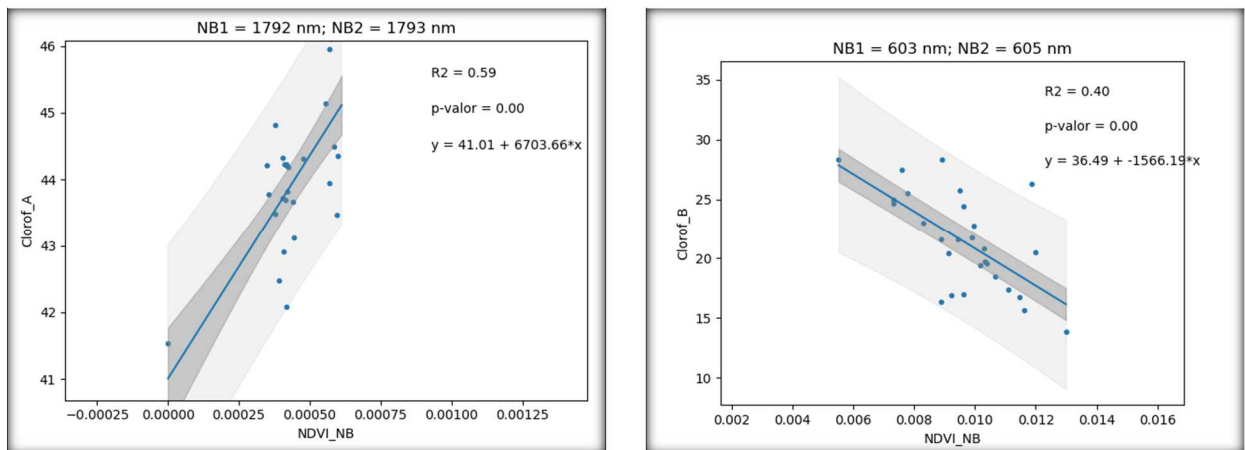
**Figura 12:** Coeficientes de correlação ( $r$ ) entre a refletância espectral nos 2150 canais discretos e índices de clorofila para a espécie *L. racemosa*.



Foi calculado o índice de diferença normalizada (NDVI) entre todas as possíveis combinações de duas bandas estreitas  $\lambda_1$  (350 a 2500 nm) e  $\lambda_2$  (350 a 250 nm). Os índices criados a partir das combinações das 2150 bandas foram correlacionados um a um às variáveis dependentes; clorofila a, b e total.

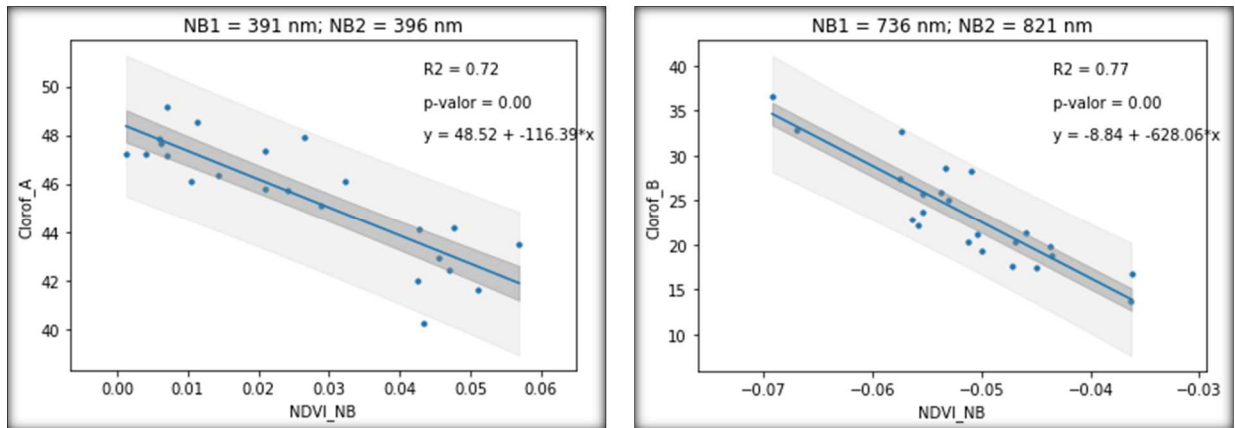
As bandas estreitas ( $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ) utilizadas no cálculo de NDVI e que registraram o maior coeficiente de determinação quando correlacionadas com as variáveis biofísicas da espécie *R. mangle* estão apresentadas na Figura 13. Na análise de regressão, os índices criados a partir das bandas (1792 e 1793nm) e (603 e 605nm) apresentaram os coeficientes de determinação mais altos quando correlacionados a clorofila a ( $r^2$  0,59) e clorofila b ( $r^2$  0,4) respectivamente.

**Figura 13:** Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 1792 e 1793 nm) e clorofila a para a espécie *R. mangle* (à esquerda). Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 603 e 605 nm) e clorofila b para a espécie *R. mangle* (à direita).



As bandas estreitas ( $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ) utilizadas no cálculo de NDVI e que apresentaram o maior coeficiente de determinação quando correlacionadas com as variáveis biofísicas da espécie *L. racemosa* estão apresentadas na Figura 14. Na análise de regressão, os índices criados a partir das bandas (391 e 396nm) e (736 e 821nm) apresentaram os coeficientes de determinação mais altos quando correlacionados a clorofila a ( $r^2$  0,72) e clorofila b ( $r^2$  0,77) respectivamente.

**Figura 14:** Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 391 e 396 nm) e clorofila a para a espécie *L. racemosa* (à esquerda). Gráfico de correlação do índice de vegetação (bandas 736 e 821 nm) e clorofila b para a espécie *L. racemosa* (à direita).



Não foi possível identificar para a espécie *R. mangle* uma banda altamente correlacionado com os valores de clorofila a e b. Mesmo utilizando o índice NDVI de bandas estreitas, os valores de  $r^2$  foram moderados a baixo. Isto sugere que os comprimentos de onda que possuem maior poder preditivo para explicar a variável clorofila estão sendo influenciados por condicionantes ambientais ou antrópicas que precisam ser melhores avaliadas. Uma destas interferências antrópicas pode estar relacionada ao material particulado, principalmente ferro particulado, proveniente de usinas de mineração situadas próxima ao manguezal.

Segundo Ong et al. (2003), o pó de minério causa uma forte interferência espectral nas folhas verdes, portanto podem ocorrer diferenças entre folhas limpas e empoeiradas. O óxido de ferro é caracterizado espectralmente por uma absorção ampla no comprimento de onda de 860 nm.

As espécies de *R. mangle* em sua maioria, estão localizadas na borda ou franja do mangue, seguindo um perfil transversal à linha de costa, estas espécies formam um cinturão, enquanto a espécie *L. racemosa* estão localizadas no interior da floresta (mangue de bacia). Outro ponto foi o período da coleta, no mês de maio de 2016, em que os valores de precipitação média mensal (12 mm) ficaram muito abaixo da média histórica para esse período (INMET, 2018). Os valores baixos de precipitação contribuíram para que as folhas estivessem empoeiradas.

A espessura da folha e ou secura das folhas como resultado do excesso de níveis de salinidade é um exemplo de interferências ambientais nos resultados. A variação sazonal do pigmento, especialmente nos manguezais em más condições, pode influenciar a variabilidade das amostras e as propriedades ópticas das folhas (Flores-de-Santiago et al. 2013a).

Em relação ao medidor de clorofila, uma importante fonte de erro pode ser o comprimento de onda utilizado pelo aparelho. O cálculo da relação simples (porcentagem de transmitância a 880 nm dividida pela transmissão percentual de 660 nm) pode ser influenciado pelas propriedades ópticas das folhas (FLORES-DE-SANTIAGO ET AL., 2013b).

Para a espécie *L. racemosa*, os valores preditivos para clorofila a e b foram mais altos quando comparados aos da espécie *R. mangle*. Os comprimentos de onda 391 e 396 nm compreendem a região azul do espectro, e os comprimentos de onda 736 e 821 compreendem a borda do vermelho e NIR respectivamente.

Câmeras como a Parrot Sequoia - Micasense podem ser embarcadas em um VANT, o sensor registra os comprimentos de onda na região do azul, verde, vermelho, borda do vermelho e NIR. Testes futuros com câmeras que registram o canal da borda do vermelho podem fornecer bons resultados para estimativas indiretas do teor foliar de clorofila.

#### 4.4. CONCLUSÃO

Os dados de clorofila (a, b e total) medidos em campo, apresentam índices de clorofila muito parecidos para as espécies *R. mangle* e *A. schaueriana*, enquanto que a espécie *A. schaueriana* apresentou diferenças significativas. Foi identificado também diferenças nos valores de clorofila a, b e total entre as estações de estudo. Em relação a espécie *L. racemosa*, a estação de Porto Novo possui índices de clorofila a, b e total mais altos quando comparado com as outras estações. A estação de Porto Novo é aquela mais sujeita aos tensores humanos que associados à salinidade ampliam os tensores que atuam sobre a planta, refletido nos seus mecanismos de ajuste para aumentar a eficiência na assimilação de energia luminosa.

As três espécies analisadas apresentaram comportamento espectral esperado com maior reflectância em NIR e SWIR e menor reflectância na região do visível (R, G, B). A curva espectral das espécies *L. racemosa* e *R. mangle* apresentaram diferenças na região do NIR para a estação de Santa Maria. A estação de Porto Novo apresentou menor reflectância na região do SWIR. A menor reflectância na região do infravermelho médio pode ser atribuída ao menor conteúdo de água na folha.

Com relação a análise estatística, o valor de reflectância obtido por meio do índice de vegetação das bandas estreitas 736 e 821nm, quando correlacionado com o índice de clorofila b da espécie *L. racemosa* apresentaram coeficiente de determinação de  $r^2$  0,77. Os resultados apontam para a necessidade de caracterizar mais detalhadamente as condições ambientais de cada área, e também as condições biofísicas do bosque para obtenção de modelos de regressão com melhor poder preditivo.

Com relação ao medidor portátil dos índices de clorofila, esse equipamento possui limitações técnicas principalmente quanto aos comprimentos de onda utilizado na estimativa dos índices de clorofila, por outro lado é um método de medição rápido e não destrutivo, tornando-se um instrumento útil na avaliação de parâmetros biofísicos para inventários do mangue. No entanto, as equações de regressão devem ser desenvolvidas para cada espécie e para estações com diferentes condições ambientais, levando em conta também o período seco e chuvoso.

#### 4.5. REFERENCIAS

- ANDERSON, K., GASTON, K.J. **Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology.** *Front. Ecol. Environ.* 11 (3), 138–146. 2013.
- BLASCO, F.; GAUQUELIN, T.; RASOLOFOHARINORO, M.; DENIS, J.; AIZPURU, M.; CALDAIROU, V. **Recent advances in mangrove studies using remote sensing data.** *Mar. Freshwater Res.* 49, 287-296. 1998.
- BLASCO, F., & AIZPURU, M. **Mangroves along the coastal stretch of the bay of bengal: Present status.** *Indian Journal of Marine Sciences*, 31(1), 9-20. Retrieved from <https://search-proquest.ez43.periodicos.capes.gov.br/docview/21119115?accountid=26625>. 2002.
- BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. **In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation.** *International Journal of Remote Sensing*, 14(4), 711–722. 1993.
- DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J. **A new technique for interpolating red edge position.** *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2133–2139.1998.
- FLORES-DE-SANTIAGO, F.; KOVACS, J.M.; FLORES-VERDUGO, F. **Seasonal changes in leaf chlorophyll a content and morphology in a sub-tropical mangrove forest of the Mexican Pacific.** *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 444, 57–68. 2012.
- GATES, D. M., KEEGAN, H. J., SCHLETER, J. C., & WEIDNER, V. R. **Spectral properties of plants.** *Applied Optics*, 4(1), 11–20. 1965.
- GARBULSKY MF, PEÑUELAS J, GAMON JA, INOUE Y, FILELLA I. **The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis.** *Remote Sens Environ* 115:281–297. 2011.
- KUENZER, C.; BLUEMEL, A.; GEBHARDT, S.; VO QUOC, T.; DECH, S. **Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review.** *Remote Sensing*, 2011.
- LICHTENTHALER HK. **The stress concept in plants: an introduction.** *Ann NY Acad Sci.* 1998.
- LUCENA, I.; MACIEL, V. E. de O.; SILVA, J. B. da; GALVÍNCIO J. D.; REJANE M. de M. **Pimentel Leaf structure of mangrove species to understand the spectral responses.** *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 2011.
- ONG, C.C.; CUDAHY, T.J.; CACCETTA, M.S.; PIGGOTT, M.S. **Deriving quantitative dust measurements related to iron ore handling from airborne hyperspectral data.** *Mining Tech. Trans. Inst. Min. Metall.* A 112, 158-163. 2003.



SOBRADO, M. A. **Leaf characteristics and gas exchange of the mangrove *Laguncularia racemosa* as affected by salinity.** *Photosynthetica* 43 (2): 217-221, 2005.

VAIPHASA, C.; ONGSOMWANG, S.; VAIPHASA, T.; SKIDMORE, A.K. **Tropical mangrove species discrimination using hyperspectral data: A laboratory study.** *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 65, 371-379. 2005.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M.; LIU, Y., FLORES-VERDUGO, F.; FLORES-DE-SANTIAGO, F. **Separating Mangrove Species and Conditions Using Laboratory Hyperspectral Data: A Case Study of a Degraded Mangrove Forest of the Mexican Pacific.** *Remote Sensing*, 2014.

ZHANG, C.; LIU, Y.; KOVACS, J.M.; FLORES-VERDUGO, F.; FLORES-SANTIAGO, F.; CHEN, K. **Spectral response to varying levels of leaf pigments collected from a degraded mangrove forest.** *J. Appl. Remote Sens.* 6, 1–14. 2012.

WANG, L.; SOUSA, W.P. **Distinguishing mangrove species with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance.** *Int. J. Remote Sens.* 30, 1267–1281. 2009.