



GABRIELA TAKAHASHI MIYOSHI

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE ESPÉCIES DE MATA
ATLÂNTICA DE INTERIOR EM NÍVEL FOLIAR E DE COPA





GABRIELA TAKAHASHI MIYOSHI

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE ESPÉCIES DE MATA ATLÂNTICA DE INTERIOR EM NÍVEL FOLIAR E DE COPA

Dissertação apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) de Presidente Prudente – SP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Nobuhiro Imai
Coorientadores: Prof. Dr. Antonio M. G. Tommaselli
Profa. Dra. Maria de Lourdes B. T.
Galo

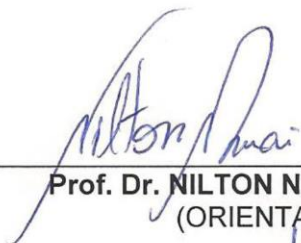
FICHA CATALOGRÁFICA

M68c Miyoshi, Gabriela Takahashi.
Caracterização espectral de espécies de Mata Atlântica de Interior em nível foliar e de copa / Gabriela Takahashi Miyoshi. - Presidente Prudente : [s.n], 2016
142 f.

Orientador: Nilton Nobuhiro Imai
Coorientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli
Coorientadora: Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Caracterização Espectral. 2. Veículo Aéreo Não Tripulado. 3. Sensoriamento Remoto hiperespectral. 4. Espectroscopia. I. Miyoshi, Gabriela Takahashi. II. Imai, Nilton Nobuhiro. III. Tommaselli, Antonio Maria Garcia. IV. Galo, Maria de Lourdes Bueno Trindade. V. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. VI. Título.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. NILTON NOBUHIRO IMAI
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. LUIZ HENRIQUE DA SILVA ROTA
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. VERALDO LIESENBERG
(UDESC)



GABRIELA TAKAHASHI MIYOSHI

Presidente Prudente (SP), 29 de fevereiro de 2016.

Resultado: Aprovada

*Aos meus amados pais, Ademar e Margarete, por tudo.
Às minhas irmãs e meu cunhado, Fabiana, Juliana e Danilo, pelo apoio e força, sempre.
À Pandora, Tica e Megan por todo amor, carinho e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

Me faltam palavras para agradecer a todos que contribuíram para a realização desse mestrado. Começo agradecendo a Deus que está sempre presente.

Aos meus pais, Ademar e Margarete, pelo amor incondicional, educação, por tudo. Agradeço ainda a Bia, Ju e Danilo, pelos “bonecos de vento” e por estarem sempre ao meu lado. Também não podem faltar agradecimentos à Pandora, Tica e Megan, que fazem parte dessa grande família e que são essenciais na minha vida. Sem vocês nada disso seria possível

À toda a minha família (Batians, Ditians, tios, tias e primos) que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse mestrado. Em especial à Raq, que também escolheu trilhar o caminho das Ciências Cartográficas e que me incentiva, mesmo sem saber, a melhorar sempre.

Não podem faltar agradecimentos ao Marcus. Ele que atura minhas bobagens, me apoia nos muitos (e muitos) momentos de crise e choro, quando eu quero desistir e jogar tudo para o alto. Me acompanhou e auxiliou em todas as etapas desse projeto de mestrado. Dá forças para eu continuar e sempre oferece uma palavra de conforto. Agradeço ainda pela amizade, carinho e broncas para continuar “nadando” sem perder tanto o foco. Agradeço muito.

Aos meus orientadores Nilton Nobuhiro Imai, Antonio Maria Garcia Tommaselli e Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo, por acreditarem no meu potencial, pelas oportunidades, ensinamentos passados, paciência, dedicação e orientação.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, prof. Enner Herenio de Alcântara, Dr. Luiz Henrique Rotta e prof. Veraldo Liesenberg pelas valiosas contribuições.

À equipe de campo, em especial ao Baltazar e Valtinho, que nos acompanharam em todos os trabalhos dentro da mata, abriram trilhas, identificaram espécies de vegetação e coletaram as folhas, mesmo que a mais de 5 m de altura.

A todos os professores da graduação e pós-graduação. Todos tiveram seu papel fundamental na minha formação acadêmica e pessoal. Aos funcionários do Departamento de Cartografia, em especial à Cátia e à Thaís, que me atendeu mesmo após seu horário de expediente.

À Cidinha e D. Zilda por sempre zelarem por nosso ambiente de trabalho.

À Érika Saito, pela amizade, ajuda e incentivo desde a Iniciação Científica, e a seu pequeno Nicolas pelos momentos de descontração nos corredores do prédio da Cartografia. Agradeço ainda à Raquel Oliveira que além da amizade me ofereceu estadia durante o período em que estive na Finlândia.

Aos queridos amigos da graduação e da vida, Yuka Nagai, Tetsuo Takata e Cássio Tamogami que sempre me apoiaram durante o mestrado.

Aos amigos do PPGCC, Fernanda Watanabe, Fernanda Torres, Renan Kiski, Samara Calçado, Mariana e Prol, Lucas Jamiro, Bruno Faga, Carol Ambrósio, Adilson Berveglieri e George Deroco, pela troca de ideias. Aos demais amigos e colegas do PPGCC.

À Sensormap e Nuvem.in pelo auxílio nas campanhas de campo para aquisição das imagens com a câmara acoplada ao VANT. Aos pesquisadores do FGI, em especial à profª. Eija Honkavaara pelo programa de ajustamento radiométrico das imagens hiperespectrais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo (130871/2014-1) durante a realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (2013/50426-4), por financiar o projeto VANT_4D_Bio e alguns dos equipamentos utilizados para aquisição dos dados.

Por fim, volto a agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse projeto. Muito obrigada.

“É preciso, antes de mais nada, querer”

Amyr Klink

RESUMO

Florestas têm importante papel na manutenção da biodiversidade, retenção de carbono e regulação do regime hidrológico, além de garantir proteção ao solo e às fontes d'água. Podem ser classificadas em diferentes estádios de desenvolvimento, caracterizados pela presença de espécies secundárias e clímax. Atualmente, no Brasil, as florestas estão reduzidas em fragmentos espalhados em diversas regiões do país sendo seu monitoramento necessário para realização de planos de manejo. Uma das formas de realizar o monitoramento florestal é utilizando o Sensoriamento Remoto hiperespectral, que fornece informação espectral detalhada dos alvos as quais são úteis para a discriminação das espécies de vegetação que compõem o remanescente florestal. Sensores hiperespectrais acoplados a VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) possibilitam a aquisição de dados para posterior delimitação das copas das espécies de vegetação. A Mata Atlântica, bioma rico em biodiversidade, está distribuída de norte a sul do Brasil, sendo classificada conforme a localização e características de cada formação florestal, dentre elas a Mata Atlântica de Interior. O objetivo desse trabalho é a caracterização espectral de espécies de vegetação em nível foliar e de copa para contribuir com informações que possam ser utilizadas para o monitoramento florestal. Foram adquiridas imagens hiperespectrais com câmara baseada no Interferômetro de Fabry-Perot acoplada em VANT. As imagens foram adquiridas na gleba Ponte Branca, pertencente à Estação Ecológica Mico-Leão-Preto. O processamento das imagens considerou 5 diferentes correções que permitiram mostrar a importância da geometria de aquisição das imagens e do ajustamento radiométrico em bloco. Copas de 12 espécies de vegetação foram delimitadas manualmente no mosaico de imagens gerado e nelas foram medidos valores de Fator de Reflectância Hemisférico Cônico. A caracterização espectral em nível foliar de 16 espécies de vegetação foi realizada em laboratório utilizando espectrorradiômetro. Por meio da análise de agrupamento, verificou-se a similaridade entre as respostas espectrais de tais espécies, tanto em nível de copa como foliar. Para minimizar a similaridade entre tais respostas, foram aplicados e normalizados 7 índices de vegetação. Por fim, utilizando os índices que apresentaram menor correlação entre si, uma nova análise de agrupamento foi realizada onde se verificou que a similaridade entre as espécies foi atenuada.

Palavras chave: Caracterização espectral. VANT. Sensoriamento Remoto Hiperespectral. Espectroscopia.

ABSTRACT

Forests have an important role to support biodiversity, carbon stocks and water regime. In addition, provide fundamental protection to soil and water resources. Pioneers and climax species characterize successional stages of forest. In Brazil, forests are reduced to fragments spread out over the country, being their monitoring necessary to perform management plans. Hyperspectral Remote Sensing provides detailed spectral information about targets and is feasible to discriminate trees species. Hyperspectral sensor attached to UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) makes possible the delineation of trees canopies. The Atlantic Forest, biome rich in biodiversity, is distributed from north to south in Brazil, being classified according to the different locations and characteristics, such as the Interior Atlantic Forest. The main objective of this project is spectral characterization of tree species in leaf and canopy level to contribute with forest monitoring. Hyperspectral images acquired with camera based on Fabry-Perot Interferometer coupled to an UAV were acquired. The interest area, Ponte Branca, belongs to the ecological station called Estação Ecológica Mico-Leão-Preto in the western region of São Paulo State. Imaging process where realized with 5 different corrections showing the importance of geometry during image acquisition and radiometric block adjustment. Trees canopies from 12 species were manually delimited in the images mosaic and Hemispherical Conical Reflectance Factor were obtained. Leaf spectral characterization was realized in laboratory using spectroradiometer. Clustering analyses were applied to verify similarity between spectral responses of species, in canopy and leaf level. 7 vegetation indexes were applied and normalized in order to reduce the similarity between the spectral responses. Lastly, a new clustering analyses was realized using the less correlated normalized indexes, concluding that the similarity between species was reduced.

Keywords: Spectral characterization. UAV. Hyperspectral Remote Sensing. Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das glebas pertencentes à ESEC MLP.....	27
Figura 2 - Área de aplicação da lei 11.428/2006 que dispõe sobre a proteção e utilização das áreas de Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual).	31
Figura 3 - Exemplo de processo de sucessão florestal de acordo com a ocorrência de espécies.	33
Figura 4 - Radiação incidente e refletida segundo os ângulos zenital (θ) e azimutal (ϕ).	36
Figura 5 - Fator de reflectância bidirecional.	37
Figura 6 - Fator de reflectância hemisférico cônico.	38
Figura 7 - Fator de reflectância bicônico.	39
Figura 8 - Resposta espectral característica da vegetação sadia e principais fatores que afetam a reflectância foliar	41
Figura 9 - Espectros de absorção dos pigmentos clorofila a, clorofila b, ficoeritrina, ficocianina e β -caroteno.	42
Figura 10 - Efeitos espectrais da folha de magnólia (<i>Magnolia grandiflora</i>) causados pela diminuição de umidade na folha.....	43
Figura 11 - Direções distintas de reflectância: a) Lambertiana; b) Direcional; c) Com maior influência da reflexão Especular; d) Retroespalhamento.	45
Figura 12 - Diferenças de registro de dados espectrais devido às posições do sensor. Sensor registrando: a) Áreas iluminadas pelo Sol; b) Mesmas proporções de áreas iluminadas e sombreadas; c) Áreas sombreadas.	46
Figura 13 - Geometria do FOV.....	48
Figura 14 - Resposta espectral original, não suavizada, e suavizada pelo filtro de média móvel.	50
Figura 15 - Espectro de reflectância de vegetação sadia e 1ª e 2ª derivada desse espectro de reflectância.....	52
Figura 16 - Largura à metade do máximo (FWHM – <i>Full Width at Half Maximum</i>).....	54
Figura 17 - Cálculo da posição da borda do vermelho (REP).	59
Figura 18 - Posição da borda do vermelho pelo método de extrapolação linear.....	60
Figura 19 - Espectrorradiômetro acoplado de acessório para FOV de 1°.	63
Figura 20 - Câmara Rikola, modelo 2014 (DT-0014).	64

Figura 21 - Intervalo espectral em que a câmara registra informação, onde o Sensor 2 registra as informações entre 500 nm e 636 nm e o Sensor 1 entre 650 nm e 900 nm.	65
Figura 22 - Princípio do Interferômetro de Fabry-Perot.	66
Figura 23 - Atuadores piezoelétricos integrados ao FPI e sensor CMOS da câmara baseada em FPI, modelo 2012.	67
Figura 24 - Áreas utilizadas para realização do trabalho e pertencentes à gleba Ponte Branca da ESEC MLP.	68
Figura 25 - Etapas a serem realizadas para realização do projeto de mestrado.....	70
Figura 26 - Geometria de aquisição dos dados radiométricos com o espectrorradiômetro em laboratório: a) FOV de 1° projetado na superfície de medição, com área projetada de 2,4 mm ² ; b) montagem dos equipamentos onde os ângulos zenitais do espectrorradiômetro e da lâmpada halógena são, respectivamente, 0° e 45° e o ângulo zenital entre estes dois equipamentos é 90°.....	71
Figura 27 - Poliestireno estruturado, material utilizado para cobrir a lente da câmara.	74
Figura 28 - Fator de reflectância bicônico (CCRF) de um tecido composto de algodão e do poliestireno estruturado utilizado para aquisição da imagem a ser utilizada na correção da corrente escura da câmara Rikola.	74
Figura 29 - Sistema de aquisição das imagens multiespectrais com a câmara Rikola.	75
Figura 30 - Alvos de EVA utilizados como referência radiométrica.	76
Figura 31 - Ângulos (ω, ϕ, κ) e respectivos sentidos de rotação.	77
Figura 32 - Predição da equação de transformação dos valores da imagem para valores de HCRF a partir de dois alvos de referência utilizando o método da linha empírica.	80
Figura 33 - Folhas utilizadas para avaliação do tempo de armazenamento e senescência, e os locais aproximados das medidas radiométricas.	85
Figura 34 - CCRF das folhas de pitanga, ingá-bravo e quaresma logo após sua colheita.....	86
Figura 35 - CCRF das folhas de pitanga para diversos tempo de armazenamento.	87
Figura 36 - CCRF das folhas de quaresma para diversos tempo de armazenamento.....	87
Figura 37 - CCRF das folhas de ingá-bravo para diversos tempo de armazenamento.....	87
Figura 38 - Folhas utilizadas para avaliação do tempo de armazenamento e senescência no momento de aquisição e após 24 horas de armazenamento.	88
Figura 39 - Folhas da PB_PLOT2 e PB_PLOT3 coletadas em 11/11/2014 e 19/12/2015 para caracterização espectral em laboratório.....	90
Figura 40 - CCRF das folhas da vegetação gleba Ponte Branca.	91

Figura 41 - Bandas espectrais configuradas (Configuração 1) sobre os espectros de CCRF das folhas de vegetação da gleba Ponte Branca.	93
Figura 42 - CCRF simulado para as bandas espectrais da Configuração 1 da câmara Rikola.	94
Figura 43 - Bandas espectrais configuradas (Configuração 2) sobre os espectros de CCRF das folhas de vegetação da gleba Ponte Branca.	95
Figura 44 - CCRF simulado para as bandas espectrais da Configuração 2 da câmara Rikola.	96
Figura 45 - Condições climáticas durante a aquisição das imagens (19/05/2015).	97
Figura 46 - Área imageada com as faixas de voo realizadas.	97
Figura 47 - Irradiância de cada imagem registrada pelo sensor de irradiância da câmara.	99
Figura 48 - Irradiância de cada imagem determinada a partir dos dados coletados em campo com o espectrorradiômetro.	100
Figura 49 - Coeficientes iniciais de correção relativa (a_{rel_j}) calculados a partir dos dados coletados em campo e pelo sensor da câmara.	100
Figura 50 - Atitude (ω, ϕ) das imagens adquiridas com a câmara Rikola em 19/05/2015.	101
Figura 51 - Imagem e alvos de EVA utilizados como referência para aplicação do método da linha empírica.	102
Figura 52 - Média e desvio padrão dos fatores de correção de cada banda espectral para as correções $BRDF_rela_câmara$, $BRDF_rela_campo$ e $BRDF_rela$	103
Figura 53 - Mosaicos realçados (banda 1, 506,07 nm) gerados pelas diferentes correções: a) ORTO; b) $BRDF$; c) $BRDF_rela_câmara$; d) $BRDF_rela_campo$; e) $BRDF_rela$	104
Figura 54 - Atitude do VANT durante a aquisição das imagens: a) na Faixa 1, o sensor de irradiância está inclinado em direção ao Sol e o efeito do retroespalhamento é acentuado; b) na Faixa 2, onde o sensor de irradiância não está inclinado e registra valores menores de irradiância do que na Faixa 1 e a câmara registra mesma quantidade de áreas sombreadas e iluminadas.	106
Figura 55 - Espectros de HCRF dos 7 alvos de EVA, de cada correção e de referência (campo), utilizados para validação da metodologia de processamento das imagens.	107
Figura 56 - Teste de normalidade de Anderson-Darling para as correções: a) ORTO; b) $BRDF$; c) $BRDF_rela_câmara$; d) $BRDF_rela_campo$; e) $BRDF_rela$	109
Figura 57 - Mosaico de imagens de 11/08/2015 com os polígonos das copas das árvores e, alvos de EVA utilizados para o método da linha empírica.	113
Figura 58 - HCRF de espécies de vegetação em nível de copa, pertencentes ao TRANSECTO1, obtidos em mosaico de imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.	115

Figura 59 - Desvio padrão dos valores de HCRF espécies de vegetação em nível de copa, pertencentes ao TRANSECTO1, calculados por propagação de erros nas imagens hiperespectrais de 11/08/2015.	116
Figura 60 - Dendrograma da análise de agrupamento das respostas espectrais obtidas no mosaico das imagens hiperespectrais.	117
Figura 61 - Dendrograma da análise de agrupamento dos índices de vegetação padronizados, calculados com as respostas espectrais das espécies obtidas no mosaico das imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.	121
Figura 62 - CCRF de folhas de espécies de vegetação coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.	125
Figura 63 - Desvio padrão dos valores de CCRF de folhas de espécies de vegetação coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.	126
Figura 64 - Dendrograma da análise de agrupamento das respostas espectrais das folhas adquiridas em em 03/12/2015 e 04/12/2015.	127
Figura 65 - Dendrograma da análise de agrupamento dos índices de vegetação padronizados calculados a partir das respostas espectrais obtidas em laboratório.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média e desvio padrão das discrepâncias entre os CCRFs das folhas de vegetação.	89
Tabela 2 - Variação do ângulo solar durante a aquisição das imagens em 19/05/2015.	96
Tabela 3 - Discrepâncias médias, adimensionais (1), entre as respostas espectrais extraídas do mosaico e a com uso do espectrorradiômetro.....	108
Tabela 4 - Valores estatísticos calculados e resultados do teste de hipótese t-Student, que verifica se a média das discrepâncias (dados da imagem e do campo) são iguais a zero.....	110
Tabela 5 - Variação do ângulo solar durante a aquisição das imagens em 11/08/2015.	110
Tabela 6 - Índices de vegetação, média e desvio padrão, dos valores de HCRF obtidos no mosaico de imagens hiperespectrais.....	119
Tabela 7 - Índices de vegetação padronizados das espécies de vegetação identificadas no mosaico de imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.	120
Tabela 8 - Correlação entre os índices de vegetação padronizados calculados a partir do mosaico de imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.	120
Tabela 9 - Índices de vegetação, média e desvio padrão, dos valores de CCRF das folhas coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.	128
Tabela 10 - Índices de vegetação padronizados dos valores de CCRF obtidos pela espectroscopia de laboratório.	129
Tabela 11 - Correlação entre os índices de vegetação padronizados calculados para as respostas espectrais das folhas coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.....	129

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais variáveis que afetam a resposta espectral de dossel de vegetação.	44
Quadro 2 - Especificações da câmara Rikola, modelo 2014 (DT-0014).....	64
Quadro 3 - Parâmetros para aquisição das imagens.	75
Quadro 4 - Tempo decorrido após a coleta e temperatura das medições radiométricas.	86
Quadro 5 - Bandas espectrais configuradas (Configuração 1).	93
Quadro 6 - Bandas espectrais configuradas (configuração 2).	95
Quadro 7 - Características das espécies de vegetação cujas copas foram delimitadas no mosaico de imagens hiperspectrais.....	112
Quadro 8 - Nome científico das espécies de folhas coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015 para caracterização espectral em nível foliar.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASD	–	“ <i>Analytical Spectral Devices</i> ”
BRDF	–	“ <i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i> ”
BRF	–	“ <i>Bidirectional Reflectance Factor</i> ”
CASI	–	“ <i>Compact Airborne Spectrographic Imager</i> ”
CCRF	–	“ <i>Biconical Reflectance Factor</i> ”
DAF	–	“Distribuição do Ângulo Foliar”
DAP	–	“Diâmetro à Altura do Peito”
ESEC MLP	–	“Estação Ecológica Mico-Leão-Preto”
EVA	–	“Etil Vinil Acetato”
FCT/UNESP	–	“Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” ”
FGI	–	“ <i>Finnish Geospatial Research Institute</i> ”
FOV	–	“ <i>Field Of View</i> ”
FPI	–	“ <i>Fabry-Perot Interferometer</i> ”
FRL	–	“ <i>Far-Red Line</i> ”
FWHM	–	“ <i>Full Width at Half Maximum</i> ”
GNSS	–	“ <i>Global Navigation Satellite System</i> ”
GPS	–	“ <i>Global Positioning System</i> ”
GSD	–	“ <i>Ground Sample Distance</i> ”
HCRF	–	“ <i>Hemispherical Conical Reflectance Factor</i> ”
HYDICE	–	“ <i>HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment</i> ”
IAF	–	“Índice de Área Foliar”
IFOV	–	“ <i>Instantaneous Field Of View</i> ”
IMU	–	“ <i>Inertial Measurement Unit</i> ”
INPE	–	“Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais”
LASER	–	“ <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> ”
MDS	–	“Modelo Digital de Superfície”
ND	–	“Número Digital”
NDVI	–	“ <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ”
NIR	–	“ <i>Near Infra-Red</i> ”
NIRL	–	“ <i>Near Infra-Red Line</i> ”
PEMD	–	“Parque Estadual Morro do Diabo”
PEPF	–	“Parque Estadual Porto Ferreira”
POE	–	“Parâmetros de Orientação Exterior”

POI	–	“Parâmetros e Orientação Interior”
PRI	–	“ <i>Photochemical Reflectance Index</i> ”
PSRI	–	“ <i>Plant Senescence Reflectance Index</i> ”
PSSR	–	“ <i>Pigment Specific Simple Ratio</i> ”
PSSR _a	–	“ <i>Pigment Specific Simple Ratio (chlorophyll a)</i> ”
PSSR _b	–	“ <i>Pigment Specific Simple Ratio (chlorophyll b)</i> ”
RE	–	“ <i>Red Edge</i> ”
RED	–	“Vermelho”
REM	–	“Radiação Eletromagnética”
REP	–	“ <i>Red Edge Position</i> ”
RMSE	–	“ <i>Root Mean Square Error</i> ”
RS	–	“Razão Simples”
SAIL	–	“ <i>Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves</i> ”
SAM	–	“ <i>Spectral Angle Mapper</i> ”
SI	–	“Sistema Internacional”
SID	–	“ <i>Spectral Information Divergence</i> ”
SIPI	–	“ <i>Structure Insensitive Pigment Reflectance Index</i> ”
SRF	–	“ <i>Spectral Response Function</i> ”
SRTM	–	“ <i>Shuttle RADAR Topographic Mission</i> ”
UTC	–	“ <i>Universal Time Coordinated</i> ”
VANT	–	“Veículo Aéreo Não Tripulado”
VANT_4D_Bio	–	“Sensoriamento Remoto 4D baseado em Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para o mapeamento da biodiversidade e suas mudanças em florestas tropicais no Brasil”

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivo.....	23
1.2 Sensoriamento Remoto aplicado em monitoramento florestal	24
1.3 Cooperação internacional - Projeto VANT_4D_BIO	26
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
2.1 Mata Atlântica.....	29
2.2 Estádio sucessional da vegetação.....	32
2.3 Grandezas radiométricas	34
2.4 Interação da radiação eletromagnética com a vegetação	40
2.5 Espectroscopia de campo e laboratório.....	47
2.6 Tratamento de dados espectrais	50
2.7 Análise de dados espectrais – Índices de vegetação	54
2.8 Estatística Multivariada	61
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1 Materiais	63
3.1.1 Espectrorradiômetro FieldSpec® Handheld	63
3.1.2 Câmara hiperespectral baseada em interferômetro de Fabry-Perot	63
3.1.3 Interferômetro de Fabry-Perot (FPI – <i>Fabry-Perot Interferometer</i>).....	66
3.2 Área de estudo.....	67
3.3 Método	69
3.3.1 Coleta de amostras de vegetação	70
3.3.2 Caracterização espectral foliar	70
3.3.3 Especificação das bandas espectrais e configuração da câmara Rikola	73
3.3.4 Aquisição das imagens.....	74
3.3.5 Processamento das imagens	76
3.3.5.1 Validação do processamento das imagens.....	81
3.3.6 Caracterização espectral das copas de vegetação	83

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	85
4.1 Avaliação do tempo de armazenamento e senescência da vegetação	85
4.2 CCRF das folhas de vegetação para configuração das bandas espectrais.....	89
4.3 Bandas espectrais definidas para a câmara Rikola e simulação espectral	92
4.4 Validação da metodologia de processamento das imagens	96
4.5 Caracterização espectral da vegetação em nível de copa.....	110
4.6 Caracterização espectral em nível foliar realizada em laboratório	122
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	131
REFERÊNCIAS	135

1. INTRODUÇÃO

Cobrindo cerca de um terço da superfície terrestre, as florestas, em geral, têm importante papel para conservação de biodiversidade, retenção de carbono e regulação do regime hidrológico, possuindo também funções relacionadas ao fornecimento de matéria prima, proteção do solo e das fontes de água (CLARK; ROBERTS; CLARK, 2005; MIURA et al., 2015; ROMIJN et al., 2015). Ressalta-se assim a importância do desenvolvimento de procedimentos e técnicas que viabilizem o monitoramento florestal.

Algumas formas de monitoramento utilizam apenas parâmetros ecológicos coletados em campo (SIMINSKI et al., 2011; FONSECA; CARVALHO, 2012) enquanto outras utilizam técnicas de Sensoriamento Remoto, extraíndo propriedades geométricas da vegetação adquiridas por sensores ativos como o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) (MARTINUZZI et al., 2013), interpretando imagens (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2014) ou utilizando características espectrais da vegetação (VIEIRA et al., 2003; CELES et al., 2013; KATTENBORN, 2015).

Os sensores remotos, imageadores ou não, são capazes de registrar a informação dos alvos em diversas porções do espectro eletromagnético, sendo classificados em multiespectrais ou hiperespectrais. Esses sensores se diferem pela capacidade de detalhamento espectral das medidas, sendo que o hiperespectral é o tipo que possui maior capacidade de detalhamento.

Shippert (2004) e Novo (2010) afirmam que as bandas de um sensor hiperespectral devem ser estreitas, contíguas e em número suficiente para que permitam a identificação e distinção de objetos similares. Logo, para o monitoramento da vegetação há destaque para os sensores hiperespectrais, por possibilitarem melhor discriminação entre espécies (CLARK; ROBERTS; CLARK, 2005; LUCAS et al., 2008; KATTENBORN, 2015)

Além dos sensores, destaca-se também o nível de aquisição de dados, que podem ser adquiridos em laboratório ou em campo (*in situ*), a partir de plataformas aéreas ou orbitais. Para o caso das plataformas aéreas, as aeronaves tripuladas são muito utilizadas, mas os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) vêm ganhando destaque nos últimos anos (PANEQUE-GÁLVEZ et al, 2014). Trata-se de uma plataforma remotamente operada capaz de acoplar sensores para atender diversas aplicações como, por exemplo, documentação de patrimônio cultural (EISENBEISS; ZANG, 2006), monitoramento de qualidade da água

(HONKAVAARA et al., 2013a) e monitoramento da vegetação (SAARI et al., 2011; PANEQUE-GÁLVEZ et al, 2014).

O uso dos VANTs para as aplicações de Sensoriamento Remoto no Brasil tem aumentado, apesar das desvantagens como a carga limitada de equipamentos, menor tempo de voo e falta de regulamentação das atividades. Essas plataformas podem observar lugares de difícil acesso e têm custo operacional menor do que aeronaves tripuladas, o que possibilita maior resolução temporal das imagens e mais agilidade na aquisição dos dados, pois não dependem de aeroportos para decolagem, nem da disponibilidade de satélite na área desejada (EVERAERTS, 2008; SAARI et al., 2011; PANEQUE-GÁLVEZ et al, 2014).

Para o caso de VANTs acoplados de sensores imageadores, tem-se a possibilidade de obtenção de resolução espacial centimétrica, devido à relação altura de voo e distância focal do sensor (escala), característica importante para determinadas aplicações como, por exemplo, delimitação individual das copas das árvores para monitoramento florestal. Quando utilizados sensores imageadores hiperespectrais, além da resolução espacial tem-se o detalhamento espectral que pode ser utilizado para discriminação das espécies de vegetação.

No Brasil, a Mata Atlântica é um bioma rico em biodiversidade e foi o primeiro a ser explorado, desde a chegada dos Europeus (MMA, 2011). Originalmente estava presente em 17 estados do território brasileiro, abrangendo uma área aproximada de 1.300.000 km². Atualmente restam apenas 22% desta área em diferentes estádios de regeneração e espalhados em diversos fragmentos (MMA, 2015).

O avanço do desmatamento da Mata Atlântica estimulou a criação da lei nº 11.428/2006 que dispõe sobre sua conservação, proteção e utilização (MMA, 2015). Ainda, foram criados outros programas para monitoramento, preservação e recuperação da Mata Atlântica como a parceria entre a Fundação SOS Mata Atlântica e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que monitora a área deste bioma em âmbito nacional desde 1990 (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2014).

Por estar presente em diversos fragmentos espalhados pelo território brasileiro, não somente no litoral, IBGE (2012) separou e classificou a Mata Atlântica em cinco tipos fisionômicos, considerando as características das formações florestais e localização de cada tipo: i) Floresta Ombrófila Densa, ou Mata Atlântica Litorânea; ii) Floresta Ombrófila Mista; iii) Floresta Ombrófila Aberta; iv) Floresta Estacional Decidual, e; v) Floresta Estacional Semidecidual, ou Mata Atlântica de Interior.

Cada formação florestal possui diferentes características e graus de desenvolvimento (sucessão), que podem ser monitorados de acordo com as espécies presentes e quantidade de indivíduos por espécies dos tipos pioneiras, secundárias e clímax (SWAINE; WHITMORE, 1988; MACIEL et al., 2003; LORENZI, 2008).

A evolução de florestas tropicais, cuja maturidade pode ser relacionada com sua capacidade de suporte à biodiversidade, possui correlação com a presença de indivíduos de espécies pertencentes às classes secundárias e clímax (SWAINE; WHITMORE, 1988; MACIEL, 2003; LORENZI, 2008). Entretanto, a densidade desses indivíduos, quando se destacam pelo maior porte em relação ao sub-bosque do dossel florestal, só pode ser obtida pela sua identificação em campo.

É conhecido o elevado potencial dos dados obtidos por varredura laser para o monitoramento florestal (MARTINUZZI et al., 2013). No entanto, essa técnica possui custo elevado e produz dados espectrais limitados ao infravermelho. Imagens multiespectrais e hiperespectrais têm grande valor para a realização de análises sinópticas de florestas, como a Amazônica (CELES et al., 2013). Por sua vez, o monitoramento do grau de desenvolvimento de fragmentos de Mata Atlântica tem sido realizado predominantemente com base em dados levantados em campo (LONGHI et al., 2006; SIMINSKI et al., 2011; FONSECA; CARVALHO, 2012).

Imagens adquiridas por sensores hiperespectrais podem contribuir para o monitoramento florestal utilizando o detalhamento espectral e resolução espacial alcançados pelos sensores quando acoplados em VANT, desde que sejam corrigidas das variações ocasionadas pela Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional e que o detalhamento espectral revele as variações de resposta espectral de forma detalhada em regiões do espectro onde o comportamento espectral apresente maior variabilidade entre as espécies de maior interesse.

Em geral, os sensores imageadores hiperespectrais adotam arquitetura *pushbroom*, ou linear, que introduz um grande desafio à correção geométrica devido à formação das imagens a partir de uma sequência de linhas. Sensores *pushbroom* demandam a determinação da posição e atitude da plataforma no instante de aquisição de cada uma das linhas, de modo a possibilitar a correção das variações de atitude e posição do sensor de varredura ao longo da trajetória da plataforma. Faz-se ainda necessário o uso de modelos digitais de superfície externos, uma vez que a geometria *pushbroom* não permite cobertura estereoscópica longitudinal.

Um sensor imageador hiperespectral que realiza tomada com detectores organizados na forma de quadro constitui uma solução tecnológica mais adequada para levantamentos aéreos em plataforma VANT, uma vez que imagens de quadro podem ter sua posição e atitude determinadas indiretamente com menor dependência dos dados de navegação da plataforma. No entanto, é necessário que a câmara seja de pequeno porte e suficientemente leve para ser transportada pelo VANT. A câmara hiperespectral Rikola, utilizada neste estudo, possui características que permitem sua instalação em VANT, mas com limitações relacionadas ao número de bandas tomadas em cada cena.

Existem na literatura técnicas de processamento em Sensoriamento Remoto que permitem o tratamento geométrico (ANDRADE, 2003) e espectral (HONKAVAARA et al., 2013b) de imagens, possibilitando a produção de mosaicos georreferenciados cujos valores dos pixels sejam grandezas radiométricas. Desta forma, foi possível desenvolver uma metodologia que contemple desde a especificação de regiões espectrais nas quais devam ser realizadas medidas para a recuperação da forma da resposta espectral da vegetação, até o processamento geométrico e radiométrico das imagens para produção de mosaicos com alto grau de acurácia, e assim produzir uma biblioteca de assinaturas espectrais que venham a ser utilizadas para discriminação de espécies da Mata Atlântica de Interior.

A seguir são apresentados o objetivo deste trabalho de mestrado, uma revisão teórica relacionada com o uso de informação hiperespectral para monitoramento florestal e o projeto de cooperação internacional que apoia este trabalho.

1.1 OBJETIVO

Realizar a caracterização espectral de espécies de vegetação presente em fragmentos florestais de Mata Atlântica de Interior utilizando imagens hiperespectrais adquiridas por sensor embarcado em VANT para aquisição de informações que possam auxiliar o monitoramento deste tipo florestal.

Como objetivos específicos, ou seja, etapas a serem cumpridas para obtenção do objetivo geral, têm-se:

1. Especificar bandas espectrais que possam ser utilizadas para discriminação das espécies de vegetação;
2. Especificar os parâmetros e configurações necessários para a aquisição e processamento das imagens hiperespectrais;

3. Caracterizar espectralmente espécies de vegetação em nível foliar;
4. Caracterizar espectralmente copas de espécies de vegetação;
5. Verificar a similaridade entre as respostas espectrais das espécies de vegetação.

1.2 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO EM MONITORAMENTO FLORESTAL

A seguir são apresentados alguns trabalhos da literatura relacionados com a aquisição de informações por meio do Sensoriamento Remoto para aplicações em monitoramento florestal.

Clark, Roberts e Clark (2005) utilizaram a alta resolução espacial e espectral do sensor imageador *HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment* (HYDICE) em conjunto com a alta resolução espectral do espectrorradiômetro da *Analytical Spectral Devices* (ASD) para discriminação de copas de árvores de Floresta Tropical. Como classificadores foram utilizados a Análise Discriminante, a Máxima Verossimilhança e o mapeamento por ângulo espectral (SAM – *Spectral Angle Mapper*), que apresentaram acurácia satisfatória na diferenciação das espécies.

Kalacska et al. (2007) tiveram como objetivo principal a discriminação de lianas e árvores emergentes. Coletou-se a resposta espectral, em nível foliar e de copa, destes dois tipos de vegetação com um espectrorradiômetro da ASD e imagens do HYDICE. Aplicaram três métodos de redução de dados e nove classificadores. Ao final, concluíram que, em nível foliar, a região do visível é mais importante para discriminação de lianas e árvores, e em nível de dossel a região do espectro eletromagnético que melhor separa essas duas classes é a região do infravermelho de ondas curtas.

Lucas et al. (2008), utilizaram a resposta espectral obtida em imagens adquiridas com o sensor *Compact Airborne Spectrographic Imager* (CASI) para discriminação de dosséis de árvores para monitoramento da biodiversidade em florestas australianas. Para isso, delinearão automaticamente as copas de árvores cujas respostas espectrais foram obtidas pela reflectância média, de cada banda, dos pixels que compunham a copa das árvores. Por fim aplicou-se a Análise Discriminante para classificação dos dosséis e avaliação da biodiversidade.

Clark e Roberts (2012) investigaram um método para classificar sete espécies arbóreas pertencentes a Floresta Tropical da Costa Rica utilizando dados hiperespectrais

adquiridos em laboratório e em campo. As respostas radiométricas de folhas e cascas de árvores adquiridas em laboratório foram utilizadas para simular a resposta espectral das bandas do sensor HYDICE, que também adquiriu imagens sobre a área de estudo. Índices espectrais, análise derivativa e remoção do contínuo foram as técnicas utilizadas em conjunto com a análise de mistura espectral e com o classificador *Random Forests* para diferenciar as espécies de árvore, resultando em acurácias maiores que 70%.

Celes et al. (2013) estimaram valores de biomassa para uma região de Floresta Tropical do município de Maués, no Amazonas utilizando dados *in situ* da floresta, imagens multiespectrais do sensor TM do satélite Landsat-5 e dados de elevação de terreno do SRTM (*Shuttle RADAR Topographic Mission*). As imagens multiespectrais foram convertidas para refletância de superfície e classificadas com um classificador não supervisionado. A classificação também foi aplicada para a declividade e curvatura do terreno originados do SRTM. Por fim, as classificações foram sobrepostas e relacionadas estatisticamente com os parâmetros de diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores, área basal, biomassa fresca total, densidade e número de indivíduos, gerando um mapa de biomassa.

Saari et al. (2011) apresentaram resultados preliminares de um sistema de aquisição de imagens hiperespectrais para aplicações florestais e agrícolas utilizando um sensor hiperespectral de quadro embarcado em VANT. Ressalta-se a importância e o crescimento do uso de imagens de alta resolução espectral para caracterização espectral de dosséis florestais para monitoramento e estimativa de biomassa. Ao final do trabalho, os autores constataram a possibilidade da utilização de imagens que contenham dados dos espectros visível e infravermelho próximo para inventários florestais e aplicações agrícolas, como por exemplo, o planejamento da fertilização com nitrogênio.

Paneque-Gálvez et al. (2014) avaliaram o potencial do uso do Sensoriamento Remoto utilizando plataformas VANT para o monitoramento de florestas. Dentre as vantagens do uso destes sistemas de aquisição, destaca-se a resolução espacial centimétrica das imagens obtidas por estes sistemas, potencial de alta resolução temporal (por ter um custo operacional menor do que a de aeronaves). E apesar das desvantagens como, por exemplo, carga limitada e autonomia de voo, para aplicações de monitoramento ambiental esta plataforma de aquisição aumenta substancialmente a quantidade de dados, mostrando-se uma ferramenta de potencial para o monitoramento dos fragmentos florestais.

Getzin, Wiegand e Schöning (2012) mostram o uso de imagens obtidas por sensor embarcado em VANT para avaliar a biodiversidade de sub-bosque de florestas

quantificando as áreas de clareira. Foram utilizadas imagens coloridas (RGB) com resolução espacial de 7 cm adquiridas sobre áreas testes na Alemanha. A alta resolução espacial das imagens permitiu o cálculo de parâmetros das clareiras como, por exemplo, área e perímetro. Esses parâmetros foram relacionados com a biodiversidade das áreas de estudo mostrando a possibilidade de monitoramento de biodiversidade utilizando imagens de alta resolução espacial obtidas por sensor embarcado em VANT.

Honkavaara et al. (2013b) utilizaram uma câmara baseada em Interferômetro de Fabry-Perot acoplada em VANT para aplicações de monitoramento ambiental. Diferentes modelos radiométricos foram testados para o ajustamento radiométrico em bloco. Para o melhor bloco ajustado foi aplicado o método da linha empírica para obtenção de valores de fator de reflectância na imagem. Segundo os autores, os resultados das correções radiométricas foram promissores, sendo que tais correções melhoraram a homogeneidade dos dados. Porém, a acurácia dos resultados não pôde ser calculada, pois não foram adquiridos espectros de referência de amostras de vegetação.

Outros trabalhos que utilizam a resposta espectral da vegetação para monitoramento florestal podem ser vistos em Bunting e Lucas (2006), Somers e Asner (2012), Féret e Asner (2013), Somers e Asner (2014) e Kattenborn et al. (2015).

1.3 COOPERAÇÃO INTERNACIONAL - PROJETO VANT_4D_BIO

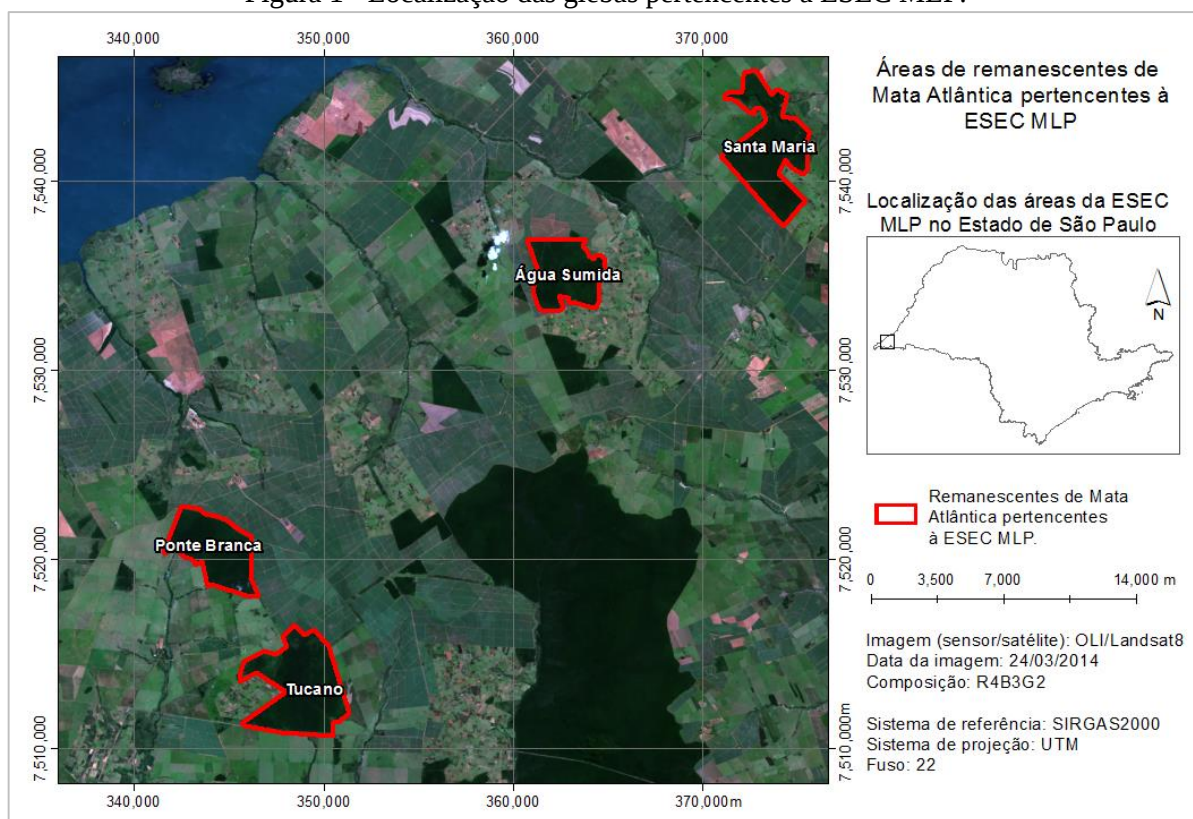
A parceria entre a FCT/UNESP (Faculdade de Ciência e Tecnologia/ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”) de Presidente Prudente – SP, e o Instituto Finlandês de Geodésia (FGI – *Finnish Geodetic Institute*, atualmente denominado *Finnish Geospatial Research Institute* e integrado ao *National Land Survey of Finland*) localizado em Massala na Finlândia, possibilitou o desenvolvimento do projeto intitulado ‘*Sensoriamento Remoto 4D baseado em Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para o mapeamento da biodiversidade e suas mudanças em florestas tropicais no Brasil (VANT_4D_Bio)*’.

O objetivo geral deste projeto é o desenvolvimento de tecnologias de mapeamento para detecção da mudança na biodiversidade utilizando: 1) VANT como plataforma de transporte do sensor, 2) modelagem completa do objeto, composta pelas características espectrais e geométricas do dossel florestal, e 3) séries temporais de modelagem

de objetos para revelar mudanças ambientais da Mata Atlântica de Interior do Estado de São Paulo.

As áreas de estudo selecionadas para o desenvolvimento do VANT_4D_Bio pertencem à Estação Ecológica Mico-Leão-Preto (ESEC MLP), Figura 1, e estão localizadas na região oeste do Estado de São Paulo. A ESEC MLP foi criada em 2012 visando a proteção dos remanescentes de Mata Atlântica de Interior e de sua fauna. Ela é composta por quatro glebas¹ (Santa Maria, Água Sumida, Ponte Branca e Tucano).

Figura 1 - Localização das glebas pertencentes à ESEC MLP.



As glebas se encontram distantes uma das outras e apresentam diferentes tipos fitogeográficos² entre si. Dentre as diferenças tem-se a geologia onde as glebas Ponte Branca e Tucano estão localizadas na formação geológica Caiuá (Kc), que compõe parte da Água Sumida juntamente com as formações Adamantina (Ka) e Santo Anastácio (Ksa). Já a gleba Santa Maria está localizada predominantemente sobre a formação Adamantina (Ka) (MMA, 2007). Outros fatores que diferenciam as glebas são os diferentes estádios de conservação e diversidade de espécies (MMA, 2007).

¹ Gleba: porção de terra, lote.

² Fitogeografia: ramo da botânica que estuda a distribuição das plantas e suas razões.

Neste trabalho de mestrado foram utilizados recursos adquiridos e financiados pelo VANT_4D_Bio como, por exemplo, a câmara hiperespectral e as campanhas de campo para aquisição de imagens e reconhecimento das espécies arbóreas da gleba Ponte Branca. Procurou-se ainda contribuir com a metodologia de processamento geométrico e radiométrico das imagens hiperespectrais e com a geração de mosaico ortorretificado de imagens hiperespectrais. Adicionalmente, foram determinadas as assinaturas espectrais de espécies de vegetação em nível foliar e de copa, que podem ser utilizadas para discriminação e classificação das espécies, contribuindo assim para o monitoramento dessa formação vegetal.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma das definições mais amplas de Sensoriamento Remoto é a aquisição de informações sem que haja contato físico com os objetos. Essa aquisição de informações é possível devido ao registro e estudo das alterações da interação entre a radiação eletromagnética (REM) com os alvos para cada parte do espectro eletromagnético, sendo também necessário conhecer os alvos estudados.

A seguir são apresentadas as principais características da Mata Atlântica, dos estádios sucessionais e os principais conceitos do Sensoriamento Remoto relacionados aos objetivos deste projeto: i) Mata Atlântica; ii) Estádios sucessionais; iii) Grandezas radiométricas e configuração da geometria de aquisição; iv) Interação da REM com a vegetação; v) Espectroscopia de campo e laboratório; vi) Tratamento de dados espectrais, e; vii) Análise dos dados espectrais utilizando índices de vegetação.

2.1 MATA ATLÂNTICA

IBGE (2012) e MMA (2015) definem o bioma Mata Atlântica como o conjunto de 5 formações florestais e ecossistemas associados, que colaboram para manutenção do equilíbrio climático, preservam o fluxo dos mananciais, asseguram a fertilidade do solo e atuam como protetoras das escarpas e encosta de serras. Cada conjunto (Figura 2) foi classificado conforme a localização e características das formações florestais.

- **Floresta Ombrófila Densa (Floresta Tropical Pluvial)**

Vegetação da serra litorânea, também conhecida como Mata Atlântica Litorânea, onde há predominância do clima tropical, com temperaturas em torno de 25 °C e alta taxa de precipitação.

- **Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária)**

Vegetação localizada no Planalto Meridional, principalmente na região sul do Brasil, onde há predominância da mata de araucárias e dos pinheiros;

- **Floresta Ombrófila Aberta (Faciações da Floresta Ombrófila Densa)**

Vegetação localizada na transição entre a Ombrófila Densa e a Floresta Estacional Semidecidual.

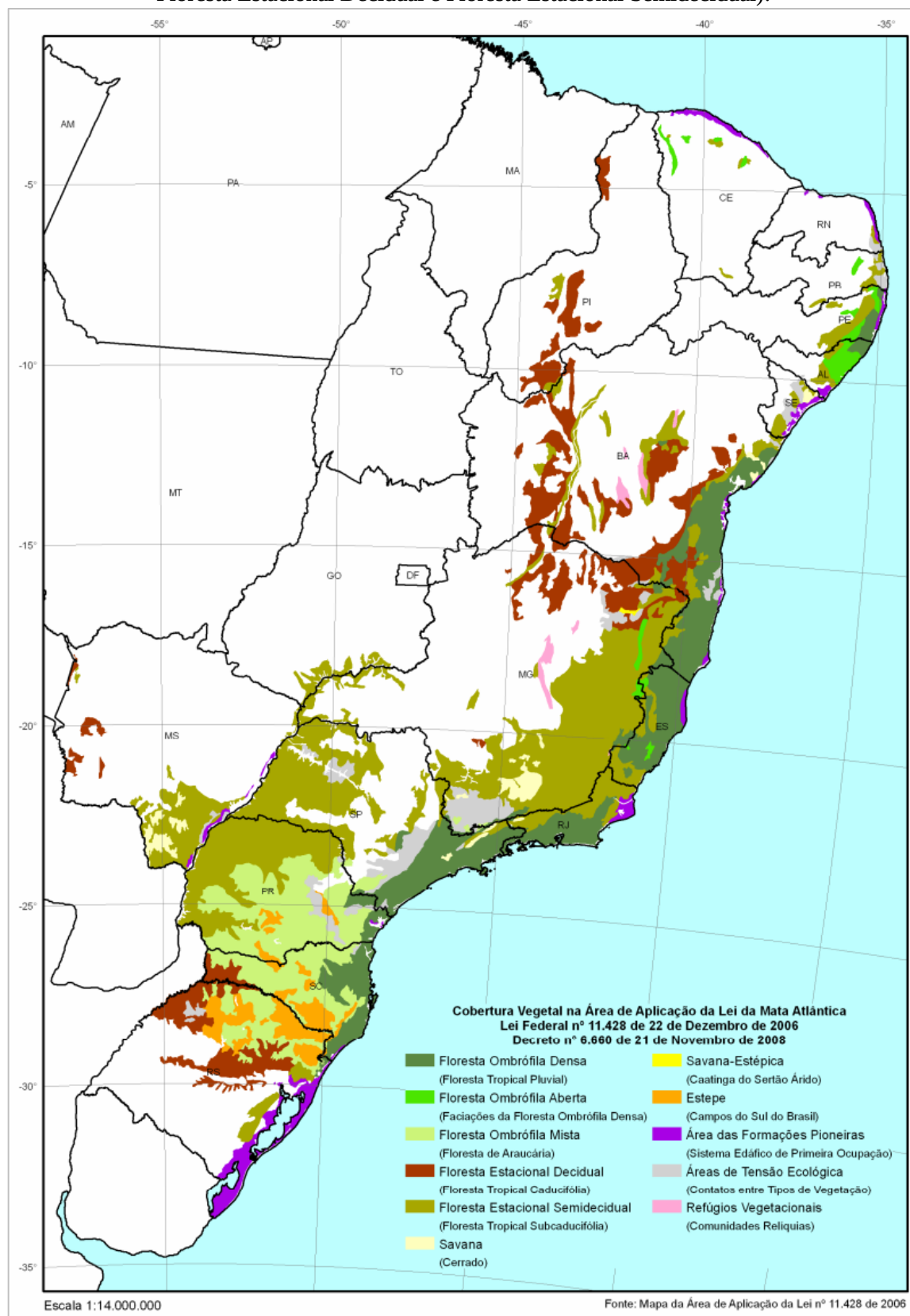
- **Floresta Estacional Decidual (Floresta Tropical Caducifólia)**

Vegetação caducifolia, onde mais de 50% da vegetação perde as folhas no período de estiagem, presente em diferentes regiões do Brasil. Está presente no interior do Estado da Bahia, norte de Minas Gerais e Rio Grande do Sul e oeste de Santa Catarina.

- **Floresta Estacional Semidecidual (Floresta Tropical Subcaducifolia)**

Vegetação também conhecida como Mata Atlântica de Interior e que possui entre 20% a 50% de vegetação caducifolia. Na zona tropical está presente nos locais onde há chuvas intensas no verão, e na zona subtropical aparece em locais onde o inverno apresenta temperaturas médias inferiores a 15 °C. É o tipo de Mata Atlântica presente no interior do Estado de São Paulo, noroeste do Paraná, leste de Minas Gerais, sul do Mato Grosso do Sul e em partes de Goiás, Bahia e Rio de Janeiro.

Figura 2 - Área de aplicação da lei 11.428/2006 que dispõe sobre a proteção e utilização das áreas de Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual).



Fonte: Fundação SOS Mata Atlântica e INPE (2014).

2.2 ESTÁDIO SUCESSIONAL DA VEGETAÇÃO

As formações florestais apresentam diferentes fases de desenvolvimento, os chamados estádios sucessionais (HORN, 1974), que são caracterizados pelo conjunto de espécies e parâmetros ecológicos estruturais de cada indivíduo pertencente a uma determinada área, sendo tais parâmetros específicos para cada tipo de formação vegetal. Cada um destes estádios exerce uma influência no ecossistema e sua compreensão auxilia na execução de planos de manejo para conservação, monitoramento, e melhor aproveitamento de recursos naturais (LU et al., 2003).

O estágio inicial da sucessão florestal ocorre quando a formação vegetal natural é degradada, devido a ações antrópicas e/ou naturais, e atinge seu ápice na fase clímax, onde a vegetação regenerada apresenta características semelhantes à original, não sendo possível muitas vezes, detectar alterações em sua composição florística (HORN, 1974).

Há diferentes denominações e quantidades de classes para os estádios sucessionais (BRASIL, 1993; MMA, 2007; IBGE 2012). Brasil (1993) trata dos parâmetros para identificação dos estádios sucessionais em áreas de Mata Atlântica e os divide em duas categorias: i) Vegetação Primária, e; ii) Vegetação Secundária. A Vegetação Primária é aquela equivalente a clímax, definida por Horn (1974), e a Vegetação Secundária pode ser dividida em outras três categorias: i) Estádio Inicial; ii) Estádio Médio, e; iii) Estádio Avançado (BRASIL, 1993).

A classificação de MMA (2007) divide os estádios de sucessão da ESEC MLP, área de Mata Atlântica de Interior ou Floresta Estacional Semidecidual, em quatro categorias: i) Vegetação Pioneira; ii) Floresta em Estádio Inicial de Regeneração; iii) Floresta em Estádio Avançado de Regeneração e; iv) Floresta Madura Alta. As principais características desses estádios são apresentadas a seguir.

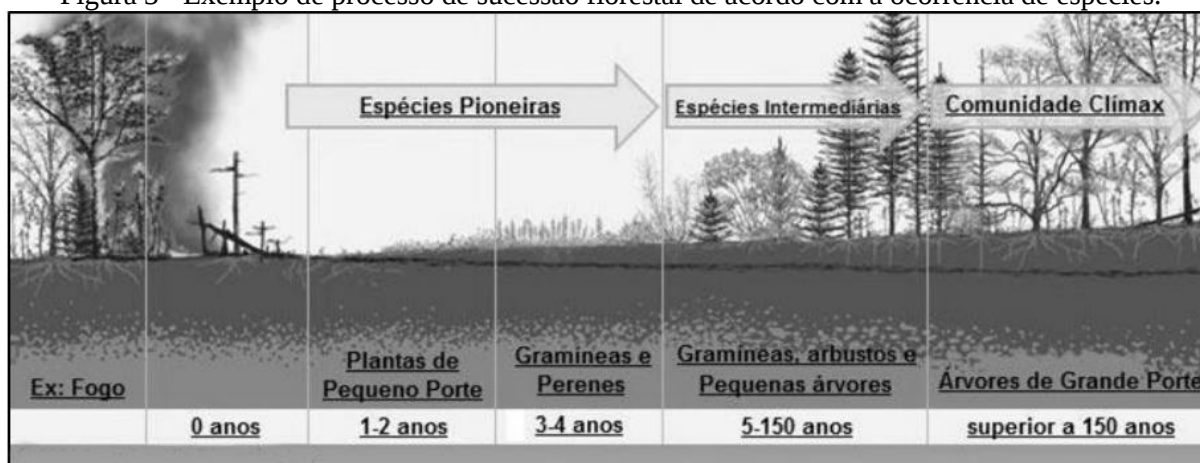
- Vegetação pioneira – é a primeira fase da Floresta Estacional Semidecidual e ocorre toda vez em que há degradação das áreas de vegetação. Nela há predominância do solo coberto com gramíneas e a ausência de árvores, sendo que as existentes possuem até 3 m de altura.
- Floresta em Estádio Inicial de Regeneração – formação vegetal que tem poucas árvores emergentes, em torno de 5 indivíduos por ha, estrato arbóreo baixo, as vezes descontínuo, e presença abundante de cipós;

- Floresta em Estádio Avançado de Regeneração – possui algumas árvores emergentes, com altura em torno de 15 m e densidade de 10 indivíduos por ha. O dossel é contínuo, ou seja, as copas se tocam, e há a presença de muitas mirtáceas e cipós;
- Floresta Madura Alta – esse tipo de formação vegetal se difere pela densidade de árvores emergentes, mais do que 20 indivíduos por ha com altura em torno de 20 m e menor quantidade de cipós.

Nota-se que todas as classificações consideram o estágio inicial da sucessão caracterizado pela presença das plantas daninhas e espécies arbóreas pioneiras, aquelas de crescimento rápido (4 a 6 anos), responsáveis por cobrir o solo rapidamente (LORENZI, 2008). São tolerantes à luz, aparecendo nas clareiras, e dão o suporte para o crescimento das espécies secundárias e clímax (SWAINE; WHITMORE, 1988; MACIEL et al., 2003; LORENZI, 2008).

No estágio mais desenvolvido da sucessão, as espécies pioneiras dão lugar às secundárias, também conhecidas como intermediárias, e clímax, que germinam à sombra das pioneiras, são tolerantes à sombra. Tais espécies possuem maior porte do que as pioneiras, são mais altas e com DAP maior (MACIEL et al., 2003). Adicionalmente, possuem maior longevidade, podendo demorar anos (mais de 30) para atingir o estágio de sucessão mais avançado (SWAINE; WHITMORE, 1988; MACIEL, 2003; LORENZI, 2008). A Figura 3 ilustra o processo da sucessão florestal.

Figura 3 - Exemplo de processo de sucessão florestal de acordo com a ocorrência de espécies.



Fonte: Piazza (2014).

2.3 GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

A REM é transportada na forma de energia radiante (Q), que é a radiação capaz de realizar trabalho, ou seja, aquela capaz alterar o estado do objeto (JENSEN, 2009; NOVO, 2010), sendo medida em Joules [J] no Sistema Internacional (SI) de medidas. Dentre as variáveis relacionadas com a energia radiante tem-se o comprimento de onda (λ), a temperatura e o tempo, que é relacionado à frequência.

Quando a energia radiante se desloca por determinada porção do espaço, ela é denominada fluxo radiante (Φ), medida em [W] no SI. Tal energia radiante incide sobre o alvo e interage com ele, podendo ser refletida, absorvida ou transmitida (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2009; NOVO, 2010). Ao ser refletida e registrada por um sensor dada uma direção específica, determinado ângulo sólido e unidade de área, tem-se a radiância (L) cuja unidade de medida no SI é [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] (JENSEN, 2009).

Ao analisar a definição e formulação da radiância (JENSEN, 2009), nota-se que a radiância está intrinsecamente relacionada às condições ambientais existentes no momento de aquisição dos dados radiométricos e com o sensor que os registra. Logo, não é possível a comparação de valores de radiância adquiridos por diferentes sensores e em épocas e condições ambientais distintas, diferente do que ocorre com a reflectância (ρ).

A reflectância é dada pela razão entre a exitância do alvo (M) e sua irradiância (E) (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006), ou pela razão entre o fluxo radiante refletido e incidente ao alvo, sendo uma medida relativa e adimensional [1]. Logo, comparando as formulações da radiância e reflectância, nota-se que a reflectância independe das condições atmosféricas no momento de aquisição das imagens e do sensor que registra as informações, fornecendo informações intrínsecas do alvo.

O fator de reflectância (R) é outra grandeza radiométrica e é calculado pela razão entre o fluxo radiante refletido pelo alvo e o fluxo radiante refletido por uma superfície de referência sob mesma geometria de visada (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006). Por não existir material refletor perfeito, Milton (1987) e McCoy (2005) introduziram um fator de correção no cálculo do fator de reflectância, dado pela razão entre a irradiância solar e a exitância da placa de referência, ou seja, pelo inverso da reflectância da placa fornecida pelo fabricante. A Equação 1 apresenta o cálculo do fator de reflectância acrescido do fator de correção.

$$R = k \frac{L_{alvo}}{L_{refer\acute{e}ncia}} = \frac{E}{M} \cdot \frac{L_{alvo}}{L_{refer\acute{e}ncia}} = \frac{1}{\rho_{refer\acute{e}ncia}} \cdot \frac{L_{alvo}}{L_{refer\acute{e}ncia}} [1] \quad (1)$$

em que,

L é a radiância [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$];

k é o fator de correção da superfície de referência [1];

E é a irradiância solar [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$];

M é a exitância [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$];

ρ é a reflectância [1]; e

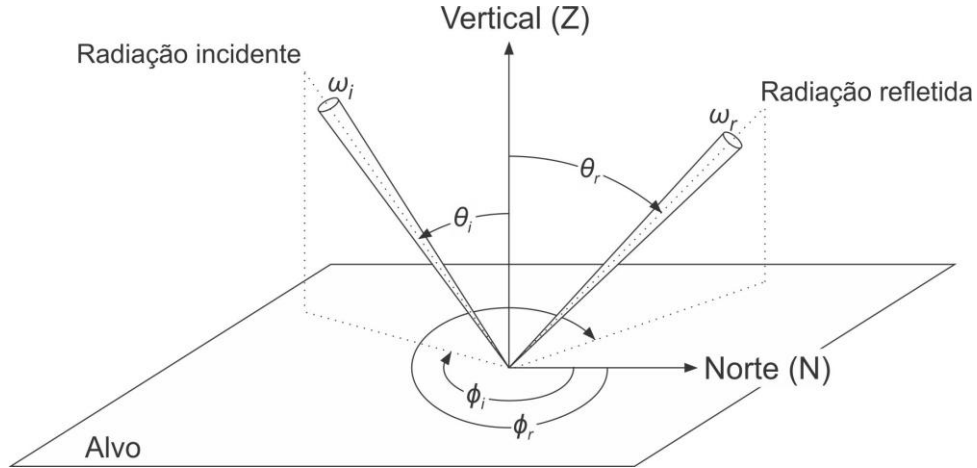
os sub-índices *alvo* e *referência* se referem ao alvo e à superfície de referência, respectivamente.

Superfície de referência é aquela 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 adotada como lambertiana é a placa *Spectralon*, confeccionada em resina termoplástica de reflexão altamente difusa (JENSEN, 2009).

Retomando a definição de Milton (1987) e McCoy (2005) sobre fator de reflectância, destaca-se a importância da geometria de aquisição dos dados radiométricos, que considera: i) a energia incidente nos alvos, por exemplo, a do Sol que se difunde e se propaga em todo o hemisfério; ii) e 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.

Para que medidas radiométricas diferentes não sejam confundidas e comparadas erroneamente, Nicodemus et al. (1977) e Schaepman-Strub et al. (2006) apresentam especificações e nomenclaturas para as diferentes formas de aquisição do fator de reflectância segundo a geometria de visada. Elas são fundamentadas na função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF – *Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Segundo Nicodemus et al. (1977) e Schaepman-Strub et al. (2006), a BRDF pode ser expressa em função dos ângulos zenital e azimutal da radiação incidente e refletida (Figura 4), conforme expresso na Equação 2.

Figura 4 - Radiação incidente e refletida segundo os ângulos zenital (θ) e azimutal (ϕ).



Fonte: Adaptada de Nicodemus et al. (1977).

$$BRDF = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot \cos\theta_i \cdot d\omega_i} [sr^{-1}] \quad (2)$$

em que,

θ é o ângulo zenital [$^\circ$];

ϕ é o ângulo azimutal [$^\circ$];

L é a radiância [$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$]

E é a irradiância [$W \cdot sr^{-1}$];

ω_i é o ângulo sólido [sr] e

os índices subscritos i e r correspondem à radiação incidente e refletida (registrada pelo sensor), respectivamente.

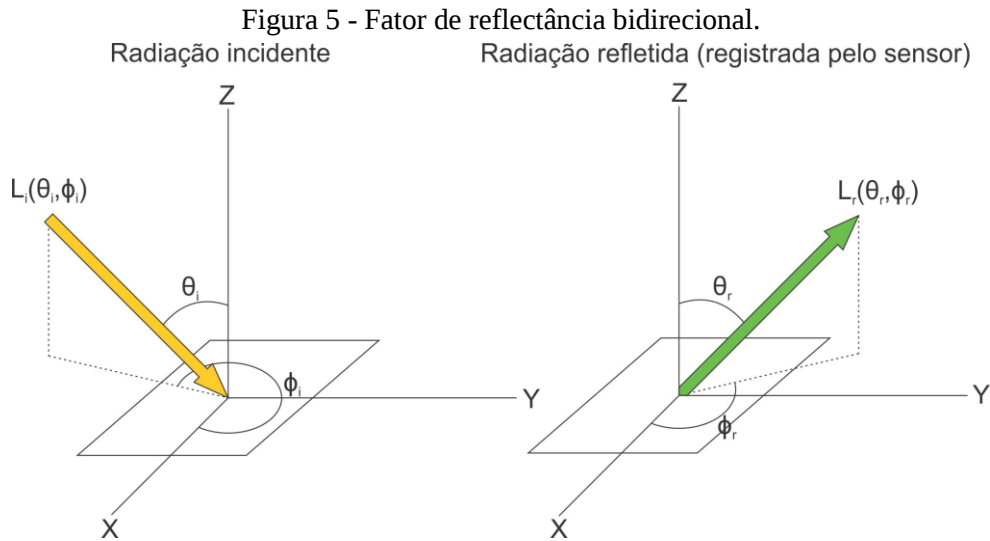
A BRDF descreve a reflectância intrínseca de alvos nas possíveis combinações angulares de geometria para determinada hora e iluminação (WALTHALL et al., 1985; LIESENBERG, 2006). Pode ser estimada pela razão de quantidades infinitesimais, não podendo ser medida de forma direta (NICODEMUS et al., 1977) surgindo então as nomenclaturas para as diferentes formas de aquisição da energia refletida.

Nas nomenclaturas propostas por Nicodemus et al. (1977) e Schaepman-Strub et al. (2006), a primeira geometria é referente à distribuição angular da radiação incidente no alvo e a segunda se refere à radiação refletida por ele e registrada pelo sensor. Quanto à radiação incidente, têm-se duas principais fontes: i) o Sol, que se encontra distante dos alvos da superfície terrestre e cuja energia se propaga por todo o hemisfério, e; ii) Lâmpadas halógenas

que produzem luz artificial e podem ser colocadas a poucos centímetros do alvo, garantindo a propagação da energia de forma cônica.

- **Fator de Reflectância Bidirecional (BRF – *Bidirectional Reflectance Factor*)**

Entre os fatores de reflectância, têm-se o BRF que considera a irradiância incidente e refletida do alvo com direções específicas (Figura 5), possuindo assim ângulo sólido infinitesimal ($\omega_i = \omega_r = 0$). Teoricamente o BRF é adquirido quando as distâncias entre fonte de energia, alvo e sensor são nulas, logo se torna uma grandeza fisicamente impossível de ser adquirida.



Fonte: Adaptada de Nicodemus et al. (1977) e Schaepman-Strub et al. (2006).

O cálculo do BRF segundo Schaepman-Strub et al. (2006) é dado pela razão entre o fluxo radiante refletido por uma superfície real de área A , e o fluxo radiante de uma superfície de referência de mesma área, ambos adquiridos sob a mesma geometria de visada, podendo também ser expressa pela BRDF do alvo e da superfície de referência. Essa relação, ilustrada na Figura 5, é expressa pela Equação 3:

$$FRB = \frac{\Phi_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{\Phi_r^{id}(\theta_i, \phi_i)} = \frac{f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{f_r^{id}(\theta_i, \phi_i)} = R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \quad [1] \quad (3)$$

em que,

Φ é o fluxo radiante [W];

f_r é a função de distribuição de reflectância bidirecional;

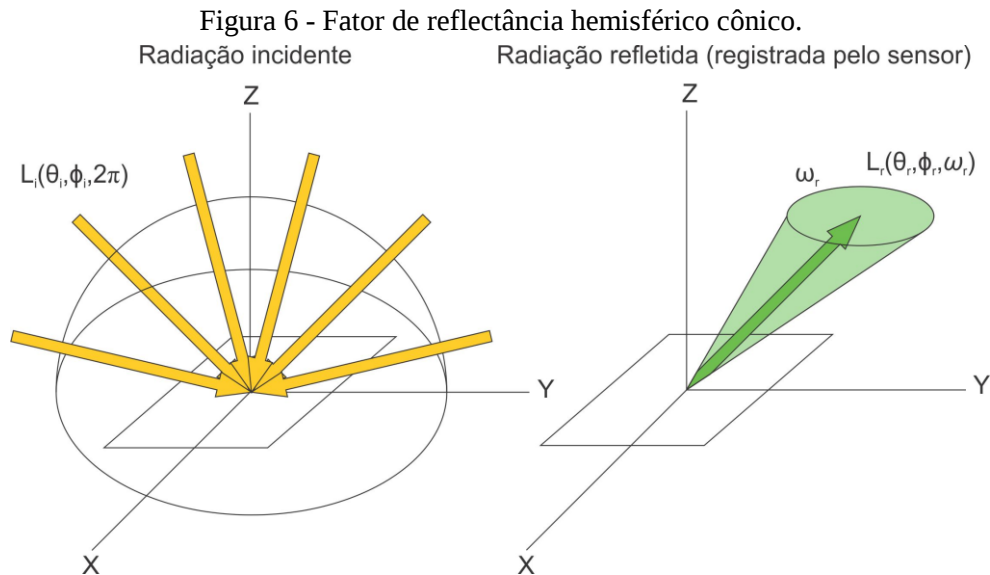
θ é o ângulo zenital [°];

ϕ é o ângulo azimutal [°];

os índices subscritos i e r correspondem à radiação incidente e refletida (registrada pelo sensor), respectivamente; e o índice subscrito id se refere à superfície de referência.

- **Fator de Reflectância Hemisférico Cônico (HCRF – Hemispherical Conical Reflectance Factor)**

O HCRF (Figura 6) é a grandeza radiométrica adquirida em campo (MILTON et al. 2009), na qual geralmente o Sol atua como fonte de iluminação e irradia energia por todo o hemisfério, atingindo o alvo também de forma hemisférica. Após incidir e interagir com o alvo, a energia é refletida e registrada pelo sensor que possui FOV delimitado, demasiadamente grande para ser considerado direcional e suficientemente pequeno para ser considerado hemisférico e, por isso, considerado cônico.



Fonte: Adaptada de Nicodemus et al. (1977) e Schaepman-Strub et al. (2006).

O cálculo do HCRF, com a correção sugerida por Milton (1987), corresponde ao produto da radiância do alvo com o fator de correção da placa de referência normalizado pela radiância da placa de referência (Equação 4),.

$$HCRF = \frac{\int_{\omega_r} \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot d\Omega_i \cdot d\Omega_r}{(\Omega_r/\pi) \cdot \int_{2\pi} L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot d\Omega_i} \cdot k(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) [1] \quad (4)$$

em que,

f_r é a função de distribuição de reflectância bidirecional;

θ é o ângulo zenital [°];

ϕ é o ângulo azimutal [°];

ω é o ângulo sólido [sr];

L é a radiância [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$];

Ω é o ângulo sólido projetado [sr];

k é o fator de correção da superfície de referência [1];

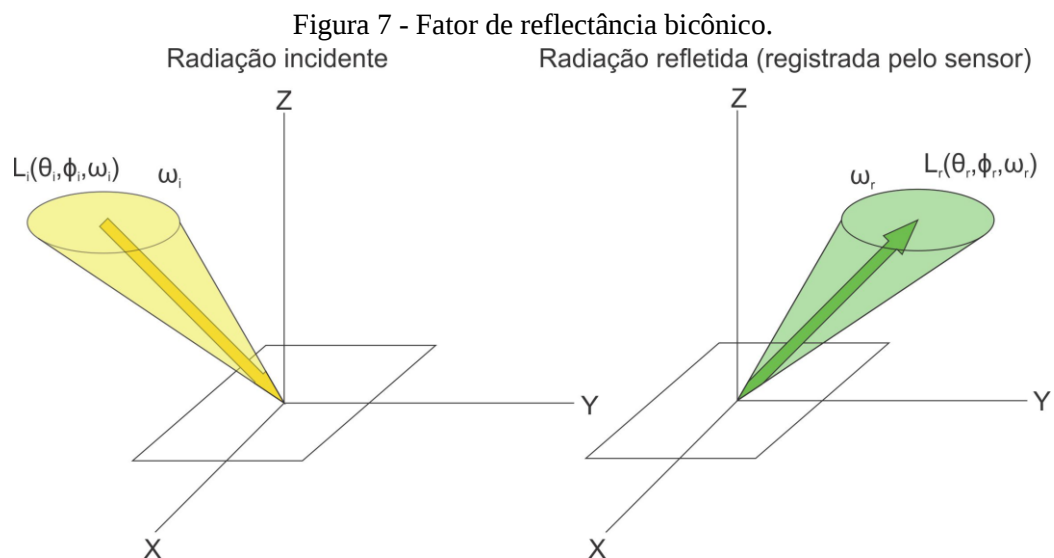
o índice subscrito id se refere à superfície de referência; e

os índices subscritos i e r correspondem à radiação incidente e refletida (registrada pelo sensor), respectivamente.

- **Fator de Reflectância Bicônico (CCRF – *Biconical Reflectance Factor*)**

Condições laboratoriais, em que a fonte de luz encontra-se próxima ao alvo garantem que a REM não se propague em todo o hemisfério, como ocorre com a REM proveniente do Sol, dando origem ao CCRF. A radiação chega de forma cônica ao alvo e o deixa de forma também cônica, sendo então registrado pelo sensor.

Desta forma, o CCRF (Figura 7) corresponde à grandeza radiométrica adquirida em condições laboratoriais, na qual o alvo é iluminado por uma fonte de luz halógena (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006). O CCRF, com o fator de correção de Milton (1987), é dado pela razão entre o produto da radiância do alvo com o fator de correção da placa, e a radiância da placa de referência, sendo ambas as radiâncias pertencentes ao ângulo sólido ω (Equação 5).



$$CCRF = \frac{\int_{\omega_r} \int_{\omega_i} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cdot L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot d\Omega_i \cdot d\Omega_r}{(\Omega_r/\pi) \cdot \int_{\omega_i} L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot d\Omega_i} \cdot k(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) [1] \quad (5)$$

em que,

f_r é a função de distribuição de reflectância bidirecional;

θ é o ângulo zenital [°];

ϕ é o ângulo azimutal [°];

ω é o ângulo sólido [sr];

L é a radiância [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$];

Ω é o ângulo sólido projetado [sr];

k é o fator de correção da superfície de referência [1];

o índice subscrito id se refere à superfície de referência; e

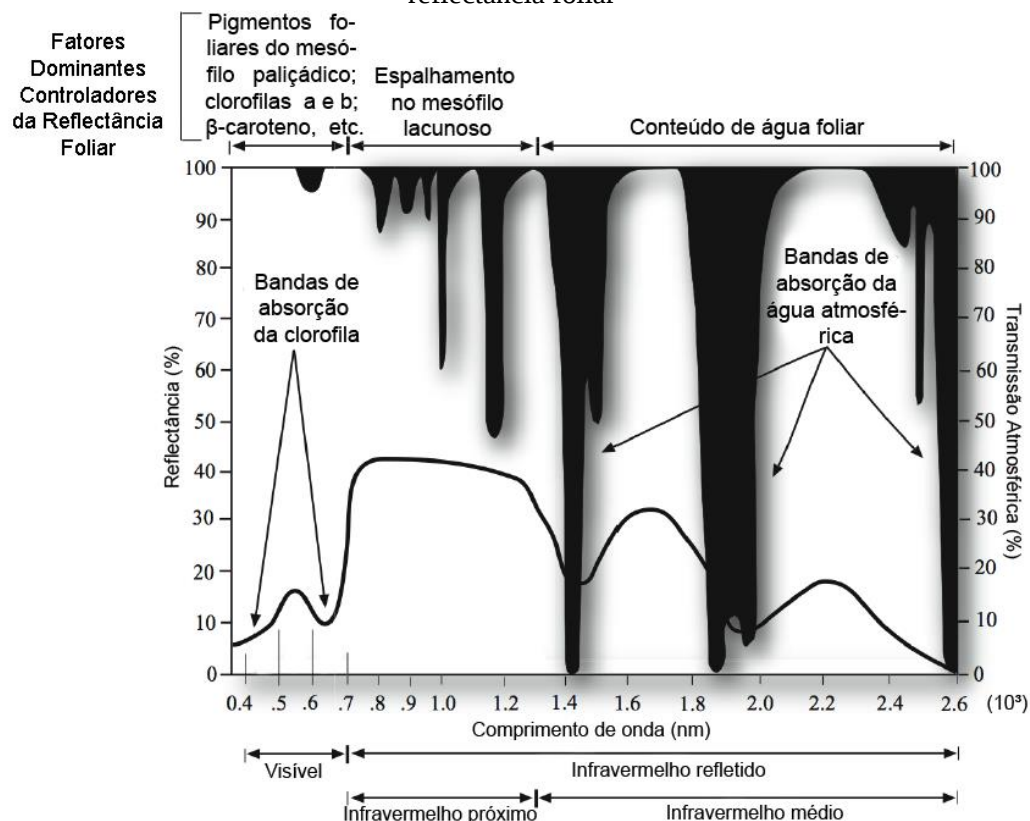
os índices subscritos i e r correspondem à radiação incidente e refletida (registrada pelo sensor), respectivamente.

2.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A VEGETAÇÃO

Após a incidência da REM na forma de energia radiante ocorre a absorção, transmissão ou reflexão da energia dependendo das características físico-químicas do alvo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2009; NOVO, 2010). Assim, para a extração de informações sobre os alvos é necessária a compreensão das relações da REM com os componentes dos alvos, neste caso, a vegetação.

A interação da REM com a vegetação ocorre principalmente nas células dos mesófilos paliçádico e lacunoso das folhas de uma planta, que são os principais influenciadores da reflectância foliar principalmente na região do visível e do infravermelho próximo (Figura 8).

Figura 8 - Resposta espectral característica da vegetação sadia e principais fatores que afetam a reflectância foliar

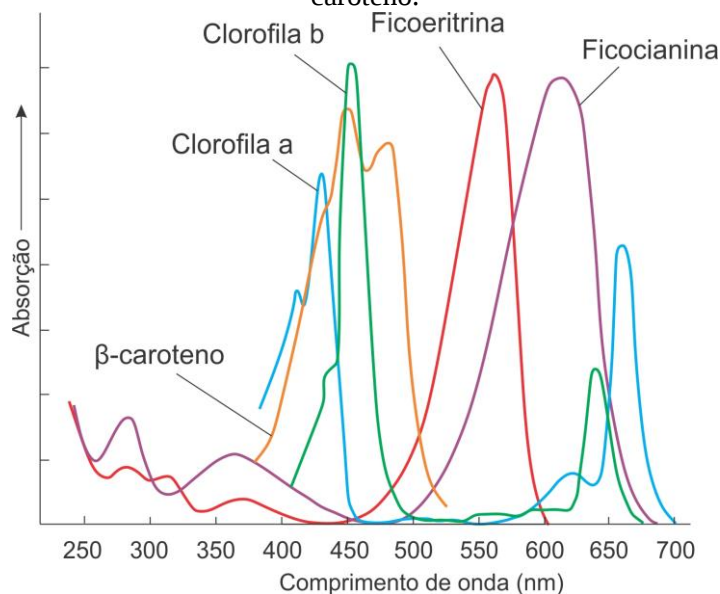


Fonte: Adaptada de Jensen (2009).

Os principais pigmentos presentes nas células do mesófilo paliádico são: i) clorofila a; ii) clorofila b; iii) carotenos; iv) xantofilas; v) ficoeritrina, e; vi) ficocianina, e estão mais relacionados com a radiometria foliar na região do visível (JENSEN, 2009). Já no mesófilo lacunoso, composto em sua maioria por células e ar, a maior parte da REM é refletida ou transmitida para que as proteínas do vegetal não sejam danificadas (JENSEN, 2009).

Quanto à resposta foliar da região do visível, nota-se que a maior resposta ocorre na região espectral da luz verde, por esse motivo, a maioria das folhas é vista a olho nu com a cor verde. Essa resposta está associada às taxas de absorção dos pigmentos de clorofila a e b na região espectral do azul e do vermelho (Figura 9), visto que a clorofila se apresenta em maior quantidade em comparação aos pigmentos ficoeritrina, ficocianina, xantofilas, entre outros.

Figura 9 - Espectros de absorção dos pigmentos clorofila a, clorofila b, ficoeritrina, ficocianina e β -caroteno.



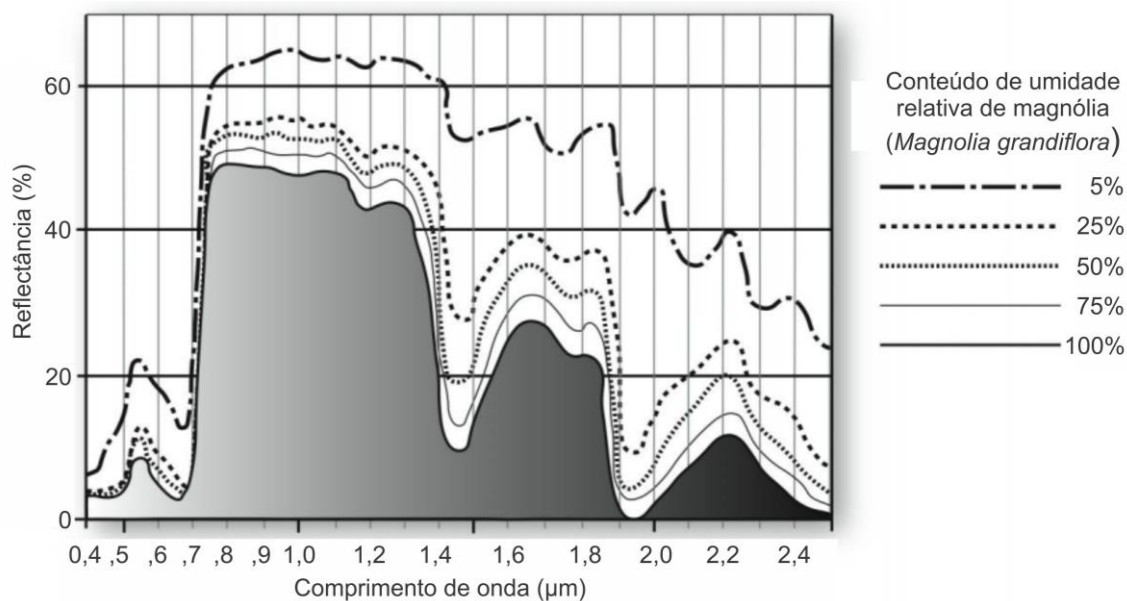
Fonte: Adaptada de < <http://www2.estrellamountain.edu/faculty/farabee/BIOBK/pigment.gif>>.

Ainda observando a Figura 9, nota-se que o β -caroteno tem maior absorção na região da luz azul, sendo o pigmento responsável pela cor amarelada das folhas, pois a cor amarela é formada pela subtração da luz azul na luz branca (ou adição das luzes vermelha e verde). A cor amarelada das folhas ocorre principalmente na fase de senescência ou no outono, quando a produção de clorofila é interrompida e sua concentração diminui (JENSEN, 2009). Já a ficoeritrina absorve a luz verde e a ficocianina absorve a luz de cores verde e vermelha, porém, se apresentam em menores quantidades em relação às clorofilas e aos carotenos.

Na região do infravermelho próximo, a reflectância das folhas é maior do que na região do visível, pois não há absorção por pigmentos e porque as células do mesófilo lacunoso das folhas são mais espaçadas, permitindo maior dissipação e reflexão de REM nesses comprimentos de onda. Segundo Jensen (2009), a reflectância das folhas nessa região do espectro eletromagnético é em torno de 40% a 60%, sendo o restante de energia absorvida ou transmitida.

Considerando a reflectância foliar na região do infravermelho médio, nota-se que ela é influenciada pelo conteúdo de água nas folhas. À medida que a folha seca, ou seja, que a umidade foliar diminui devido sua senescência, maior a reflectância foliar na região do infravermelho médio (Figura 10). Nota-se ainda que a resposta espectral em outras regiões do espectro eletromagnético também é alterada devido à senescência da folha. Na região do visível tem-se maior reflectância das folhas com menor porcentagem de umidade, pois a quantidade de pigmentos diminui e consequentemente, menor é taxa de absorção da REM.

Figura 10 - Efeitos espectrais da folha de magnólia (*Magnolia grandiflora*) causados pela diminuição de umidade na folha.



Fonte: Adaptada de Jensen (2009).

Eliminando a energia absorvida pelos pigmentos e a energia refletida pelas células do mesófilo lacunoso das folhas tem-se a energia transmitida. Ela pode atingir as camadas inferiores do dossel da vegetação, originando assim a reflectância foliar aditiva, ressaltando assim a importância da compreensão da interação da REM com o dossel da vegetação. A reflectância do dossel de vegetação difere da reflectância foliar, pois considera um conjunto de variáveis (Quadro 1).

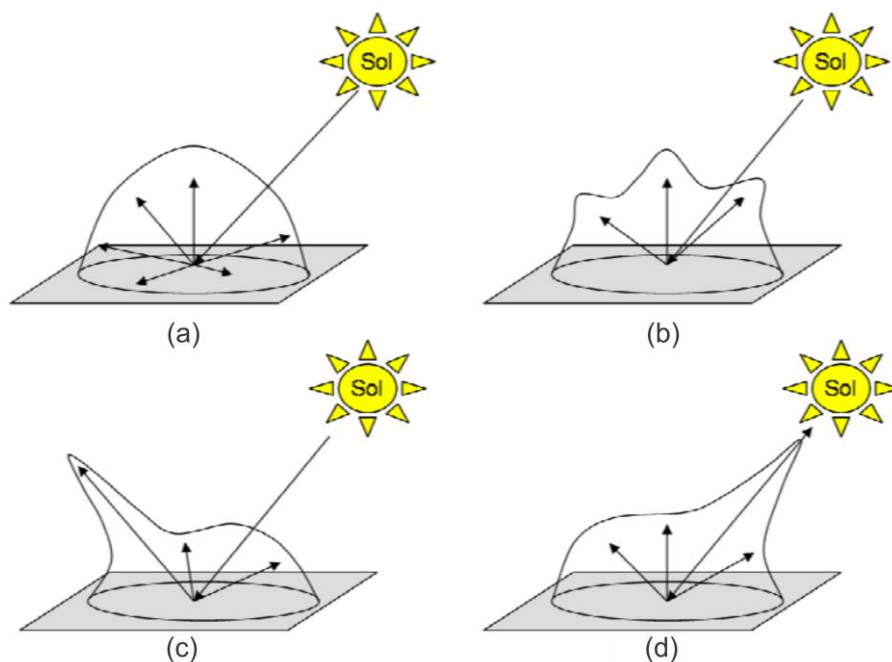
Quadro 1 - Principais variáveis que afetam a resposta espectral de dossel de vegetação.

Iluminação	Geometria - ângulo de incidência - azimuth Características espectrais (λ)
Sensor	Geometria - ângulo de visada (p.ex., 0° nadir) - azimuth da direção de visada (em relação ao Sol) Sensibilidade espectral (λ) IFOV (<i>Instantaneous Field of View</i>)
Vegetação	Dossel - tipo (plantas ou árvores) - fechamento (%) - orientação - sistemática - não-sistemática (aleatória) Copas - forma (p.ex., circular, cônica) - diâmetro (m) Troncos ou caules - densidade (unidade por m ²) - Diâmetro à Altura do Peito (DAP) Folha - Índice de Área Foliar (IAF) - Distribuição do Ângulo Foliar (DAF) (planófilas, erectófilas)
Substrato	Mesmas variáveis que as da Vegetação
Solos	Textura Cor Conteúdo de umidade

Fonte: Adaptado de Jensen (2009).

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 (ASNER et al., 1998; GALVÃO et al., 2004; LIESENBERG, 2006), sendo para algumas direções pode haver maior ou menor reflectância. A Figura 11 ilustra quatro superfícies com referências distintas de espalhamento.

Figura 11 - Direções distintas de reflectância: a) Lambertiana; b) Direcional; c) Com maior influência da reflexão Especular; d) Retroespalhamento.

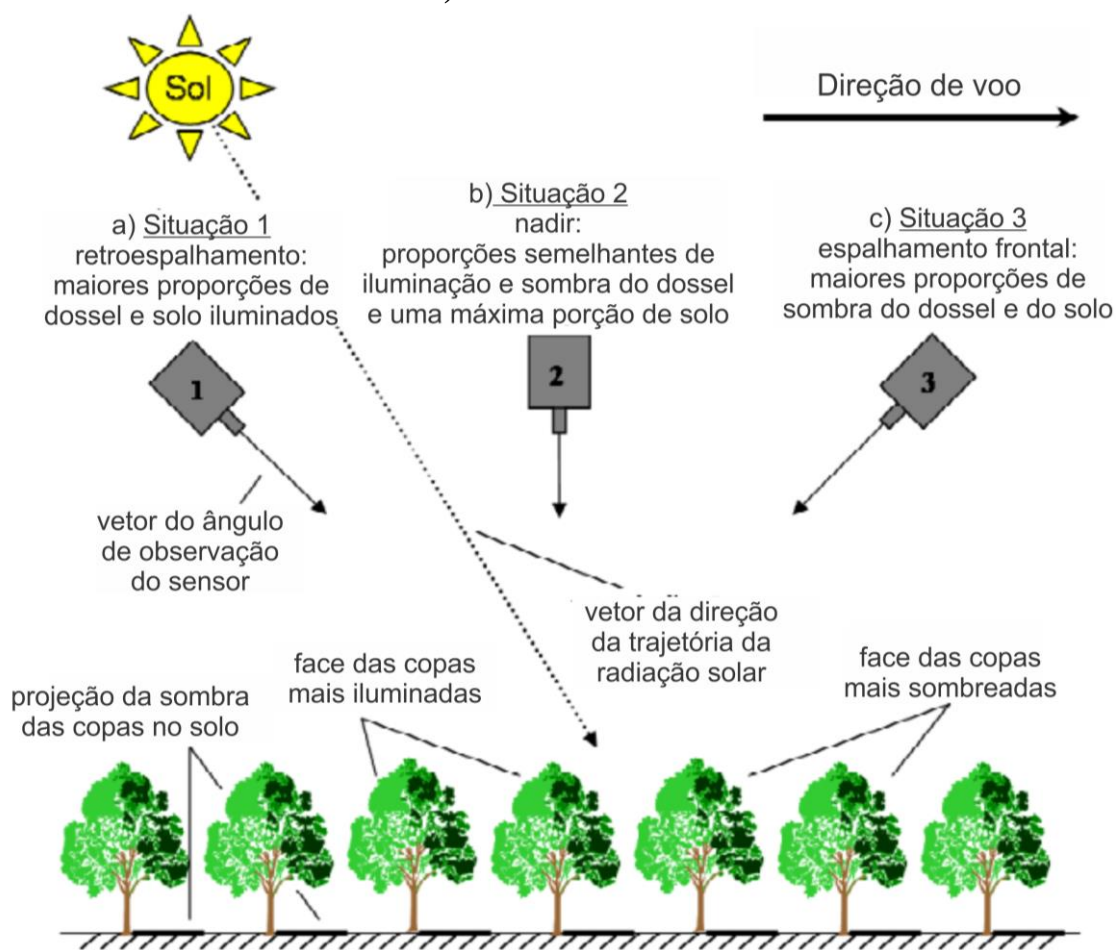


Fonte: Liesenberg (2006).

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 consideradas durante a aquisição, processamento e análise dos dados espectrais.

Galvão et al. (2004) apresentam um trabalho no qual ilustram a influência desses fatores na resposta espectral da vegetação. As diferenças na geometria de visada dos ângulos zenital e azimutal, do sol e do sensor, resultaram em diferenças no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada da região amazônica brasileira. Os autores também apontaram que as menores diferenças dos valores do índice devido ao ângulo zenital solar são para áreas onde há menos influência espectral dos solos. Tal diferença pode ser vista pela análise da Figura 12.

Figura 12 - Diferenças de registro de dados espectrais devido às posições do sensor. Sensor registrando: a) Áreas iluminadas pelo Sol; b) Mesmas proporções de áreas iluminadas e sombreadas; c) Áreas sombreadas.



Fonte: Adaptada de Liesenberg (2006).

No primeiro caso (1) nota-se que o sensor registra principalmente a parte iluminada da vegetação, ou seja, a energia retroespalhada, resultando em valores maiores de reflectância. Já na posição (2) o sensor registra as mesmas proporções de vegetação iluminada e sombreada enquanto o sensor na posição (3) registra as áreas mais sombreadas da vegetação. Logo, pode-se concluir que quanto menor o ângulo entre a fonte de iluminação e o sensor, maior o retroespalhamento registrado (1) e considerando a aquisição dos dados por sensores imageadores, tem-se que no caso (1), a vegetação será mais brilhante do que no caso (2), que consequentemente também apresentará maior brilho do que em (3).

Para correção das variações da energia registrada nas imagens, causadas pelas diferenças de geometria e instante de aquisição das imagens e anisotropia dos alvos, pode ser realizada a correção da BRDF e ajustamento radiométrico das imagens, que utilizam informações angulares do Sol e do sensor e, pontos comuns nas imagens (HONKAVAARA et al., 2013b; PROS et al., 2013)

2.5 ESPECTROSCOPIA DE CAMPO E LABORATÓRIO

Aquisições radiométricas, utilizando sensores imageadores e não imageadores, fornecem vasta quantidade de informação espectral acerca de alvos, que por sua vez constituem o objeto de estudo da espectroscopia de campo e laboratório. Os sensores mais utilizados para espectroscopia são os radiômetros e espectrorradiômetros (não imageadores), e as câmaras multiespectrais e hiperespectrais (imageadores).

A espectroscopia de campo surgiu a partir do desenvolvimento dos primeiros radiômetros, no início do século XX, utilizados para estudar a energia refletida pelos objetos. Tais radiômetros possuíam um número fixo de bandas espectrais e intervalo do espectro eletromagnético (MILTON, 1987), características que foram melhoradas com o desenvolvimento da tecnologia. Como aplicações da espectroscopia de campo é possível citar (MILTON, 1987; MCCOY, 2005):

- Calibração de sensores – dados obtidos por espectroscopia de campo podem ser utilizados para a calibração radiométrica de sensores aerotransportados e orbitais. É a chamada calibração vicária (*vicarious calibration*) onde se comparam os dados de radiância, ou reflectância, com os valores de Número Digital (ND) das bandas espectrais das imagens;
- Criação de bibliotecas espectrais – úteis para identificação de alvos desconhecidos a partir da correlação de sua resposta espectral com a resposta espectral de alvos conhecidos;
- Seleção de estações do ano – a partir da resposta espectral obtida em campo é possível verificar a utilidade da aplicação desejada. Caso o objeto de estudo seja a discriminação de alvos é necessário considerar a estação do ano, pois a quantidade de energia disponível no meio e a umidade influenciam na resposta espectral de alvos, não sendo possível a sua discriminação em determinadas épocas do ano;
- Seleção de bandas espectrais para configuração de sensores – utilizando a resposta de alvos é possível a configuração de sensores, tanto em termos de resolução espectral como em número de bandas espectrais;

- Monitoramento ambiental – as informações espectrais podem ser úteis, por exemplo, para modelagem da interação da radiação eletromagnética com o Sol para monitoramento de qualidade da água, monitoramento de áreas agrícolas, estimativa de biomassa em florestas, entre outros.

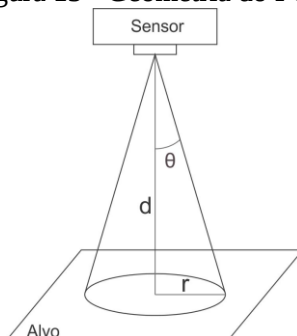
A criação de bibliotecas espectrais e seleção de bandas espectrais para configuração de sensores são exemplos de aplicações viáveis também para a espectroscopia de laboratório. McCoy (2005) evidencia como vantagens da espectroscopia de laboratório em relação à espectroscopia de campo o controle de iluminação artificial, da geometria de visada do espectrorradiômetro, a garantia da realização de medidas sob condições adversas, como em dias nublados ou a noite, e a mensuração de informação de reflectância ou transmitância em bandas de absorção.

McCoy (2005) também ressalta que é necessário tomar cuidado ao realizar medidas utilizando iluminação artificial, especialmente para alvos de vegetação, pois pode ocorrer a queima da estrutura celular do vegetal causando alterações em sua resposta espectral.

A partir das aplicações citadas anteriormente e considerando a gama de sensores existentes e as variáveis de ordem natural (iluminação do sol, estação do ano, entre outros), são listados a seguir algumas características relevantes a serem consideradas para a espectroscopia de campo e laboratório (MCCOY, 2005):

- O FOV do sensor deve ser conhecido – pois permite calcular qual a distância mínima para que o alvo seja inteiramente capturado pelo sensor. A Figura 13 ilustra a geometria do FOV e as Equações 6 e 7 apresentam o cálculo a ser realizado para que se conheça o raio e a área projetada do FOV. É importante salientar que a projeção do FOV do sensor deve abranger a área do alvo por completo.

Figura 13 - Geometria do FOV.



Fonte: Adaptada de McCoy (2005).

$$r = d \cdot \tan(\theta) \text{ [m]} \quad (6)$$

$$A_{FOV} = \pi \cdot r^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7)$$

em que,

θ é o ângulo [°] correspondente à metade do FOV;

d é a distância [m] entre o alvo e o sensor;

r é o diâmetro [m] da base do cone, de altura d [m], formado pelo FOV do sensor; e

A_{FOV} é a área projetada [m²] do FOV do sensor no alvo.

- A irradiância deve ser constante durante a realização das medidas radiométricas em campo – sabe-se que a iluminação solar varia com o tempo devido aos componentes atmosféricos e a variação da posição solar. O efeito da variação de irradiância pode ser minimizado realizando-se medidas consecutivas em curto intervalo de tempo. Outra possibilidade é a repetição das medidas dos alvos de referência para a padronização das respostas subsequentes a ela.
Recomenda-se que medidas em dias nublados sejam evitadas, pois há menor quantidade de radiação disponível e ela varia drasticamente com o tempo.
- O sensor deve ter resposta radiométrica linear – a relação entre a energia refletida pelo alvo e a registrada pelo sensor deve variar linearmente (MARKELIN et al., 2006). Geralmente essa resposta é verificada em laboratório e é de fundamental importância para garantir a qualidade das medidas realizadas. A variação de energia emitida pelo alvo deve ser equivalente à variação de energia registrada pelo sensor.
- A reflectância do alvo de referência não pode variar durante a aquisição das medidas – considerando que o alvo de referência será utilizado para cálculo de medidas radiométricas relativas e/ou preparo de equipamentos, é de suma importância que ele se encontre protegido contra partículas de sujeira.

2.6 TRATAMENTO DE DADOS ESPECTRAIS

Após a aquisição dos dados espectrais e determinação das grandezas radiométricas, ainda é possível que as mesmas contenham a presença de erros aleatórios, ruídos, devido a características do próprio sensor e do próprio ambiente, como por exemplo, variações de iluminação que não são detectadas durante a coleta dos dados. Para a minimização desses ruídos podem ser aplicados filtros que suavizam a resposta espectral do alvo analisado.

Um exemplo de filtro que suaviza os espectros de reflectância é o Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Esse filtro utiliza o método dos mínimos quadrados para calcular equações polinomiais para determinado número de pontos, sendo que para ser aplicado, as bandas espectrais devem estar igualmente espaçadas (SAVITZKY; GOLAY, 1964).

Outro filtro muito utilizado na literatura, é o filtro de média móvel (TSAI; PHILPOT, 1998) exemplificado na Figura 14. Esse filtro calcula a média da resposta espectral do alvo em determinados intervalos espectrais. Cada valor médio calculado é atribuído ao comprimento de onda central do intervalo considerado, como mostra a Equação 8.

Figura 14 - Resposta espectral original, não suavizada, e suavizada pelo filtro de média móvel.



$$\hat{s}(\lambda_j) = \frac{\sum s(\lambda_i)}{n} [1] \quad (8)$$

em que,

$\hat{s}(\lambda_j)$ é a resposta espectral [1] filtrada atribuída ao comprimento de onda j ;

$\sum s(\lambda_i)$ é a somatória das s_i respostas espectrais, sendo i o mesmo número de pontos amostrais; e

n é o número de pontos amostrais.

Além da remoção de ruídos, outras técnicas de tratamento dos espectros de reflectância podem ser utilizadas, seja para realçar as feições de absorção das curvas espectrais, como na Remoção do Contínuo (VAN DER MEER; JONG, 2001) ou realçar regiões de maior variação na curva espectral, como na Análise Derivativa (TSAI; PHILPHOT, 1998; CHO; SKIDMORE, 2006).

A Análise Derivativa destaca as maiores variações dos espectros de reflectância, e podem ser utilizadas para aplicação de índices de vegetação como a posição da borda do vermelho pelo método de Cho e Skidmore (2006) ou para análise dos componentes dos alvos, que alteram a reflectância dos alvos. O cálculo da derivada de primeira ordem, com aproximação finita, pode ser calculado pela Equação 9 (DAWSON; CURRAN, 1998; TSAI; PHILPOT, 1998).

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_i \cong \frac{s(\lambda_{i+1}) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda} [1] \quad (9)$$

em que,

$ds/d\lambda$ é a derivada de primeira ordem atribuída ao comprimento de onda i ;

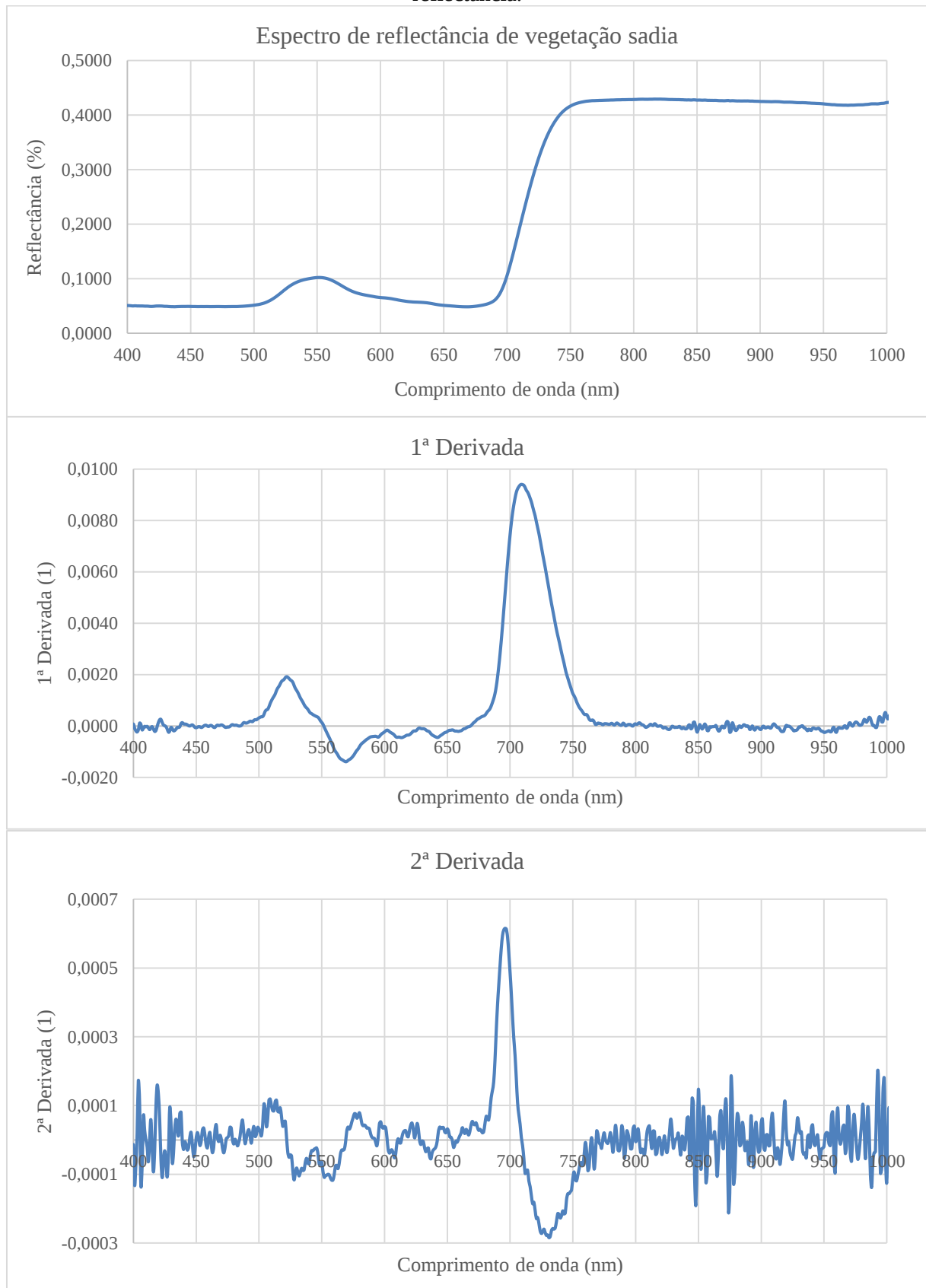
$s(\lambda_i)$ é a resposta espectral [1] atribuída ao comprimento de onda i ;

$s(\lambda_j)$ é a resposta espectral [1] atribuída ao comprimento de onda j ; e

$\Delta\lambda$ é o intervalo [1] entre os comprimentos de onda $i+1$ e j .

O cálculo da derivada de segunda ordem também pode ser calculado pela Equação 9, mas deve ser aplicado nos resultados obtidos da primeira derivada, pois objetiva destacar os pontos de inflexão da primeira derivada. A Figura 15 ilustra o espectro de reflectância de uma folha de vegetação sadia e a os resultados da primeira e segunda derivada aplicadas a espectro de reflectância.

Figura 15 - Espectro de reflectância de vegetação sadia e 1ª e 2ª derivada desse espectro de reflectância.



A simulação espectral, também conhecida como reamostragem espectral, é outra técnica de tratamento de dados espectrais e pode ser aplicada para calibração radiométrica de câmaras digitais (BEISL, 2006), para estudos meteorológicos (KIDDER; HAAR, 1995), entre outras aplicações. Essa simulação 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.

Segundo Stein, Van Der Meer e Gorte (1999), quando a sensibilidade espectral do sensor não é conhecida, ela é simulada na forma de uma função gaussiana, que segue a Distribuição Normal (Equação 10). A função de sensibilidade espectral do sensor, também conhecida como *Spectral Response Function* (SRF), tem como resultante o valor 1, correspondendo à eficiência máxima do sensor em determinada banda (STEIN; VAN DER MEER; GORTE; 1999)

$$R_i(\lambda) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5(\lambda-\mu)^2/\sigma^2} \quad (10)$$

em que,

μ é o comprimento de onda central da banda [nm];

$R_i(\lambda)$ é a sensibilidade espectral do sensor para a banda espectral centrada no comprimento de onda μ [1];

σ é a resolução da banda espectral [nm] em termos de FWHM (largura à metade do máximo, ou largura completa na metade do máximo, do inglês *Full Width at Half Maximum*); e

λ é o comprimento de onda [nm].

A SRF é utilizada em conjunto com a resposta espectral conhecida do alvo, sendo feita a convolução (Equação 11) para obtenção da resposta espectral simulada do alvo. A equação de simulação espectral pode ser vista em Kidder e Haar (1995) e Stein, Van Der Meer e Gorte (1999).

$$\rho_{res}(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} [1] \quad (11)$$

em que,

$\rho_{res}(\lambda_i)$ é a resposta espectral simulada [1] da banda espectral correspondente a banda espectral centrada no comprimento de onda λ_i [nm];

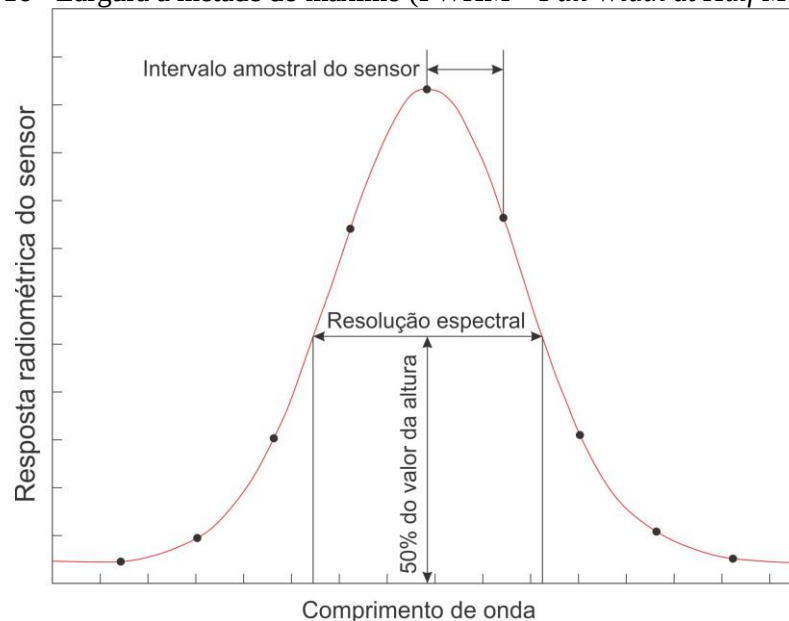
$R_i(\lambda)$ é a sensibilidade espectral [1] do sensor para a banda espectral centrada no comprimento de onda λ_i [nm];

$\rho(\lambda)$ é a resposta espectral [1] conhecida do alvo; e

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

A Figura 16 ilustra o conceito de FWHM que, segundo Borengasser, Hungante e Watkins (2007), refere-se à largura da banda espectral definida conforme a curva de sensibilidade espectral do sensor. Tal curva de sensibilidade possui formato Gaussiano e é formada conforme o intervalo amostral do sensor. A variação dos comprimentos de onda correspondentes à metade da altura do ponto máximo da curva de sensibilidade é calculada, e equivale à resolução da banda espectral em termos de FWHM.

Figura 16 - Largura à metade do máximo (FWHM – *Full Width at Half Maximum*).



Fonte: Adaptada de Borengasser, Hungante e Watkins (2007).

2.7 ANÁLISE DE DADOS ESPECTRAIS – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

A resposta espectral da vegetação considera a quantidade de pigmentos e a estrutura das células dos mesófilos paliçádico e lacunoso das folhas, sendo variável conforme o comprimento de onda ao longo do espectro eletromagnético. Para auxiliar o estudo dessas

propriedades da vegetação foram criadas relações entre bandas espectrais, dando origem aos chamados índices de vegetação.

Os principais índices de vegetação consideram as altas absorções por pigmentos na região do azul e do vermelho, e as respostas espectrais na região do infravermelho próximo. Para que sejam considerados ideais, os índices de vegetação devem atender alguns critérios como (HUETE; JUSTICE; VAN LEEUWEN, 1999; JENSEN, 2009):

- Evidenciar as diferenças entre os parâmetros biofísicos da vegetação;
- Minimizar os efeitos do ângulo de incidência solar, ângulo de visada do sensor e efeitos da atmosfera, de forma que seja possível a comparação de séries espaciais e temporais;
- **Razão Simples (RS)**

Os primeiros relatos do uso de índices de vegetação ocorreram na década de 60, com Birth e McVey (1968) e Jordan (1969), que criaram o índice chamado de razão simples (RS), que é a divisão entre as respostas espectrais do infravermelho próximo com o vermelho (Equação 12).

$$RS = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} [1] \quad (12)$$

em que,

ρ é a reflectância [1]; e

os sub-índices *NIR* e *RED* representam as bandas do infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infra-Red*) e do vermelho (*Red* em inglês), respectivamente.

As bandas escolhidas para essa razão decorrem da alta resposta espectral da vegetação no infravermelho próximo e sua baixa resposta espectral na região do vermelho devido a alta absorção pela clorofila. Sims e Gamon (2002) enfatizam que a RS utiliza a resposta espectral da banda do vermelho e não do azul, pois aquela região do espectro eletromagnético tem apenas absorção por clorofila e não por β -caroteno.

Segundo Jordan (1969) a RS pode ser utilizado para a estimativa de Índice de Área Foliar (IAF), sendo que estudos utilizando a razão simples para quantificação de clorofila na vegetação também podem ser vistos em Sims e Gamon (2002).

- **Razão Simples para Pigmentos Específicos (PSSR – *Pigment Specific Simple Ratio*)**

A partir da RS, Blackburn (1998) criou dois índices de vegetação para o estudo de concentração de clorofilas a e b, denominando-os de índices de Razão Simples para Pigmentos Específicos (PSSR – *Pigment Specific Simple Ratio*), $PSSR_a$ e $PSSR_b$, respectivamente. Esses índices de vegetação são expressos pelas Equações 13 e 14.

$$PSSR_a = \frac{\rho_{800}}{\rho_{680}} [1] \quad (13)$$

$$PSSR_b = \frac{\rho_{800}}{\rho_{635}} [1] \quad (14)$$

em que,

ρ é a reflectância [1];

os sub-índices a e b representam o índice específico para clorofila a e b, respectivamente; e

os sub-índices 800, 635 e 680 representam os comprimentos de ondas [nm] a serem utilizados para cálculo do índice de vegetação.

Como visto nas Equações 13 e 14, esses PSSRs utilizam a alta resposta da vegetação no infravermelho próximo (800 nm), e os picos de absorção de clorofilas a e b (680 nm e 635 nm), sendo que há correlação linear direta entre os índices e a concentração de clorofila na vegetação (BLACKBURN, 1998). Em geral, quanto maiores os valores dos índices, maiores as concentrações de clorofila a e b encontrados na vegetação.

- **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*)**

O índice de Vegetação por Diferença Normalizado (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), criado por Rouse et al. (1974) é um dos índices de vegetação mais conhecidos e aplicados. Derivado da RS, resulta em valores escalonados entre -1 e 1 sendo expresso pela razão da Equação 15.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} [1] \quad (15)$$

em que,

ρ é a reflectância [1]; e

os sub-índices NIR e RED representam as bandas do infravermelho próximo (*Near Infra-Red*) e do vermelho (*Red*), respectivamente.

O NDVI pode ser aplicado para monitoramento da vegetação em séries temporais de vegetação bem como para detecção de atividades sazonais e fenológicas, pois está diretamente correlacionado com a vegetação fotossinteticamente ativa, IAF e quantidade de biomassa (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; HUETE; JUSTICE; VAN LEEUWEN, 1999).

- **Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI – *Photochemical Reflectance Index*)**

Criado em 1992, o Índice de Reflectância Fotoquímica, conhecido por PRI (*Photochemical Reflectance Index*), objetiva estudar as mudanças no ciclo da xantofila na vegetação e a eficiência da luz no processo da fotossíntese, que pode não ser percebida no NDVI (GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992; SIMS; GAMON, 2002). Esse índice é calculado pela Equação 16.

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}} [1] \quad (16)$$

em que,

ρ é a reflectância [1]; e

os sub-índices 531 e 570 representam os comprimentos de onda [nm] utilizados para o cálculo do índice.

O cálculo deste índice é semelhante ao cálculo do NDVI, porém, os comprimentos de onda são diferentes, pois o PRI utiliza os comprimentos de onda localizados em torno do pico da reflectância da vegetação na região da luz verde, centrada em 550 nm (SIMS; GAMON, 2002)

- **Índice de Pigmento Insensível à Estrutura (SIPI – *Structure Insensitive Pigment Reflectance Index*)**

Peñuelas, Baret e Filella (1995) criaram o Índice de Pigmento Insensível à Estrutura (SIPI - *Structure Insensitive Pigment Reflectance Index*), Equação 17, para o estudo dos pigmentos das folhas de vegetação de forma que à estrutura do mesófilo das folhas não alterasse o resultado dos índices.

$$SIPI = \frac{\rho_{800} - \rho_{500}}{\rho_{800} - \rho_{680}} [1] \quad (17)$$

em que,

ρ é a reflectância [1]; e

os sub-índices 800, 500 e 680 representam os comprimentos de onda [nm] utilizados para o cálculo do índice.

Este índice pode ser relacionado com a quantidade de clorofila a da vegetação por usar uma banda espectral centrada em 680 nm, que é o pico de absorção da clorofila a, uma centrada em 500 nm, onde a absorção da REM pelos carotenoides é alta, e outras centradas em 800 nm, região do espectro eletromagnético que não está relacionado com a absorção da REM por esses dois pigmentos.

- **Índice de Reflectância da Senescência de Plantas (PSRI – *Plant Senescense Reflectance Index*)**

Considerando a alteração das concentrações de clorofila na vegetação, Merzlyak et al. (1999) elaboraram o Índice de Reflectância da Senescência de Plantas (*PSRI – Plant Senescense Reflectance Index*), Equação 18, sensível à razão entre carotenoides e clorofila das folhas, que é alterada durante a senescência da vegetação e também durante o seu período frutífero.

$$PSRI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{750}} [1] \quad (18)$$

em que,

ρ é a reflectância [1]; e

os sub-índices 680, 500 e 7500 representam os comprimentos de onda [nm] utilizados para o cálculo do índice.

- **Posição da Borda do Vermelho (REP – *Red Edge Position*)**

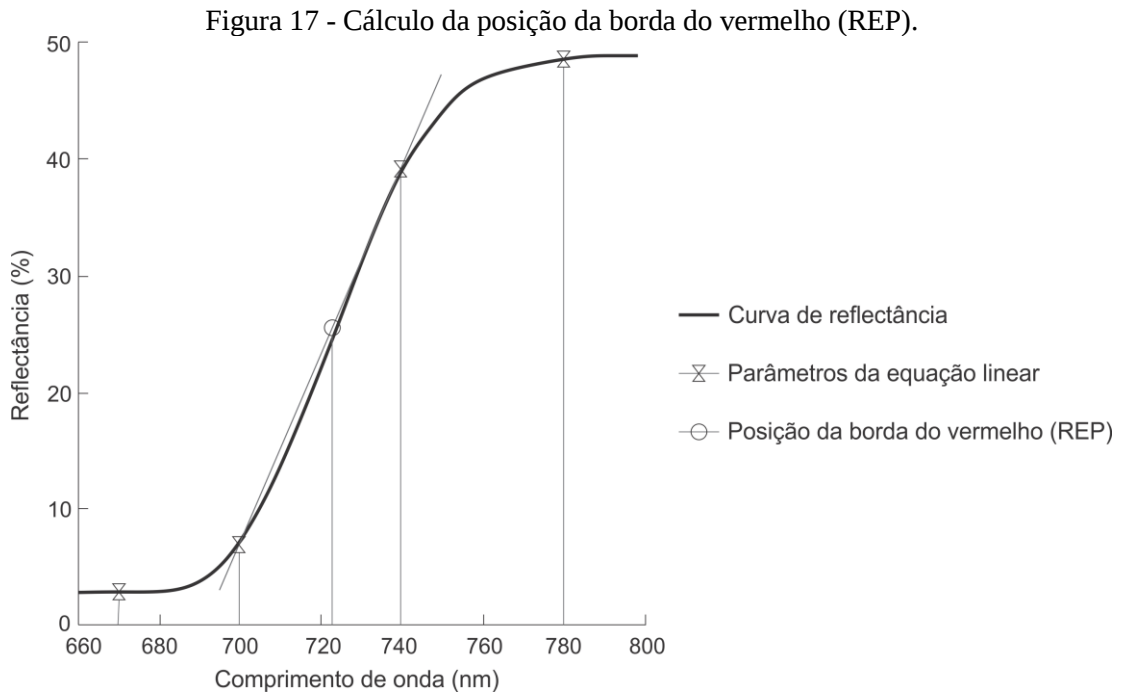
A região de transição entre o vermelho e infravermelho próximo é caracterizada pela mudança abrupta na resposta espectral da vegetação e é conhecida como borda do vermelho (RE – *Red Edge*) ou vermelho limítrofe. A borda do vermelho ocorre devido ao espalhamento da REM no infravermelho próximo, maior do que na região do vermelho, caracterizada pela absorção da REM devido a quantidade de pigmentos presentes nas folhas da vegetação.

A borda do vermelho está relacionada com o conteúdo de clorofila das folhas e ainda é sensível ao estresse na vegetação e à quantidade de nitrogênio, sendo sua posição variável (DAWSON; CURRAN, 1998; CHO; SKIDMORE, 2006; JENSEN, 2009).

Jensen (2009) descreve a posição da borda do vermelho (REP – *Red Edge Position*) como o comprimento de onda onde se tem a máxima declividade do espectro de reflectância da vegetação na região de transição entre o vermelho e o infravermelho próximo. Segundo Cho e Skidmore (2006), quanto menores os comprimentos de onda da REP, menores as quantidades de clorofila na vegetação, pois menor será a absorção por clorofila.

Há diversos métodos para cálculo da REP: i) Máximo da primeira derivada do espectro da reflectância (CURRAN; DUNGAN; GHOLZ, 1990; DAWSON; CURRAN, 1998); ii) Método de interpolação linear (GUYOT; BARET, 1988); iii) Técnica da extrapolação linear (CHO; SKIDMORE, 2006), entre outros.

O método de interpolação linear, apresentado por Guyot e Baret (1988) e também descrito por Clevers (1994), utiliza quatro bandas espectrais (Figura 17). Inicialmente é calculada uma resposta espectral média no ponto de inflexão entre a reflectância mínima (670 nm) e máxima (780 nm). Em seguida é aplicada uma interpolação linear entre 700 nm e 740 nm para estimar qual a REP. As Equações 19 e 20 expressam o cálculo da REP por esse método.



Fonte: Adaptada de Clevers (1994).

$$\rho_{rededge} = \frac{\rho_{670} + \rho_{780}}{2} [1] \quad (19)$$

$$REP = 700 + 40 \frac{\rho_{rededge} - \rho_{700}}{\rho_{740} - \rho_{700}} [nm] \quad (20)$$

em que,

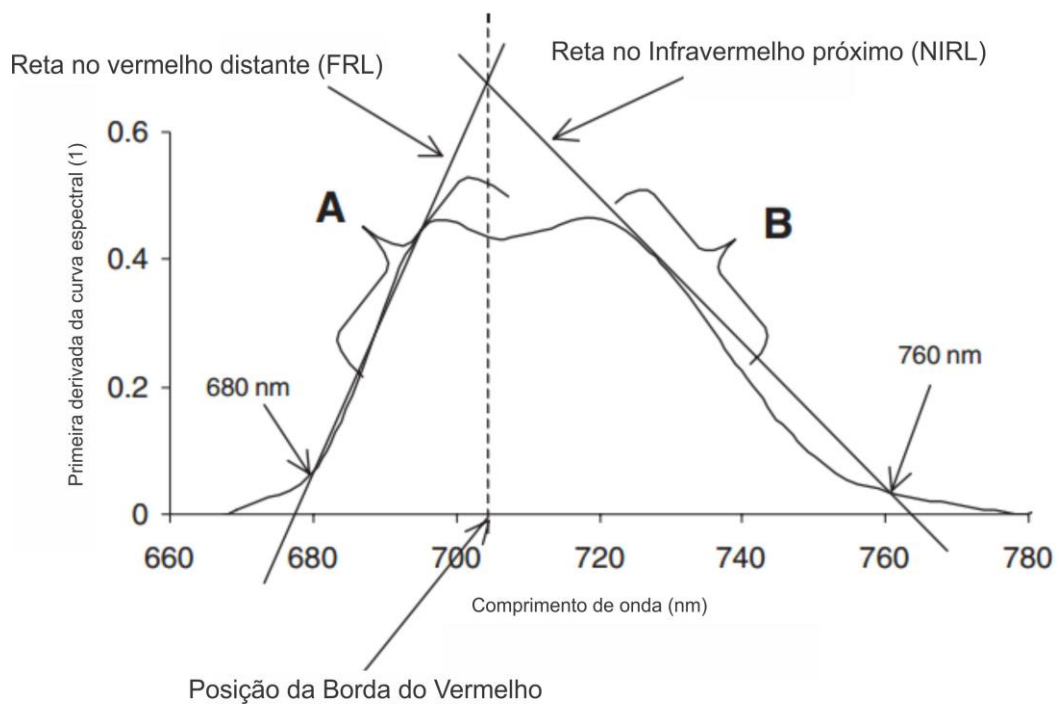
ρ é a reflectância [1];

o sub-índice *rededge* indica o valor da reflectância [1] da borda do vermelho (em inglês, *red edge*); e

os sub-índices 670, 700, 740 e 780 representam os comprimentos de ondas [nm] a serem utilizados para cálculo do índice de vegetação.

Cho e Skidmore (2006) apresentaram o método da extrapolação linear que calcula a REP no intervalo compreendido entre 680 nm e 760 nm. Esse método utiliza a intersecção de duas retas, uma no vermelho distante (FRL – *Far-Red Line*) e outra no infravermelho próximo (NIRL – *Near Infra-Red Line*), para o cálculo da REP (Figura 18).

Figura 18 - Posição da borda do vermelho pelo método de extrapolação linear.



Fonte: Adaptada de Cho e Skidmore (2006).

Inicialmente é calculada a derivada de primeira ordem (DAWSON; CURRAN, 1998) para cada curva espectral, que são suavizadas com o filtro de Savitzky e Golay (1964) de segunda ordem e tamanho 5. Em seguida é calculada a derivada de segunda ordem para obter os comprimentos de onda que são utilizados para o cálculo das retas FRL e NIRL (Equações 21 e 22). Por fim, é calculada a REP pela intersecção destas retas (Equação 23).

$$FRL = m_1\lambda + c_1 [1] \quad (21)$$

$$NIRL = m_2\lambda + c_2 [1] \quad (22)$$

$$REP = -\frac{c_1 - c_2}{m_1 - m_2} [nm] \quad (23)$$

em que,

m_1 é a inclinação da reta FRL [1];

c_1 é o ponto em que a reta FRL intercepta o eixo das ordenadas (valores da primeira derivada suavizada) [1];

m_2 é a inclinação da reta NIRL [1]; e

c_2 é o ponto em que a reta NIRL intercepta o eixo das ordenadas (valores da primeira derivada suavizada) [1];

2.8 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A Estatística Multivariada é um conjunto de técnicas e métodos estatísticos aplicados nas diversas variáveis de um conjunto de dados amostral com o objetivo de analisar e explicar os fenômenos físicos ou sociais relacionados a esses dados (MINGOTI, 2005; JOHNSON; WICHERN, 2007). Mingoti (2005) separa os métodos da Estatística Multivariada em dois grupos, o primeiro contendo técnicas exploratórias de simplificação da variabilidade dos dados, e o segundo com métodos de estimação de parâmetros, teste de hipóteses, análise de variância, covariância e regressão de dados.

O primeiro grupo da Estatística Multivariada contém técnicas que, geralmente, independem do conhecimento da distribuição de probabilidade dos dados como, por exemplo, Análise de Componentes Principais, Análise Discriminante e Análise de Agrupamento (MINGOTI, 2005). A Análise de Agrupamento, também conhecida como *Clustering*, tem como objetivo a formação de grupos, definidos a partir do grau de similaridade ou dissimilaridades entre as variáveis medidas para cada conjunto de dados (JOHNSON; WICHERN, 2007).

As medidas de similaridade ou dissimilaridade podem ser calculadas tanto para as observações como para as variáveis. No caso das observações, podem ser utilizadas medidas de distância como a distância euclidiana ou distância ponderada. Já para as variáveis, são utilizados os valores de correlação entre variáveis para o cálculo da similaridade (JOHNSON; WICHERN, 2007).

A partir das medidas de similaridade, os grupos podem ser formados utilizando técnicas hierárquicas, aglomerativas ou divisivas. As aglomerativas unem os dados

até a formação de um grupo único, o oposto das técnicas divisivas, que partem de um grupo único separando os dados em subgrupos (JOHNSON; WICHERN, 2007). Dentre as técnicas aglomerativas, tem-se o Método de Ligação Simples, que une dois grupos a partir da distância mínima de similaridade entre eles.

Essas técnicas de Análise de Agrupamento podem ser aplicadas em análise de dados espectrais, pois analisam a similaridade existente entre as variáveis as quais podem estar relacionadas com classes temáticas de interesse (HOLDEN; LEDREW, 1998)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os principais instrumentos utilizados para este trabalho foram o espectrorradiômetro portátil modelo FieldSpec® Handheld (Figura 19) e a câmara hiperespectral baseada no Interferômetro de Fabry-Perot (Figura 20), modelo 2014 (DT-0014), embarcada em VANT.

3.1.1 Espectrorradiômetro FieldSpec® Handheld

Pesando 1,2 kg, o espectrorradiômetro portátil modelo FieldSpec® Handheld é fabricado pela ASD. Seu domínio espectral está compreendido entre 325 nm e 1075 nm, com FOV de 25° e resolução radiométrica de 16 bits (ASD, 2002). Quando acoplado a acessório específico, pode ter seu FOV reduzido para 10° ou 1°, permitindo medidas de áreas mais restritas e de alvos menores. Esse aparelho pode medir radiância, reflectância e irradiância, de acordo com as configurações adotadas e os acessórios utilizados.

Figura 19 - Espectrorradiômetro acoplado de acessório para FOV de 1°.

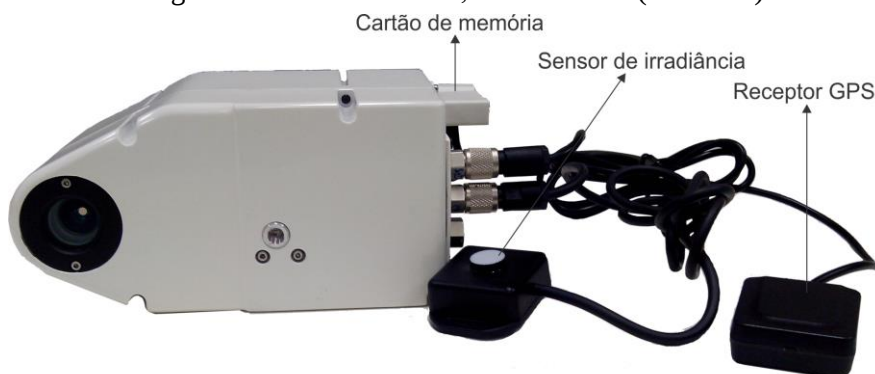


3.1.2 Câmara hiperespectral baseada em interferômetro de Fabry-Perot

Desenvolvida pelo VTT - Centro de Pesquisa Técnico finlandês em parceria com a Rikola Ltd., a câmara hiperespectral baseada em Interferômetro de Fabry-Perot (FPI – *Fabry-Perot Interferometer*) (Figura 20), ou câmara Rikola, tem como diferencial a formação da imagem em sensor de quadro, diferente da maioria dos sensores hiperespectrais existentes no mercado (SAARI et al., 2009). A câmara, modelo 2014 (DT-0014), e seus sensores auxiliares pesam menos que 700 g, possibilitando sua utilização em plataforma VANT, ainda permite configuração de bandas espectrais flexível e possibilidade de resolução espacial centimétrica.

Os sensores auxiliares da câmara são: i) um sensor de irradiância, que mede a parcela da energia irradiada pelo sol que chega à superfície terrestre, com intervalo espectral e unidade de medida desconhecida e não informada pelo fabricante, e ii) um receptor GPS (*Global Positioning System*), que fornece a posição (latitude, longitude) da câmara no instante de aquisição de cada imagem. As informações providas pelos sensores auxiliares da câmara são disponibilizadas ao usuário por meio do arquivo de metadados de cada imagem adquirida. O Quadro 2 fornece informações adicionais sobre essa câmara.

Figura 20 - Câmara Rikola, modelo 2014 (DT-0014).



Quadro 2 - Especificações da câmara Rikola, modelo 2014 (DT-0014).

Parâmetro	Especificação
FOV Horizontal	37°
FOV Vertical	37°
Domínio Espectral	500 nm a 900 nm
Resolução espectral mínima	10 nm em termos de FWHM
F-stop ³	Aproximadamente 2,8
Sensores	CMOS modelo CMV400
Dimensões da imagem	1023 pixels x 1023 pixels
	1023 pixels x 648 pixels
Tamanho do pixel no sensor	5,5 µm x 5,5 µm
Distância focal aproximada	8,7 mm
Peso (câmara acoplada de acessórios)	Aproximadamente 700 g
Dimensões da câmara	75 mm x 89,5 mm x 151,5 mm
Dimensões da câmara com o cartão de memória acoplado	75 mm x 89,5 mm x 172,5 mm

Fonte: Adaptado de Rikola Ltd. [2014a].

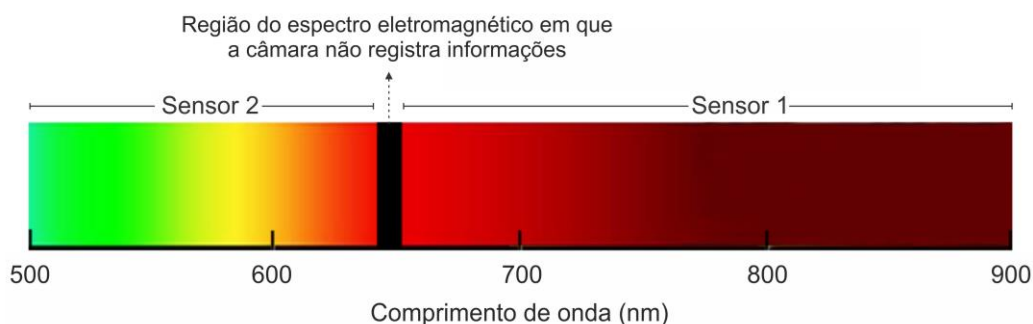
³ F-stop: razão entre a distância focal da câmara e o diâmetro de abertura do diafragma da câmara. Quanto menor o valor do F-stop, maior o diâmetro de abertura do diafragma.

A câmara pode ser operada com o uso de computador, sendo que as imagens adquiridas podem ser vistas em tempo real e salvas no próprio computador, ou no modo autônomo, em que as imagens são salvas no cartão de memória do tipo *Compact Flash*. É importante ressaltar que o modo autônomo limita o número de bandas espectrais a serem adquiridas, pois é necessário considerar o tempo de transferência das imagens formadas no sensor para o cartão de memória, aproximadamente 0,8 s para 24 bandas espectrais. Para o modelo utilizado (DT-0014) é possível a aquisição de até 25 bandas espectrais em imagens de 1023 pixels x 648 pixels.

No modo autônomo é necessária a configuração de: i) tempo de atraso, ou seja, quanto tempo a câmara irá aguardar para começar a adquirir imagens após ser ligada e colocada no modo de imageamento; ii) intervalo de aquisição entre duas imagens sequenciais, e; iii) tempo de exposição de cada imagem.

Para abranger o intervalo espectral compreendido entre 500 nm e 900 nm, a câmara dispõe de dois sensores CMOS que operam em conjunto. No primeiro sensor é registrada a energia correspondente aos comprimentos de onda a partir de 650 nm, já no segundo sensor é registrada a energia dos comprimentos de onda até 636 nm. Observa-se a existência de um intervalo radiométrico no qual a câmara não registra dados, compreendido entre 637 nm e 649 nm (Figura 21).

Figura 21 - Intervalo espectral em que a câmara registra informação, onde o Sensor 2 registra as informações entre 500 nm e 636 nm e o Sensor 1 entre 650 nm e 900 nm.



A aquisição das bandas espectrais em diferentes comprimentos de onda é possível devido à existência do FPI (item 3.1.3). Pode-se adquirir até duas bandas espectrais simultaneamente devido à existência dos dois sensores CMOS. O usuário seleciona o espaçamento entre os espelhos do interferômetro, sendo que para cada espaçamento já são pré-definidos o comprimento de onda central da banda e sua resolução espectral em termos de FWHM.

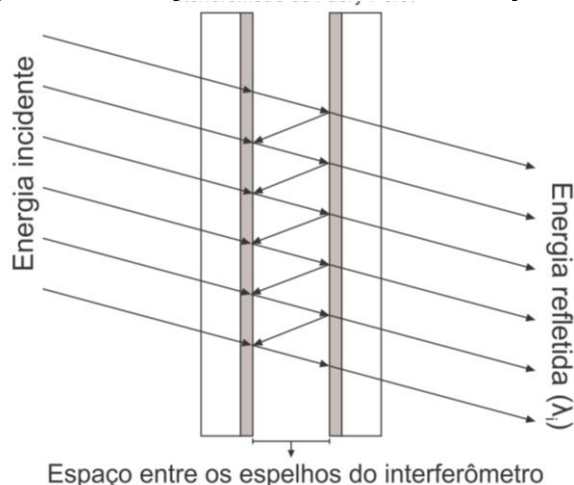
Devido ao princípio de funcionamento do FPI e à existência de dois sensores CMOS na câmara Rikola, há um deslocamento relativo entre as bandas de uma mesma imagem (HONKAVAARA et al., 2013b). Esse deslocamento é dependente da velocidade da plataforma onde a câmara é acoplada e também da escala da imagem, sendo necessária a aplicação de uma transformação geométrica para registro das bandas de uma mesma imagem. Exemplos de estudos e resultados sobre o registro de imagens para a câmara baseada em FPI podem ser vistos em Oliveira et al. (2013) e Honkavaara et al. (2013b).

Trabalhos envolvendo as aplicações e processamento das imagens adquiridas por modelos anteriores da câmara baseada em FPI podem ser vistos em Saari et al. (2009), Saari et al. (2011), Honkavaara et al. (2012), Hakala et al. (2013), Honkavaara et al. (2013a) e Honkavaara et al. (2013b).

3.1.3 Interferômetro de Fabry-Perot (FPI – *Fabry-Perot Interferometer*)

Para compreensão do processo de aquisição das diferentes bandas espectrais pela câmara Rikola é necessário compreender o FPI (Figura 22), que é composto por duas placas plano-paralelas espelhadas que difratam a luz incidente a elas.

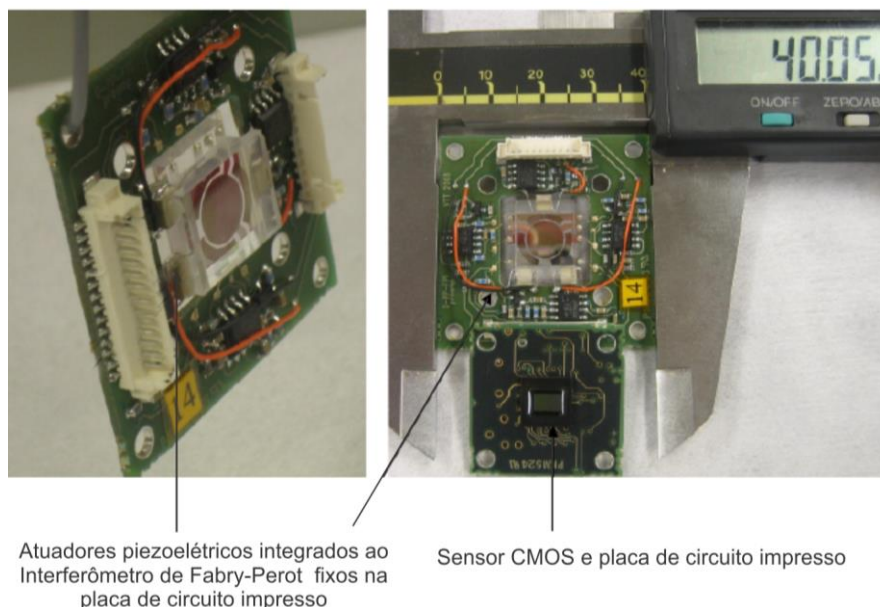
Figura 22 - Princípio do Interferômetro de Fabry-Perot.



Com o uso do interferômetro é possível a aquisição de diferentes bandas espectrais, pois o comprimento de onda refletido depende do espaçamento entre as placas plano-paralelas do interferômetro. Tal espaçamento é controlado, de forma acurada, pelo uso de atuadores piezoelétricos (Figura 23) que são acoplados às placas do interferômetro e tem como função converter sinais elétricos em deslocamento. As placas plano-paralelas e os atuadores

piezoelétricos se encontram em uma caixa hermeticamente selada para evitar influências do meio em seu funcionamento (MÄKYNEN et al., 2011).

Figura 23 - Atuadores piezoelétricos integrados ao FPI e sensor CMOS da câmara baseada em FPI, modelo 2012.



Fonte: Adaptada de Saari et al. (2009).

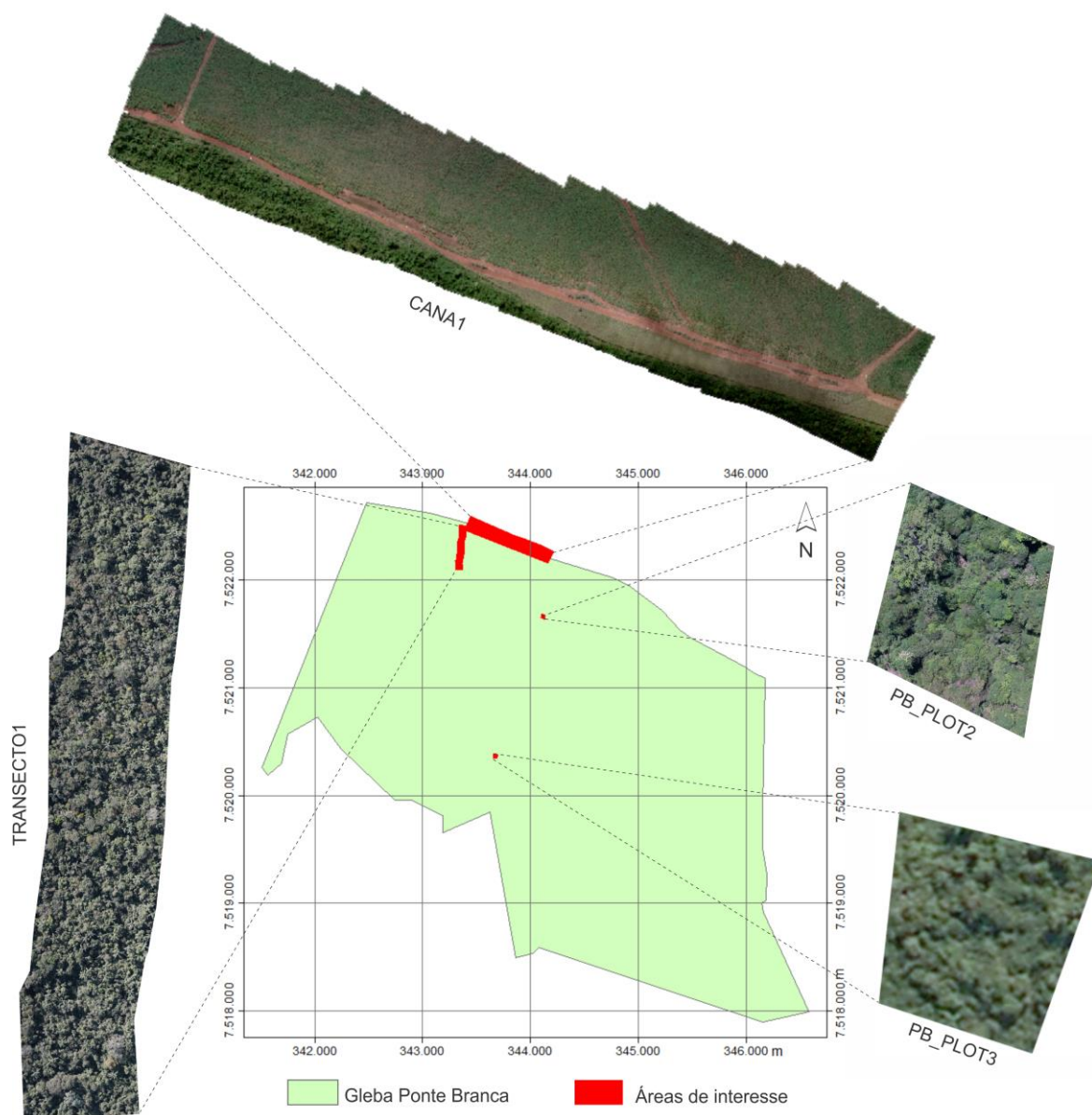
3.2 ÁREA DE ESTUDO

No Estado de São Paulo, a área coberta por Mata Atlântica era equivalente a 69% (170.713 km²) do estado quando foi criada a lei 11.428/2006. Nas duas últimas décadas, 86% desta área foi devastada, restando apenas 23.789 km² de remanescentes de Mata Atlântica (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2014). Para preservação dos remanescentes deste tipo de vegetação, especialmente Floresta Estacional Semidecidual, foram criados diversos parques e estações ecológicas como, por exemplo, a ESEC MLP, o Parque Estadual Morro do Diabo (PEMD), o Parque Estadual Porto Ferreira (PEPF), entre outros.

Na ESEC MLP há a gleba Ponte Branca, uma floresta semi-decídua com aproximadamente 1.300 há. Essa gleba está localizada na formação geológica Caiuá (Kc), composta essencialmente por arenitos finos e médios (MMA, 2007). Em relação à formação pedológica, está localizada na transição entre os argissolos vermelhos e latossolos vermelhos com a presença de relevos suaves. O clima predominante é o temperado chuvoso, com verões quentes e chuvosos (dezembro, janeiro e fevereiro) e invernos secos (junho, julho, agosto) (MMA, 2007). A maior parte desta gleba apresenta bom estado de conservação, sendo a maior parte da vegetação classificada em Floresta Madura Alta (45%) (MMA, 2007).

Para a realização do trabalho, foram utilizados dados de quatro áreas (Figura 24): i) Ponte Branca Plot 2 (PB_PLOT2); ii) Ponte Branca Plot 3 (PB_PLOT3); iii) Ponte Branca Transecto 1 (TRANSECTO1), e; iv) Cana-de-açúcar 1 (CANA1). Na PB_PLOT2 e PB_PLOT3 foram utilizadas as folhas caracterizadas espectralmente para especificação das bandas da câmara Rikola. Já na CANA1 e no TRANSECTO1 foram adquiridas imagens hiperespectrais para, respectivamente, validação da metodologia de processamento das imagens e caracterização espectral das copas de vegetação.

Figura 24 - Áreas utilizadas para realização do trabalho e pertencentes à gleba Ponte Branca da ESEC MLP.



A área da PB_PLOT2, cujas coordenadas aproximadas são 22°24'49"S e 52°30'48"O, tem aproximadamente 1.800 m². Está a 530 m de distância da borda da gleba, que é composta por cultura canavieira. Sua altitude média de terreno é 408 m. Em visita a campo

no dia 11/11/2014 foi verificado que as espécies pioneiras que formam o sub-bosque do dossel florestal são a pitanga (*Eugenia piriformis*) e maria mole (*Dilodendron bipinnatum*). A área ainda conta com a presença de árvores robustas, as chamadas emergentes que fazem parte das espécies classificadas como secundárias e clímax e que se destacam do sub-bosque florestal, como o jatobá (*Hymenaea courbaril*), a copaíba (*Copaifera langsdorffii*) e o mandioqueiro (*Didymopanax morototoni*).

Com coordenadas aproximadas 22°24'57"S e 52°31'08"O, a PB_PLOT3 está localizada a 570 m de distância da borda da gleba, com altitude média de 406 m e área aproximada de 2.020 m². Apresenta um estágio de desenvolvimento mais jovem do que a PB_PLOT2 com a predominância das espécies pioneiras pitanga e maria mole, conforme visto no trabalho de campo realizado em 19/12/2014.

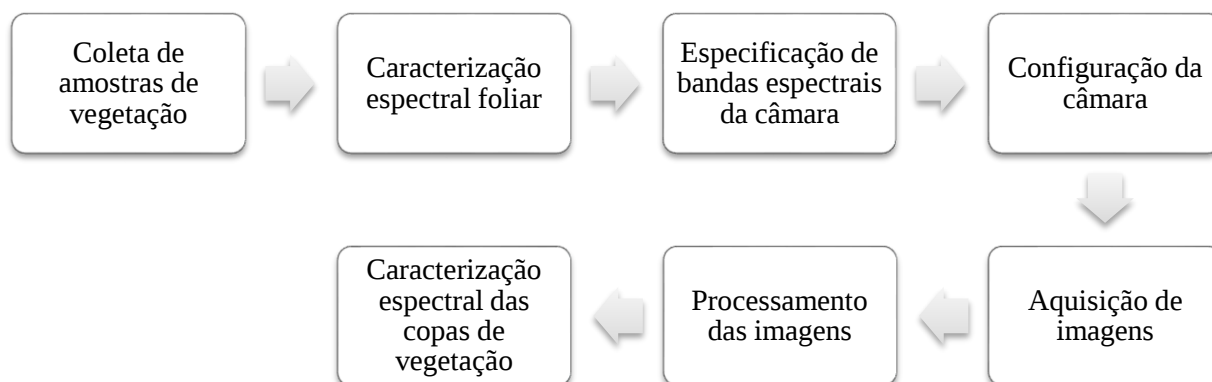
O TRANSECTO1 está localizado em aproximadamente 22°23'53"S e 52°31'19"O, sendo maior do que a PB_PLOT2 e a PB_PLOT3. Possui mais de 2.400 m² distribuídos por uma extensão de 410 m dentro da Ponte Branca. É uma área de transição que abrange a borda da gleba, com vegetação pioneira e estágio inicial de regeneração, e área de estágio sucessional mais avançado, com a presença maior de árvores secundárias e clímax como a copaíba e o jatobá.

Por fim, com altitude média de 415 m, tem-se a CANA1, localizada em aproximadamente em 22°23'52" e 52°31'02". Essa área está localizada na borda norte da gleba Ponte Branca, sendo composta pela estrada de acesso para a gleba, cana-de-açúcar e vegetação em estágio inicial de regeneração. Tal área foi escolhida para a validação da metodologia de processamento das imagens hiperespectrais por conter a estrada de acesso da gleba, onde foram posicionados os alvos utilizados para validação.

3.3 MÉTODO

A realização do trabalho envolve o desenvolvimento de várias etapas, fundamentais para o sucesso do projeto. As etapas deste trabalho são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 - Etapas a serem realizadas para realização do projeto de mestrado.



3.3.1 Coleta de amostras de vegetação

Sabendo que as folhas de vegetação iniciam o processo de senescência a partir do momento de sua colheita, Daughtry e Biehl (1984) e Souza, Ribeiro e Ponzoni (1996) apresentaram estudos que correlacionam o intervalo de tempo entre a coleta das folhas, e sua forma de armazenamento, com alterações em sua resposta espectral. Os autores verificaram que a degradação das propriedades espectrais das folhas diminui quando elas são armazenadas no escuro e em baixa temperatura.

Sendo assim, as folhas a serem caracterizadas espectralmente foram ser retiradas dos ramos das árvores, por ainda não estarem em processo de senescência. Em seguida foram acondicionadas em papel pardo ou em plástico escuro sem contato com a luz ambiente e em baixa temperatura (caixa térmica contendo gelo ou geladeira) para atenuação da senescência, como verificado por Daughtry e Biehl (1984) e Souza, Ribeiro e Ponzoni (1996).

3.3.2 Caracterização espectral foliar

Considerando as vantagens da espectroscopia e a quantidade de informações espectrais que a mesma fornece, medidas radiométricas foram realizadas para caracterização da vegetação da gleba Ponte Branca. O espectrorradiômetro utilizado para a aquisição das medidas radiométricas é o FieldSpec® Handheld da ASD (item 3.1.1).

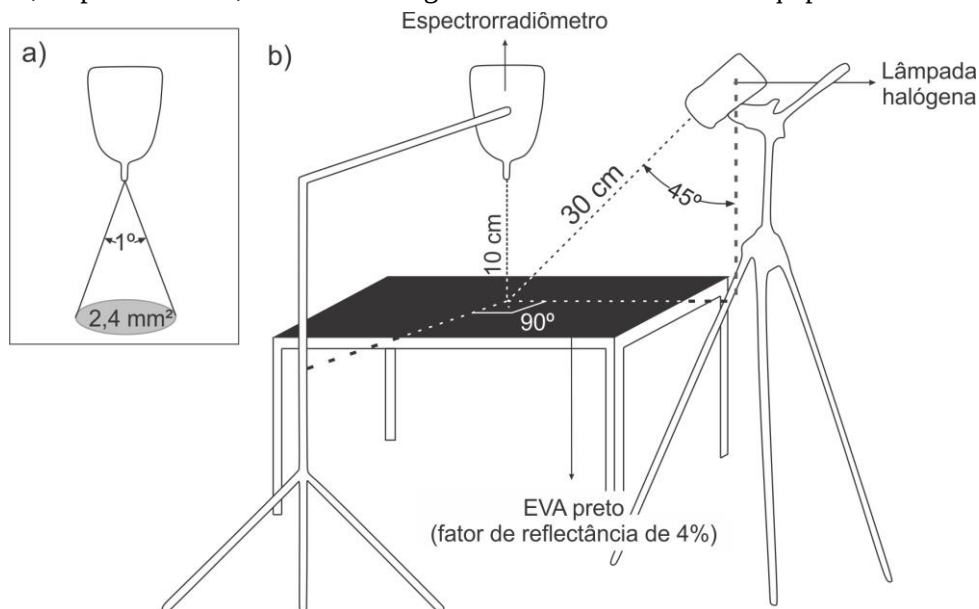
Em laboratório, ASD (2002) recomenda o uso de lâmpada de tungstênio, por não possuir picos de energia ao longo do espectro eletromagnético e fornecer energia além de 750 nm, diferente das lâmpadas fluorescentes. A lâmpada permanece inclinada em 45° (ângulo de elevação) em relação ao plano vertical do alvo e, por se tratar de vegetação, a lâmpada

permanece a uma distância aproximada de 30 cm para que a energia emitida não queime e danifique as células da vegetação alterando suas respostas radiométricas.

O espectrorradiômetro é posicionado verticalmente sobre o alvo a uma distância aproximada de 10 cm. A posição vertical do espectrorradiômetro é justificada por ASD (2002) e Milton et al. (2009) que recomendam que a posição do espectrorradiômetro geralmente é ao zênite do alvo, seguindo a mesma geometria de visada dos sensores aerotransportados, que têm uma visão nadiral do alvo.

A partir da distância de 10 cm e com FOV do espectrorradiômetro de 1° , a área de visada do equipamento é restrita para $2,4 \text{ mm}^2$, de forma a cobrir somente parte do alvo desejado. O ângulo azimutal entre a lâmpada e o espectrorradiômetro deve ser 90° (MCCOY, 2005), medido no plano horizontal do alvo, para que equipamento não registre a reflexão especular do alvo e as medidas não sejam saturadas. A Figura 26 ilustra a geometria de aquisição utilizada.

Figura 26 - Geometria de aquisição dos dados radiométricos com o espectrorradiômetro em laboratório: a) FOV de 1° projetado na superfície de medição, com área projetada de $2,4 \text{ mm}^2$; b) montagem dos equipamentos onde os ângulos zenitais do espectrorradiômetro e da lâmpada halógena são, respectivamente, 0° e 45° e o ângulo zenital entre estes dois equipamentos é 90° .



Em campo, o Sol atua como fonte de iluminação. Dessa forma, durante as medidas radiométricas deve-se movimentar o espectrorradiômetro de forma que o ângulo azimutal entre o Sol e o espectrorradiômetro seja mantido constante (90°) (MCCOY, 2005). A distância entre alvo e espectrorradiômetro também deve ser mantida constante, para tal deve-se considerar o FOV do espectrorradiômetro (1°) e a sua projeção no alvo para que não haja influência de resposta espectral de objetos adjacentes. Outro cuidado a ser tomado é em relação

a sombras, pois elas exercem influência na resposta espectral dos alvos, sendo necessária atenção para que elas não estejam sobre os alvos a serem medidos.

Após definição e montagem dos equipamentos, em campo ou em laboratório, é possível o início da aquisição das medidas radiométricas. O programa utilizado para aquisição das medidas radiométricas é o RS3, da ASD. Inicialmente define-se o tempo de integração do espectrorradiômetro para registro dos dados radiométricos do alvo, pois ele funciona de forma análoga a câmaras digitais que registram a energia refletida pelos alvos em um determinado tempo de exposição.

O tempo de integração é definido de forma automática pelo espectrorradiômetro a partir do posicionamento de uma placa de referência na área de visada do equipamento. Neste processo, o programa que registra os dados do equipamento passa a considerar a resposta da placa equivalente a de uma placa lambertiana. A definição do tempo de integração ocorre ao início de cada campanha de aquisição de medidas radiométricas ou a cada variação de luminosidade, para o caso de medidas em campo.

Para cada alvo, placa de referência e folhas de vegetação, são coletadas dez medidas de radiância, cuja finalidade é o cálculo da média aritmética do conjunto de medidas de cada alvo a fim de eliminar pequenas variações entre as medidas de radiância de um mesmo alvo. Ainda sobre os dados de radiância de cada alvo, eles são salvos no formato “*.asd” e o programa *ViewSpecPro*, da ASD, é utilizado para conversão dos dados em arquivo ASCII de formato “*.txt”.

Como a comparação da radiância de mesmo alvo adquirida em dias diferentes ou por sensores diferentes não é possível devido à sua formulação conceitual, o fator de refletância é calculado, por se tratar de uma medida relativa que normaliza as diferenças de iluminação e sensores pela razão entre a radiância de um alvo e de um alvo de referência. Sendo assim, seguindo a nomenclatura de Schaepman-Strub et al. (2006), são determinados os valores de CCRF, para as medidas de laboratório, e HCRF, para as medidas de campo.

Após a determinação dos valores de CCRF e HCRF, apesar dos cuidados tomados durante a aquisição e processamento dos dados, a presença de erros aleatórios é inevitável, pois os efeitos da ótica e eletrônica do sensor do espectrorradiômetro causam a presença de ruídos nas medidas radiométricas. Para atenuação destes erros foram aplicados filtros como por exemplo o filtro de média móvel (TSAI; PHILPOT, 1998) e o de Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964).

3.3.3 Especificação das bandas espectrais e configuração da câmara Rikola

As bandas espectrais de um sensor são determinadas de forma a atender a finalidade desejada (JENSEN, 2009). Como um dos objetivos do uso da câmara Rikola é a caracterização espectral da vegetação, a especificação de suas bandas espectrais é realizada de forma a preservar a resposta espectral da vegetação, evidenciar as diferenças entre as respostas espectrais destes alvos e ser aplicável a índices de vegetação. Ressalta-se que essa especificação ainda deve considerar as características da câmara que já possui comprimentos de onda e FWHM pré-definidos para cada espaçamento entre os espelhos do FPI.

Ainda como parte dos estudos de avaliação das bandas espectrais determinadas, é possível a aplicação de técnicas de tratamento de dados espectrais, como a simulação espectral. Essa simulação permite avaliar a aderência da resposta espectral dos alvos obtida com as bandas de uma câmara qualquer com a obtida pelo espectrorradiômetro, que tem resolução espectral mais refinada.

Com as bandas espectrais determinadas, é possível configurar a câmara com especificações num arquivo de texto que é utilizado na câmara quando operada no modo autônomo. Esse arquivo de configuração deve ser inserido no cartão de memória no formato ASCII (*TASKFILE.txt*). Além de conter as bandas espectrais a serem registradas, esse arquivo contém as informações de tempo de disparo, de exposição, número máximo de imagens a serem adquiridas (dependente do tamanho do cartão de memória) e qual será o tempo de espera da câmara para iniciar a aquisição das imagens.

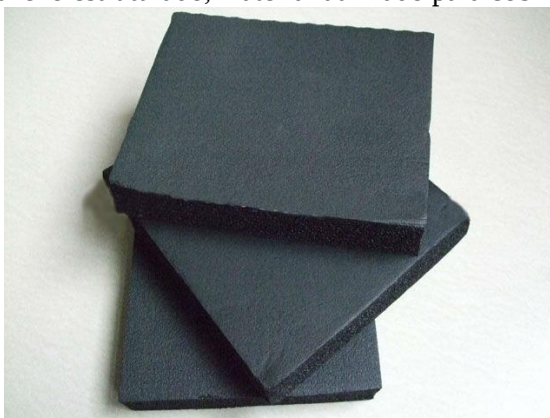
O tempo de exposição, que define a quantidade de energia que será registrada pelo sensor da câmara devido ao F-stop ser fixo, é determinado no dia da aquisição das imagens conforme as condições climáticas. Rikola Ltd. (2014b) recomenda o uso de 10 ms para dias claros, com o céu sem a presença de nuvens e entre 20 ms a 50 ms para dias nublados, sendo que tal escolha tem como finalidade evitar a saturação nos valores de brilho para objetos claros ou a omissão de informações em relação a objetos escuros durante a aquisição das imagens.

No início de cada campanha de campo, imagens foram adquiridas para correção da influência da corrente elétrica residual causada pela eletrônica do sensor, a chamada corrente escura. As imagens foram adquiridas com a lente da câmara totalmente bloqueada com objeto escuro, sem que haja a incidência de luz nas lentes.

O objeto escuro deve ter baixa reflectância ao longo do espectro eletromagnético imageado pela câmara, pois será utilizado para correção da corrente escura.

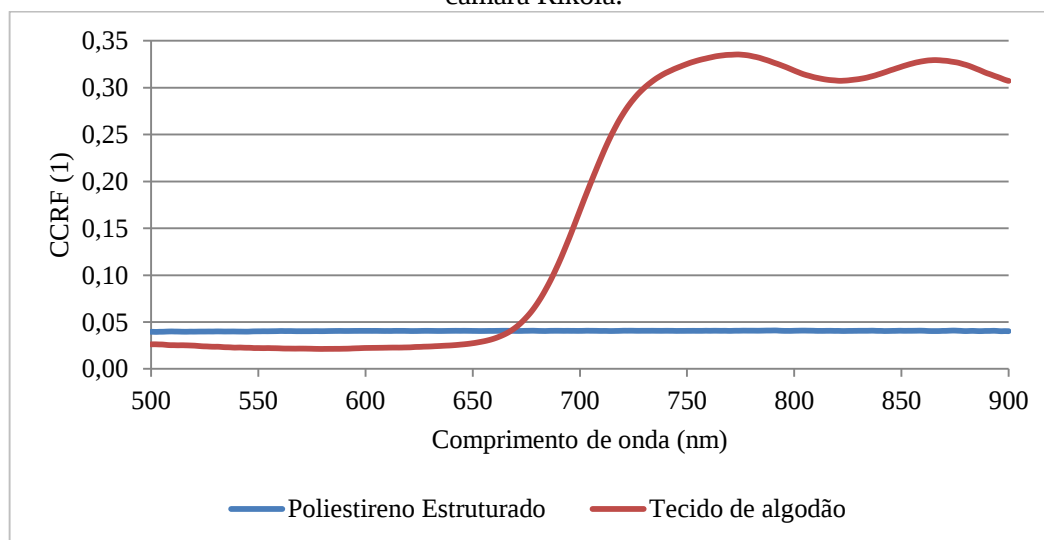
Materiais sintéticos como o poliestireno estruturado (Figura 27) são mais recomendados do que materiais compostos de material orgânico, como tecido com algodão, por não terem alta resposta espectral na região do infravermelho. A Figura 28 apresenta os espectros de CCRF, obtidos em laboratório, do poliestireno estruturado e de um tecido de algodão, evidenciando a diferença na resposta espectral dos dois materiais.

Figura 27 - Poliestireno estruturado, material utilizado para cobrir a lente da câmara.



Fonte: Adaptada de <<https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS-d2JQBSSMjUrS5HFyNP87VNnGeS1EYA6iUntfjqLl5x-dbgqHpg>>.

Figura 28 - Fator de reflectância bicônico (CCRF) de um tecido composto de algodão e do poliestireno estruturado utilizado para aquisição da imagem a ser utilizada na correção da corrente escura da câmara Rikola.



3.3.4 Aquisição das imagens

Imagens aéreas adquiridas com a câmara Rikola podem ser utilizadas para realizar a caracterização espectral, em nível de dossel, da vegetação. As imagens são adquiridas em campo com a câmara e acessórios acoplados em plataforma VANT (modelo SX8) multirrotor com 8 hélices (Figura 29). O sensor de irradiância é fixado na parte superior do VANT de forma

que não seja ocluído pelo movimento das hélices e pelos outros sensores. Ainda é acoplado ao VANT uma unidade de medida inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*) contendo um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que auxiliam a determinação da orientação e posição da plataforma, respectivamente.

Figura 29 - Sistema de aquisição das imagens multiespectrais com a câmara Rikola.



Os parâmetros de voo definidos e calculados para aquisição das imagens, para que os dados tenham qualidade suficiente para atender os objetivos do projeto, são apresentados no Quadro 3.

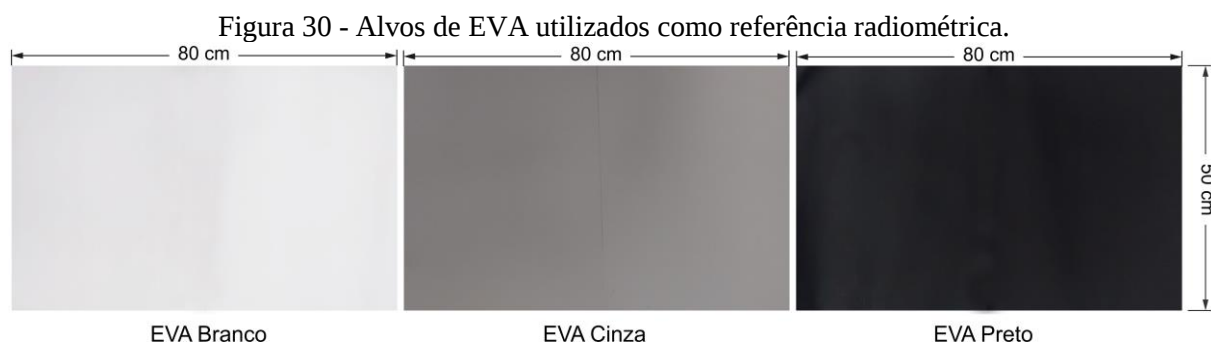
Quadro 3 - Parâmetros para aquisição das imagens.

Parâmetro	Especificação
Altura de voo	160 m
Escala da foto	1:18.400
Tamanho do pixel no terreno (GSD - <i>Ground Sample Distance</i>)	11 cm
Área imageada no terreno	~ 103 m x 65 m
Superposição longitudinal	80%
Superposição lateral	50%
Velocidade de deslocamento do VANT	3 m/s ou 4m/s*
Intervalo de disparo entre duas fotos consecutivas	4 s

*As velocidades de deslocamento de 3 m/s e 4 m/s resultam em um arrastamento inferior a 2,5 μm para tempo de exposição de 10 ms, ou inferior a 4,5 μm para tempo de exposição de 20 ms.

Antes do início da aquisição de imagens, alvos de referência radiométrica (Figura 30) foram distribuídos pela área a ser imageada para realização do processo de

calibração radiométrica, baseado no método da linha empírica. Como esse processamento requer a presença de alvos claros e escuros na imagem, foram colocados alvos de EVA (Etil Vinil Acetato) nas cores branca, cinza e preta. A dimensão dos alvos, 80 cm por 50 cm, foi maior que o GSD das imagens, aproximadamente 11 cm, para que fossem identificados nas cenas e para atenuar a influência da resposta espectral do entorno durante as medidas realizadas sobre eles com o espectrorradiômetro.



Utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec® Handheld, medidas de radiância foram adquiridas sobre os alvos de EVA para determinação dos valores de HCRF em campo. Tais valores foram utilizados para aplicação da linha empírica e validação da metodologia de processamento das imagens hiperespectrais, onde se comparou o valor de HCRF das imagens com o HCRF determinado a partir dos dados do espectrorradiômetro.

Alvos feitos de lona com dimensão de 1,50 m por 0,75 m também foram distribuídos pela área imageada. Esses alvos foram utilizados como pontos de apoio na fototriangulação. Sobre cada alvo foi instalado um receptor GNSS para cálculo das coordenadas (E,N,H), injuncionadas relativamente no processo da fototriangulação.

3.3.5 Processamento das imagens

Após a aquisição das imagens faz-se a extração dos metadados e a correção radiométrica das imagens utilizando o programa *Hyperspectral Imager*, desenvolvido pela Rikola Ltd . (RIKOLA LTD., 2014b) e adquirido juntamente com a câmara. Nessa etapa foram aplicados os coeficientes de calibração radiométrica, relativa e absoluta, do sensor, que uniformizam a resposta dos pixels e transformam os valores de ND para valores de radiância, com unidade de medida $[\text{fóton}.\text{pixel}^{-1}.\text{s}^{-1}]$. Os parâmetros de correção são disponibilizados em arquivos ASCII organizados segundo o sensor a qual os dados dizem respeito, o espaçamento do FPI e o FWHM.

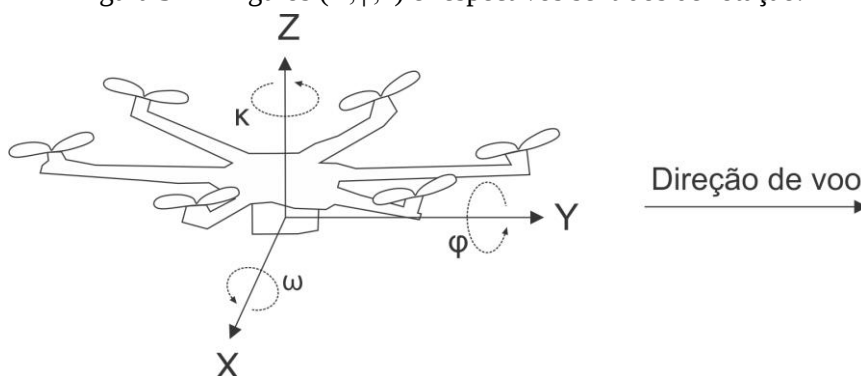
Outras correções aplicadas pelo *Hyperspectral Imager* foram a da corrente escura e a do vinhete. A primeira é realizada utilizando as imagens obtidas no início da aquisição de imagens (RIKOLA LTD., 2014b), quando a lente do sensor é obstruída com o objeto opaco de baixa reflectância. A segunda utiliza parâmetros específicos calculados pelo fabricante e disponíveis em um arquivo binário (RIKOLA LTD., 2014b).

Visto que há dois sensores na câmara e as bandas espectrais são formadas pelos diferentes espaçamentos do interferômetro, há uma diferença posicional relativa entre as bandas da imagem. Para correção desse deslocamento faz-se o registro entre as bandas de uma mesma imagem considerando uma banda como sendo de referência. O registro das bandas da imagem é feito aplicando-se uma transformação geométrica afim ou projetiva (HONKAVAARA et al., 2013b). Como alternativa, o fabricante da câmara (Rikola Ltd.) disponibiliza o aplicativo *Coregistering* que realiza o registro automático das bandas espectrais e foi o programa utilizado para o registro das imagens adquiridas neste trabalho.

Para o processamento das imagens ainda é necessário determinar os parâmetros de orientação interior (POI) da câmara, que são determinados pela calibração geométrica. Ela determina parâmetros inerentes à câmara como, por exemplo, distância focal calibrada e posição do ponto principal da câmara, e permite a reconstrução do feixe perspectivo que deu origem à imagem, sendo de suma importância para garantir a confiabilidade nos trabalhos fotogramétricos (ANDRADE, 2003).

Parâmetros de orientação exterior (POE) definem a posição (X_0, Y_0, Z_0) e atitude (ω, ϕ, κ) de cada imagem em um determinado referencial terrestre (ANDRADE, 2003). Os parâmetros foram refinados no processo de fototriangulação, que ainda é utilizado para determinar as coordenadas (X, Y, Z) de pontos no terreno a partir de observações nas imagens. Os ângulos (ω, ϕ, κ), e respectivos sentidos de rotação são ilustrados na Figura 31.

Figura 31 - Ângulos (ω, ϕ, κ) e respectivos sentidos de rotação.



Após realizados o registro e fototriangulação, ainda é necessário considerar que há variação de iluminação nas imagens adquiridas em instantes distintos, devido à presença de nuvens, posição solar e posição do sensor. O método de correção aplicado é o proposto por Honkavaara et al. (2013b) e baseia-se no ajustamento radiométrico em bloco, para cada banda espectral, com o modelo apresentado na Equação 24. Ressalta-se esse método foi aplicado utilizando o programa desenvolvido e fornecido pela Dr. Eija Honkavaara do FGI, intitulado *RadiometricBlockAdjustment-2015-07-30-sea200*.

$$ND_{jk} = a_{rel_j}(a_{abs}R_{jk}(\theta_i, \theta_r, \varphi) + b_{abs}) + b_{rel_j} [1] \quad (24)$$

em que,

ND é o número digital [1] do pixel k da imagem j ;

$R_{jk}(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ é o fator de reflectância [1] do ponto k da imagem j em função de θ_i , θ_r e φ ;

θ_i e θ_r são, respectivamente, os ângulos zenitais de iluminação (proveniente do Sol) e refletido (do sensor) em graus [°];

φ é o ângulo azimutal relativo [°], calculado pela diferença entre os ângulos azimutais refletido e incidente ($\varphi = \varphi_r - \varphi_i$);

a_{abs} e b_{abs} são os parâmetros de transformação da linha empírica [1]; e

a_{rel_j} e b_{rel_j} são os parâmetros de correção relativa [1], devido à variação de iluminação, entre a imagem de referência e a imagem j que são ajustados no modelo.

Considerando as influências causadas pelas diferenças de geometria de visada (ângulo de incidência solar e visada do sensor) e o fator de anisotropia dos alvos, aplica-se a Equação 25 para cálculo do fator de reflectância, $R_{jk}(\theta_i, \theta_r, \varphi)$, de cada ponto na imagem realizando a multiplicação do fator de reflectância medido ao nadir, $R_k(0,0,\varphi)$ com o modelo de distribuição de reflectância bidirecional de Walthall et al. (1985) (HONKAVAARA et al., 2013b).

$$R_{jk}(\theta_i, \theta_r, \varphi) = R_k(0,0,\varphi)(a'\theta_r^2 + b'\theta_r \cos \varphi + 1)[1] \quad (25)$$

em que,

$R_k(0,0,\varphi)$ é o fator de reflectância [1] do ponto k medido ao nadir, com ângulo zenital $[\circ]$ igual a zero e ângulo azimutal relativo (φ), calculado pela diferença entre os ângulos azimutais incidente e refletido $[\circ]$;

θ_r é o ângulo zenital do sensor $[\circ]$; e

a' e b' são os coeficientes [1] que modelam a BRDF para o ângulo zenital do sensor (θ_r) e para o ângulo azimutal relativo (φ) nas diferentes imagens.

Segundo Honkavaara et al. (2013b) a aplicação dos modelos radiométricos (Equações 24 e 25) é possível devido ao uso de pontos radiométricos de enlace, utilizados para obtenção do fator de reflectância medido no nadir, $R_k(0,0,\varphi)$, cálculo dos coeficientes do ajustamento radiométrico em bloco e correção relativa. Os pontos radiométricos de enlace são obtidos a partir de pontos do MDS (Modelo Digital de Superfície), da área abrangente nas imagens, com resolução espacial de 5 m.

Os parâmetros iniciais de correção relativa das imagens (a_{rel_j}) podem ser determinados de três maneiras: a) adotando valores iguais para todos os parâmetros de correção relativa para todas as imagens; b) utilizando dados obtidos pelo sensor de irradiância da câmara Rikola, acoplado no VANT, durante a aquisição das imagens; c) ou utilizando dados de irradiância coletados em campo por espectrorradiômetro. Quando utilizados os dados de irradiância, calcula-se coeficientes de correção para cada imagem, selecionando uma imagem de referência conforme apresentado na Equação 26 (HONKAVAARA et al., 2013b).

$$a_{rel_j}(\lambda) = \frac{E_{ref}(\lambda)}{E_j(\lambda)} [1] \quad (26)$$

em que,

$a_{rel_j}(\lambda)$ é o coeficiente de correção relativa inicial [1] a ser multiplicado na imagem j , que é a imagem a ser corrigida para a imagem de referência;

$E_{ref}(\lambda)$ é a medida de irradiância de referência; e

$E_j(\lambda)$ é a medida de irradiância da imagem j .

Utilizando o espectrorradiômetro em campo, verifica-se qual a menor diferença entre o horário de aquisição de cada medida radiométrica com o de aquisição das imagens para correlação dos dados. Em seguida é calculada a média aritmética das irradiâncias de cada banda utilizando a equação de reamostragem (ou simulação) espectral anteriormente

apresentada (Equação 11), pois há diferenças de FWHM e posição para cada banda espectral. Em seguida é aplicada a Equação 26 para obtenção dos coeficientes de correção relativa.

Quando não é acoplado o coletor cosseno ao espectrorradiômetro são realizadas medidas de radiância em uma placa de referência, aplicando a Equação 27 (REES, 2001), para estimativa da irradiância. Já para os dados obtidos pelo sensor da câmara Rikola, tem-se apenas um valor de irradiância para cada imagem tornando possível a aplicação direta da Equação 26.

$$E = \pi L [W.sr^{-1}] \quad (27)$$

em que,

L é a radiância [$W.m^{-2}.sr^{-1}$] da superfície de referência.

O método da linha empírica (SMITH; MILTON, 1999), utiliza valores constantes de ganho e *offset* (a_{abs} e b_{abs}) calculados e aplicados para cada banda da imagem, visando a obtenção de uma grandeza radiométrica comparável com a obtida por outros sensores e em outras datas de aquisição, visto que a radiância registrada pela câmara possui [$fóton.pixel^{-1}.s^{-1}$] como unidade de medida.

A linha empírica relaciona a resposta de alvos na imagem e seus respectivos valores de HCRF calculados a partir dos dados coletados em campo, durante a aquisição das imagens, por meio de uma função linear (Figura 32). A partir desta relação são calculados os parâmetros de ganho (a_{abs}) e *offset* (b_{abs}) para correção da imagem e obtenção dos valores de HCRF na imagem.

Figura 32 - Predição da equação de transformação dos valores da imagem para valores de HCRF a partir de dois alvos de referência utilizando o método da linha empírica.



Fonte: Adaptada de Smith e Milton (1999).

3.3.5.1 Validação do processamento das imagens

Para avaliar o processamento radiométrico das imagens, alvos de EVA nas cores branca, preta e cinza foram distribuídos na área imageada. Em campo foram adquiridas medidas de radiância para determinação do HCRF de cada alvo. Como o espectrorradiômetro possui maior resolução espectral que a câmara, aplicou-se a simulação espectral para cálculo do valor de HCRF de cada banda espectral considerando os comprimentos de onda e FWHM das bandas espectrais configuradas na câmara.

Medidas de discrepância para cada alvo foram calculadas entre os valores de campo e os valores do mosaico de imagens. Adicionalmente, foram calculadas a média, o desvio padrão e a Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrado (RMSE – *Root Mean Square Error*) das discrepâncias para cada alvo utilizando as Equações 28, 29 e 30.

$$\overline{\Delta HCRF_j} = \frac{\sum \Delta HCRF_j}{n} [1] \quad (28)$$

em que,

$\overline{\Delta HCRF_j}$ é a média das discrepâncias dos valores de HCRF das bandas espectrais do alvo j ;

$\sum \Delta HCRF_j$ é a somatória das discrepâncias dos valores de HCRF do alvo j ; e

n é o número de bandas espectrais.

$$\sigma_{\overline{\Delta HCRF_j}} = \frac{\sum (\Delta HCRF_{ij} - \overline{\Delta HCRF_j})^2}{n - 1} [1] \quad (29)$$

em que,

$\sigma_{\overline{\Delta HCRF_j}}$ é o desvio padrão amostral das discrepâncias dos valores de HCRF do alvo j ;

$\sum (\Delta HCRF_{ij} - \overline{\Delta HCRF_j})^2$ é a somatória do quadrado da diferença entre as discrepâncias dos valores de HCRF do alvo j na banda espectral i ($\Delta HCRF_{ij}$) com a média das discrepâncias do alvo j ($\overline{\Delta HCRF_j}$); e

n é o número de bandas espectrais.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (HCRF_{obs} - HCRF_{ref})^2}{n}} \cdot \frac{100 \cdot n}{\sum HCRF_{ref}} [\%] \quad (30)$$

em que,

$RMSE$ é a raiz quadrada do erro médio quadrático [%];

$\sum (HCRF_{obs} - HCRF_{ref})^2$ é a somatória do quadrado da diferença entre as discrepâncias dos valores de HCRF observados ($HCRF_{obs}$) com o HCRF de referência ($HCRF_{ref}$);

n é o número de bandas espectrais; e

$\sum HCRF_{ref}$ é a somatória dos valores de HCRF de referência.

Por fim, aplicou-se o teste de hipótese t-Student com hipótese básica (H_0) que a média das discrepâncias é igual a zero contra a hipótese alternativa (H_a) que a média das discrepâncias é diferente de zero (WOLF; GHILANI, 1997). As hipóteses são apresentadas a seguir, sendo que o teste estatístico a ser calculado é apresentado na Equação 31.

$$H_0: \overline{\Delta HCRF} = 0, \text{ contra}$$

$$H_a: \overline{\Delta HCRF} \neq 0$$

$$t_{estatístico} = \frac{\overline{\Delta HCRF}}{\sigma_{\Delta HCRF} / \sqrt{n}} [1] \quad (31)$$

em que,

$\overline{\Delta HCRF}$ é a média das discrepâncias dos valores de HCRF;

$\sigma_{\Delta HCRF}$ é o desvio padrão das discrepâncias dos valores de HCRF; e

n é o número de bandas espectrais.

A hipótese nula é rejeitada se o módulo do teste estatístico for maior do que o valor teórico tabelado $t_{(n-1, \alpha/2)}$, em que n é o número de alvos e α é o nível de significância. Ou seja, caso a hipótese nula seja rejeitada, a média das discrepâncias não pode ser considerada nula (WOLF; GHILANI, 1997).

3.3.6 Caracterização espectral das copas de vegetação

Para realizar a caracterização espectral das copas de vegetação, foram escolhidas espécies consideradas como sendo das classes clímax e secundárias, pois caracterizam melhor o estágio de desenvolvimento sucessional da vegetação, sendo importantes para o monitoramento da vegetação. Além das espécies secundárias e clímax, também há a possibilidade da aquisição da resposta espectral de espécies identificáveis na imagem e reconhecidas em campo.

As espécies foram identificadas em campo e localizadas no mosaico de imagens. Os polígonos de cada copa de árvore foram delimitados de forma manual, e a resposta espectral de cada um foi calculada por meio da média aritmética dos valores de HCRF, para cada banda espectral e pixel que compõe o polígono. Na existência de mais de duas copas da mesma espécie, calculou-se a média aritmética da resposta espectral de cada um e aplicou-se a propagação de erros para cálculo de sua precisão.

O cálculo da propagação de erros considera que uma quantidade qualquer pode ser expressa em função de medidas variáveis (Equação 32), e sua variância-covariância pode ser calculada pela propagação da variância-covariância das variáveis da função, como expressam as Equações 33, 34 e 35 (GEMAEL, 1994).

$$Y = f(X) \quad (32)$$

$$\Sigma_Y = D \cdot \Sigma_X \cdot D^T \quad (33)$$

$$D = \frac{\partial f}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y_m}{\partial x_1} & \frac{\partial y_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\Sigma_X = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1 x_2} & \dots & \sigma_{x_1 x_n} \\ \sigma_{x_1 x_2} & \sigma_{x_2}^2 & \dots & \sigma_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{x_1 x_n} & \sigma_{x_2 x_n} & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

em que,

Y é o vetor das quantidades calculadas em função das observações X ;

X é o vetor das observações;

Σ_Y é a matriz de variância-covariância de Y ;

D é matriz de derivadas parciais das quantidades y em relação às observações x ; e

Σ_X é a matriz de variância-covariância das observações de X , onde σ^2 representa a variância e $\sigma_{x_1x_2}$ representa a covariância.

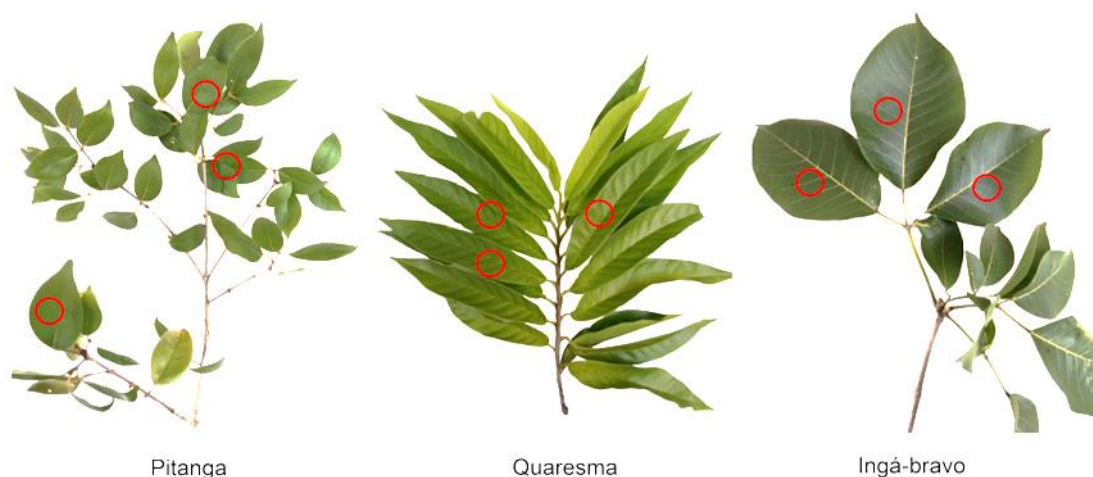
4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ARMAZENAMENTO E SENESCÊNCIA DA VEGETAÇÃO

Sabendo que a área de estudo está localizada a mais de 150 km de distância da FCT/UNESP, em Presidente Prudente - SP, local onde são realizadas as medidas radiométricas de laboratório, foi avaliada a relação entre o tempo de armazenamento de folhas de vegetação e o grau de senescência dessas amostras de folhas. Essa avaliação foi realizada para assegurar que a resposta espectral das folhas medidas em laboratório fosse equivalente à adquirida logo após a coleta das folhas.

Folhas de três espécies de vegetação presentes no campus da FCT/UNESP foram coletadas do terço superior das árvores. As folhas foram armazenadas em saco plástico opaco para evitar o contato com a luz ambiente e em caixa térmica contendo pequena quantidade de gelo para manutenção da temperatura. As espécies de folhas coletadas foram pitanga (*Eugenia uniflora*), quaresma (*Annona cacans*) e ingá-bravo (*Lonchocarpus cultratus*), por possuírem diferentes tamanhos e estrutura foliar (Figura 33).

Figura 33 - Folhas utilizadas para avaliação do tempo de armazenamento e senescência, e os locais aproximados das medidas radiométricas.



Para cada espécie de vegetação foi feito um conjunto de 30 medidas radiométricas distribuídas em 3 diferentes locais. No caso da pitanga e da quaresma as medidas ocorreram no conjunto de folhas por se tratarem de folhas menores e não planas, diferente do ingá-bravo onde as medidas foram feitas nas três folhas superiores do ramo (Figura 33).

Cinco conjuntos de medidas radiométricas foram realizados, um para cada tempo de armazenamento das folhas (Quadro 4). Escolheu-se os tempos de registro de dados radiométricos de forma a simular medidas logo após a coleta das folhas, ainda em campo, mas fora da área de estudo, e após o transporte do campo até o laboratório da FCT/UNESP.

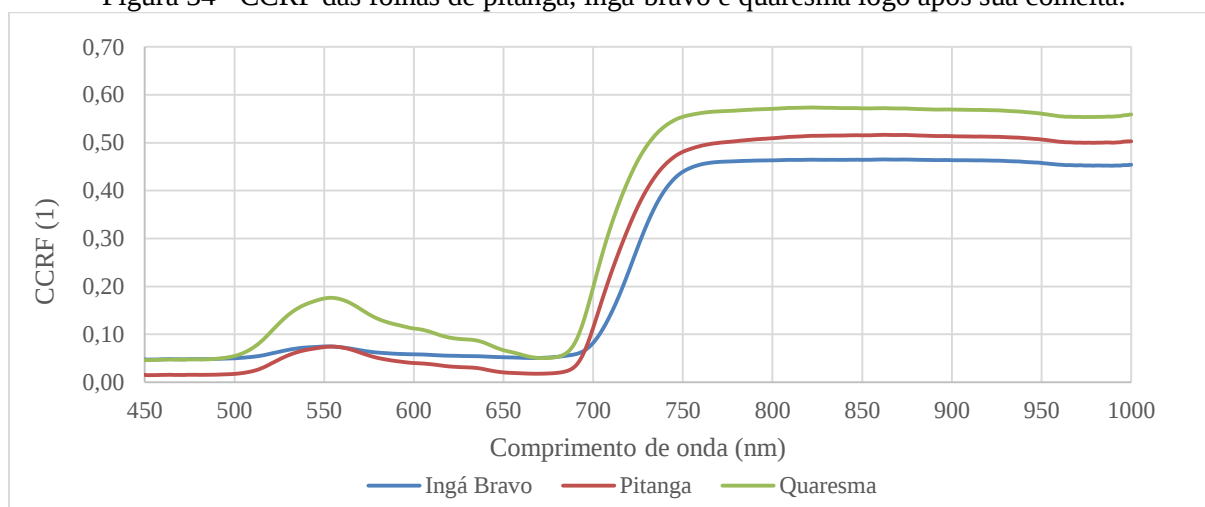
Quadro 4 - Tempo decorrido após a coleta e temperatura das medições radiométricas.

Tempo (h)	Temperatura (°C)
0	10
1	12
7	12
10	6
24	22

As temperaturas de armazenamento das folhas também são apresentadas no Quadro 4. Nesse quadro é possível observar a queda de temperatura após 7 horas de armazenamento, justificada pela troca de gelo na caixa térmica, pois a quantidade de gelo existente era insuficiente para manutenção de temperatura durante as próximas horas de experimento.

Os valores de CCRF (Figura 34) foram determinados para a hora 0 do experimento, ou seja, logo após a retirada das folhas das árvores. Esses valores foram os considerados como a resposta espectral de referência e são os valores a serem comparados com as medidas radiométricas das horas seguintes.

Figura 34 - CCRF das folhas de pitanga, ingá-bravo e quaresma logo após sua colheita.



A seguir foram determinados os valores de CCRF para 1, 7, 10 e 24 horas de armazenamento para cada espécie de folha, que foram comparados com as respostas espectrais de referência para avaliação do tempo armazenamento das folhas e senescência. Os gráficos com os valores de CCRF de cada espécie são apresentados nas Figuras 35, 36 e 37.

Figura 35 - CCRF das folhas de pitanga para diversos tempo de armazenamento.

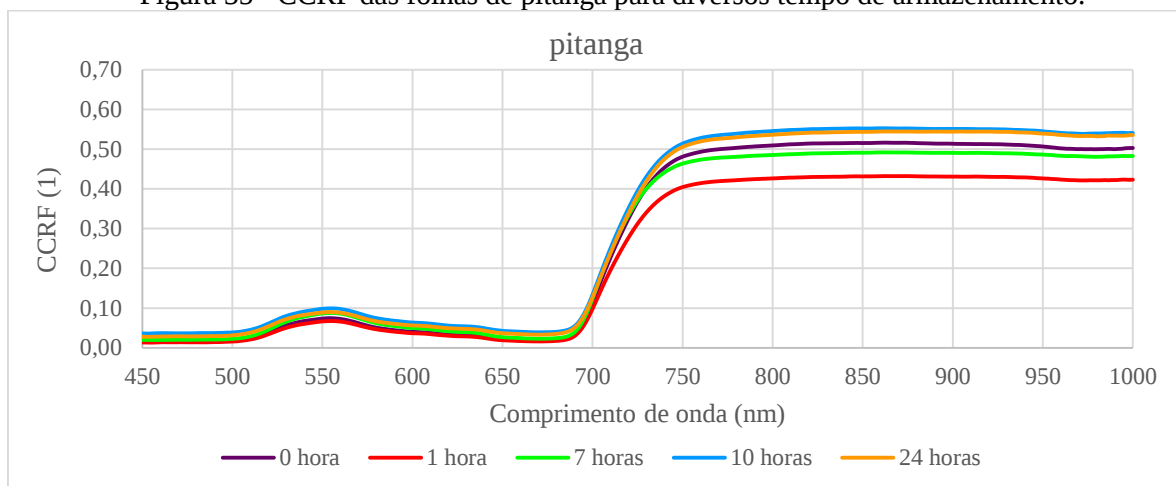


Figura 36 - CCRF das folhas de quaresma para diversos tempo de armazenamento.

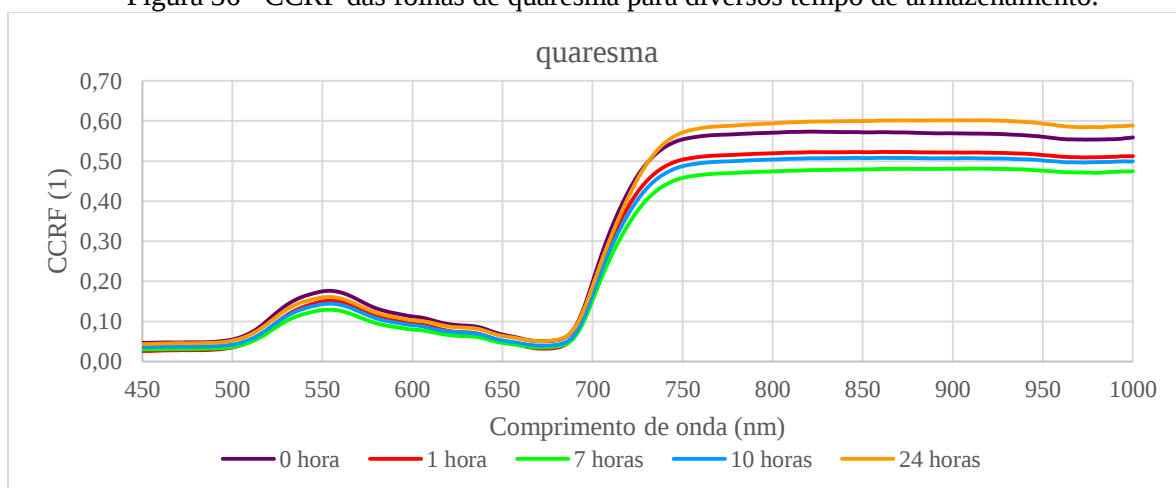
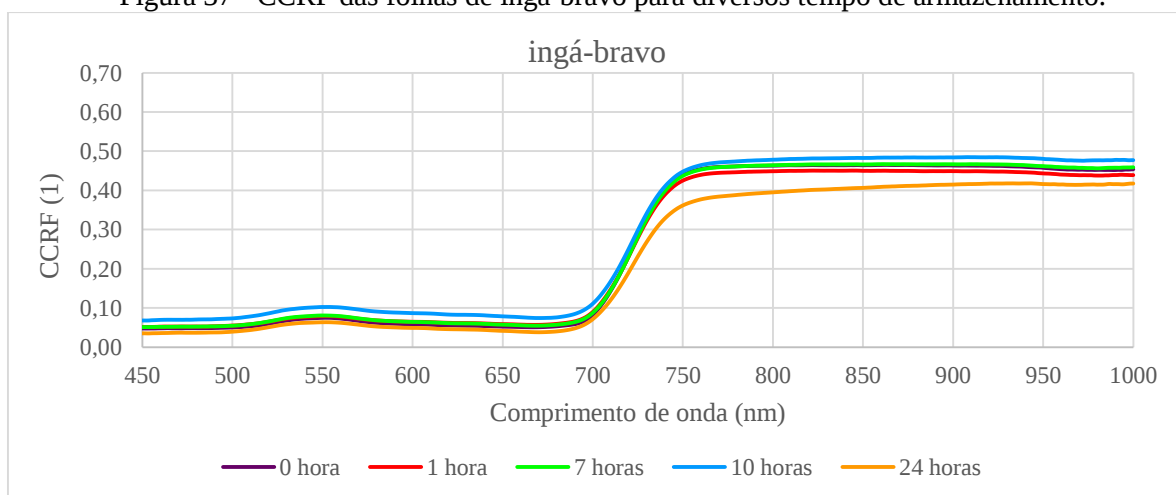


Figura 37 - CCRF das folhas de ingá-bravo para diversos tempo de armazenamento.



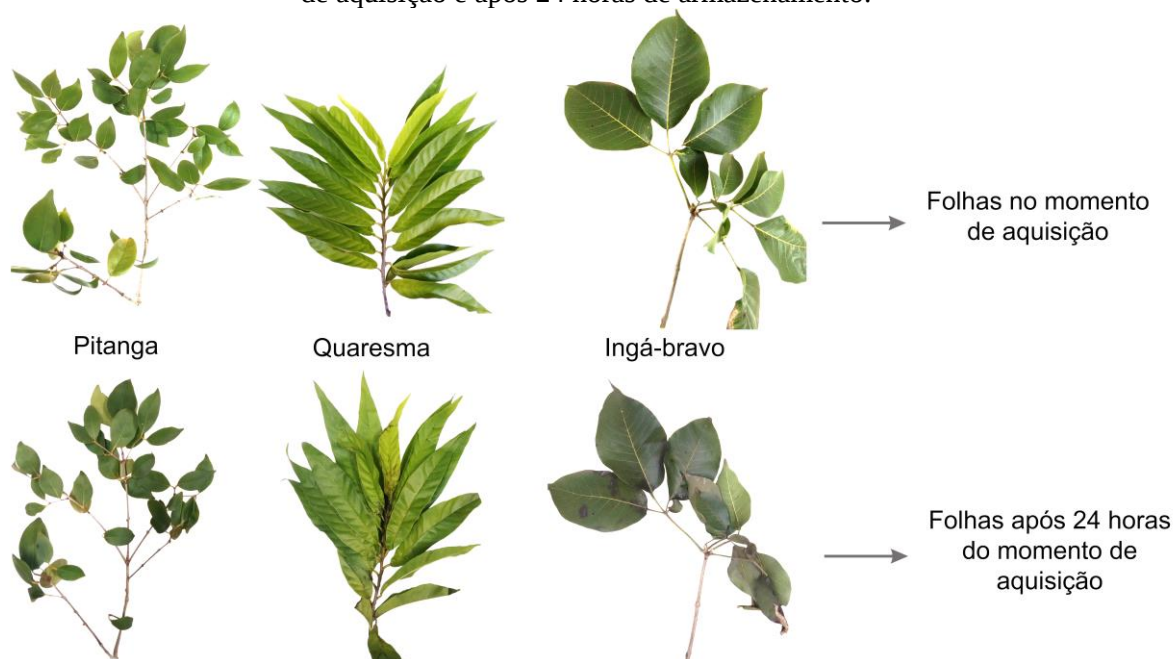
Como esperado, houve diferenças na resposta espectral das folhas com o decorrer do tempo de armazenamento devido à sua senescência, no entanto alguns pontos devem ser observados, principalmente para as alterações na resposta espectral da folha no infravermelho próximo. Nessa região do espectro eletromagnético é esperado o aumento do

fator de reflectância da folha, pois com o passar do tempo a quantidade de água presente no mesófilo lacunoso diminui devido ao processo de senescência da folha.

A resposta espectral da pitanga após 1 hora de armazenamento é menor do que a apresentada logo após a coleta da folha, diferente do esperado. Como hipótese para esse evento tem-se que as medidas radiométricas para a pitanga ocorreram no conjunto de folhas, que não eram totalmente planas, logo pode ter havido alteração do local de realização de medida radiométrica na folha, e consequentemente alteração do CCRF calculado devido ao menor valor de retroespalhamento que pode ter sido causado pela geometria de aquisição.

Outro exemplo de resposta espectral, na região do infravermelho próximo, diferente da esperada é a do ingá-bravo após 24 horas da retirada da folha. Como justificativa para essa resposta espectral tem-se que, neste horário, as folhas do ingá-bravo já se encontravam bastante degradadas e era visível o processo de senescência (Figura 38).

Figura 38 - Folhas utilizadas para avaliação do tempo de armazenamento e senescência no momento de aquisição e após 24 horas de armazenamento.



Calculou-se as discrepâncias entre as respostas espectrais das folhas da vegetação, sempre adotando como referência a hora 0. A média e o desvio padrão das discrepâncias também foram calculados e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Média e desvio padrão das discrepâncias entre os CCRFs das folhas de vegetação.

Tempo de armazenamento (h)	ingá-bravo (1)	pitanga (1)	quaresma (1)
1	-0,004 ± 0,100	-0,043 ± 0,038	-0,034 ± 0,014
7	0,003 ± 0,002	-0,006 ± 0,015	-0,061 ± 0,032
10	0,022 ± 0,006	0,029 ± 0,007	-0,042 ± 0,022
24	-0,034 ± 0,024	0,022 ± 0,007	0,010 ± 0,018

Analisando a Tabela 1, tem-se que a discrepância entre a resposta espectral da quaresma para 24 horas de armazenamento é menor do que para 7 e 10 horas de armazenamento, ou seja, a resposta espectral da quaresma após 24 horas de armazenamento seria mais similar à resposta original do que as respostas para 7 e 10 horas de armazenamento. Porém, seu desvio padrão é maior e ainda, tem-se o fato que as medidas espectrais das folhas de quaresma ocorreram no conjunto de folhas, mesmo caso da pitanga, sendo possível a variação da geometria da medida radiométrica no conjunto das folhas.

Considerando as respostas espectrais das Figuras 35, 36 e 37, e as observações feitas anteriormente sobre as medidas espectrais das folhas, verifica-se que após a retirada da folha de seu ramo há o processo de senescência e alteração na sua resposta espectral. A variação da resposta espectral para até 10 horas de armazenamento tem pequena magnitude, sendo possível a realização das medidas radiométricas sem maiores perdas da assinatura espectral da vegetação até esse horário. Após 24 h de armazenamento a folha já apresenta maior grau de senescência e as medidas espectrais devem ser evitadas.

4.2 CCRF DAS FOLHAS DE VEGETAÇÃO PARA CONFIGURAÇÃO DAS BANDAS ESPECTRAIS

Foram coletadas folhas da vegetação da PB_PLOT2 em trabalho de campo realizado em 11/11/2014 para sua caracterização espectral em nível foliar. Essas informações espectrais foram utilizadas para especificação das bandas espectrais a serem configuradas na câmara Rikola. A coleta de folhas ocorreu aproximadamente às 13h00 do horário local (UTC - 3) e foram armazenadas em papel pardo e caixa térmica até o retorno do trabalho de campo para realização das medidas radiométricas em laboratório, aproximadamente às 21h00 do horário local.

As espécies de folhas coletadas foram: i) abiu (*Pouteria ramiflora*); ii) capixingui (*Croton floribundus*); iii) guaritá (*Astronium graveolens*); iv) guatambu amarelo

(*Aspidosperma ramiflorum*); v) ipê (*Handroanthus avellaneda*); vi) jatobá (*Hymenaea courbaril*); e vii) pitanga (*Eugenia uniflora*) (Figura 39).

Com a mesma finalidade, de aquisição de informação espectral em nível foliar e auxílio para configuração espectral da câmara Rikola, uma equipe de campo coletou folhas da espécie maria mole (*Dendropanax cuneatus*) em 19/12/2014 durante um trabalho de campo. A folha de maria mole utilizada na caracterização espectral foliar pode ser vista na Figura 39.

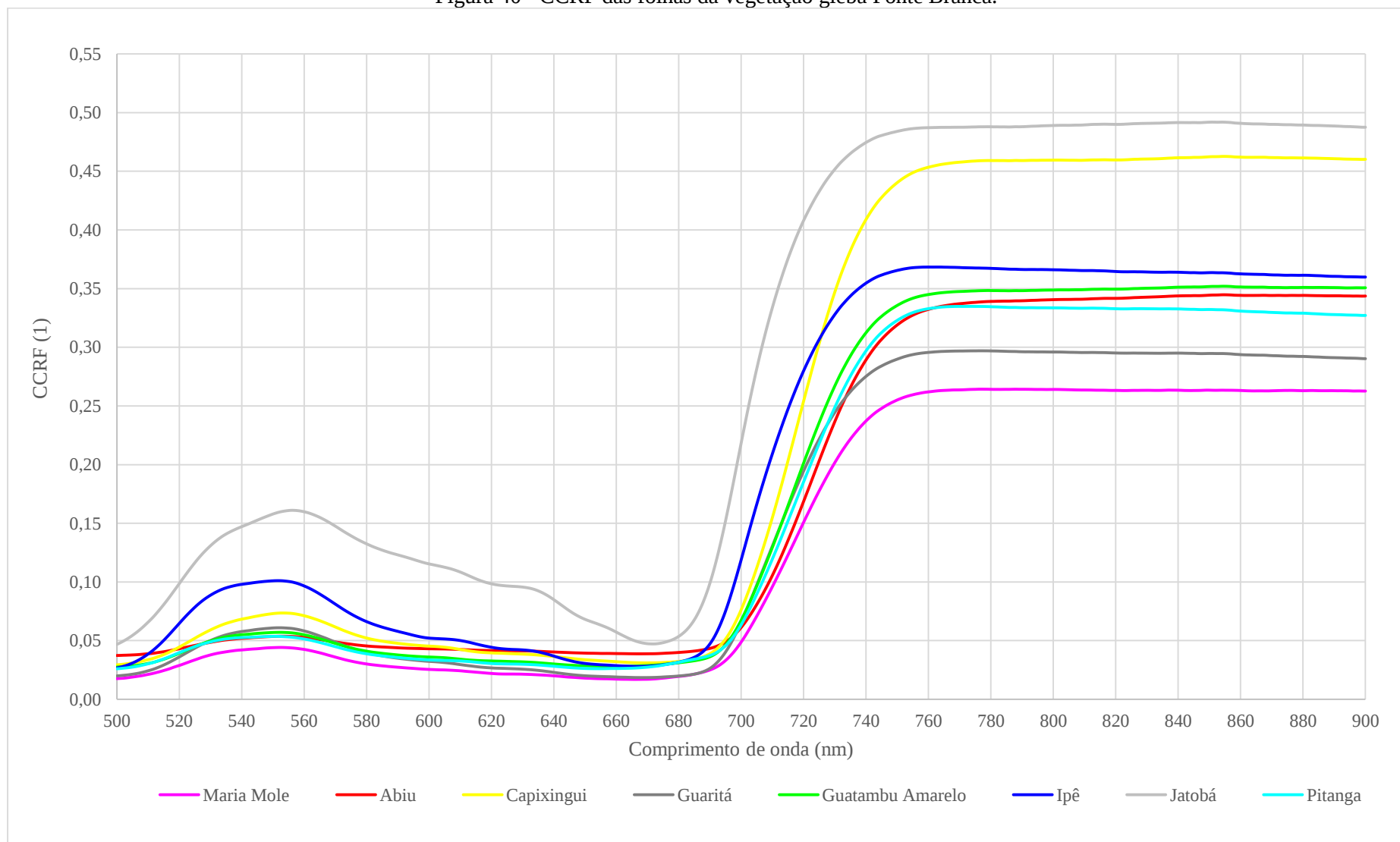
Figura 39 - Folhas da PB_PLOT2 e PB_PLOT3 coletadas em 11/11/2014 e 19/12/2015 para caracterização espectral em laboratório.



Tais folhas foram retiradas das árvores e tiveram a espécie identificada pelo guia dos trabalhos de campos, que possui vasto conhecimento da área de estudo. O critério de seleção considerou a disponibilidade de folhas, ao alcance humano, que não estivessem secas e em áreas acessíveis. Ainda, tem-se que as folhas de pitanga e maria mole foram escolhidas pelo fato destas espécies serem pioneiras e aparecerem em grande quantidade na área de estudo.

Utilizando a metodologia apresentada no item 3.3.2, foram determinados os espectros de CCRF apresentadas na Figura 40, sendo que os dados foram restringidos para o intervalo espectral entre 500 nm e 900 nm, equivalente ao intervalo espectral da câmara Rikola.

Figura 40 - CCRF das folhas da vegetação gleba Ponte Branca.



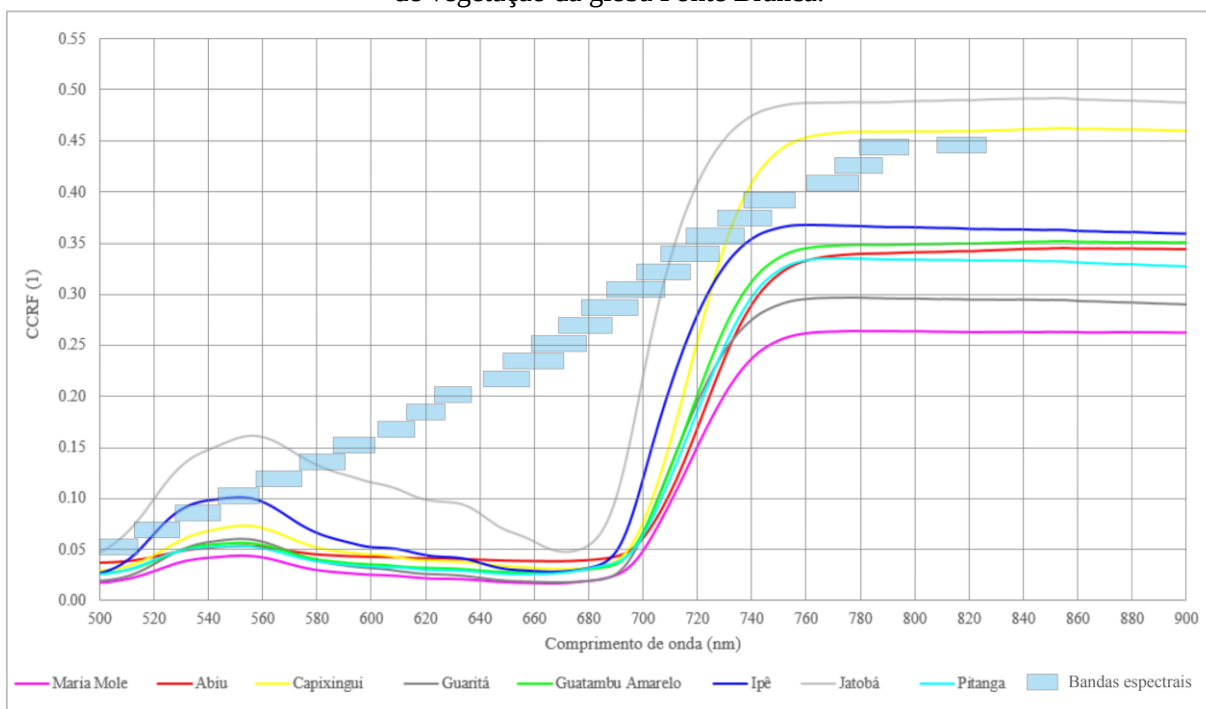
É possível observar diferenças de intensidade nos valores de CCRF principalmente na região do infravermelho próximo, a partir de 740 nm. A literatura reporta que a maior resposta da vegetação nesta região do espectro eletromagnético ocorre devido às diferenças estruturais do mesófilo lacunoso das folhas (JENSEN, 2009).

Nota-se ainda, diferença posicional da borda do vermelho, que está diretamente relacionada com quantidades de clorofila nas folhas (SIMS; GAMON, 2002; CHO; SKIDMORE, 2006). Diferenças nas respostas espectrais também são notadas para a região da cor amarela, na qual a folha do jatobá possui maior resposta espectral. Tal fato pode ser justificado por sua estrutura foliar do jatobá ser diferente das demais espécies, refletindo mais nesta parte do espectro eletromagnético e, possivelmente por apresentar menores quantidades de clorofila, ressaltando a resposta espectral dos carotenos.

4.3 BANDAS ESPECTRAIS DEFINIDAS PARA A CÂMARA RIKOLA E SIMULAÇÃO ESPECTRAL

Utilizando as principais diferenças de CCRF apresentadas no item 4.2 como referência, os comprimentos de onda considerados nos índices de vegetação REP, NDVI, PSSR_a, PSSR_b, SIPI, PRI e PSRI, e as características limitantes da câmara Rikola, foi realizada uma primeira especificação de bandas espectrais. As 25 bandas especificadas são ilustradas na Figura 41 e apresentadas no Quadro 5 (Configuração 1). Ressalta-se que na configuração das bandas espectrais da câmara Rikola, foram escolhidos os espaçamentos do FPI que mais se aproximavam do comprimento de onda e FWHM desejados, visto que eles já são pré-definidos para cada espaçamento do FPI da câmara, originando números reais e na maioria das vezes não inteiros.

Figura 41 - Bandas espectrais configuradas (Configuração 1) sobre os espectros de CCRF das folhas de vegetação da gleba Ponte Branca.

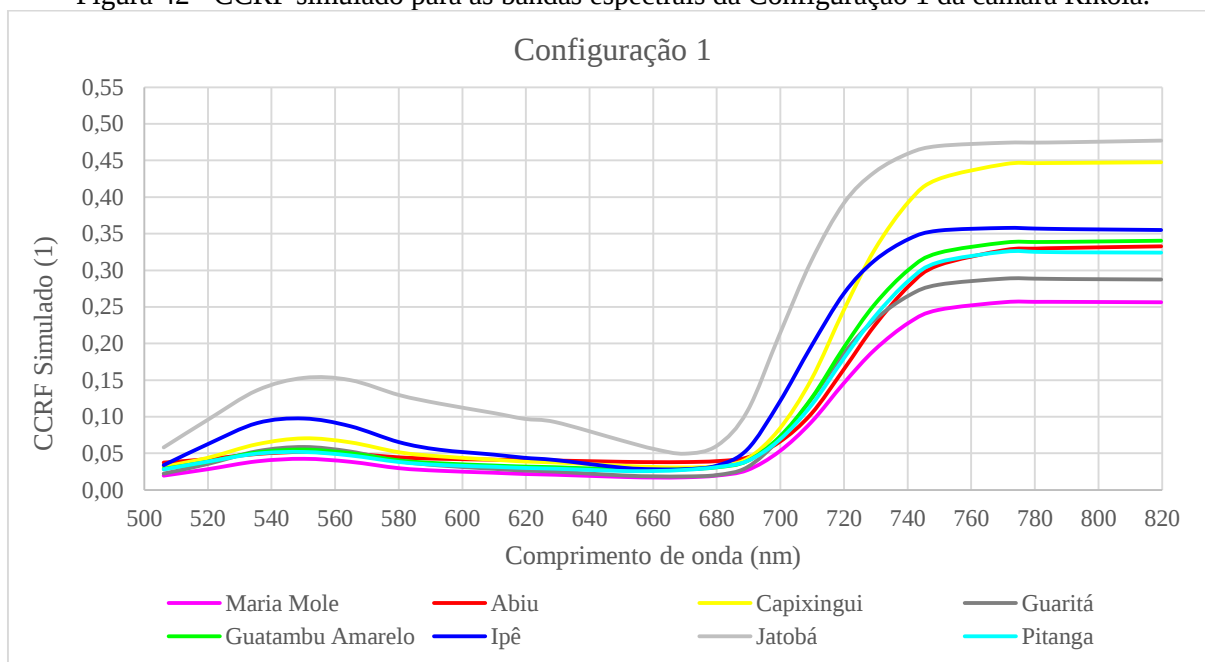


Quadro 5 - Bandas espectrais configuradas (Configuração 1).

Banda	λ (nm)	FWHM (nm)	Banda	λ (nm)	FWHM (nm)
1	506,07	15,65	14	680,06	21,00
2	520,00	17,51	15	689,56	21,67
3	535,45	16,41	16	699,62	21,89
4	550,16	15,18	17	709,71	20,78
5	564,71	16,60	18	719,99	20,76
6	580,08	15,14	19	729,56	21,44
7	592,78	14,81	20	740,45	20,64
8	609,79	13,77	21	749,65	19,43
9	619,55	14,59	22	770,46	19,39
10	629,23	12,84	23	780,16	18,25
11	650,28	15,85	24	790,21	18,50
12	660,27	24,11	25	819,70	18,17
13	669,96	21,70			

Para averiguação da resposta teórica dos valores espectrais das folhas, coletadas na PB_PLOT2 e PB_PLOT3, nas imagens da câmara Rikola configuradas com essas bandas espectrais, foram simuladas as respostas espectrais (Figura 42). Ressalta-se que essa simulação representa a resposta espectral da folha, pois a resposta espectral da copa de árvores é diferente visto que há a influência da disposição das folhas, galhos, entre outras variáveis.

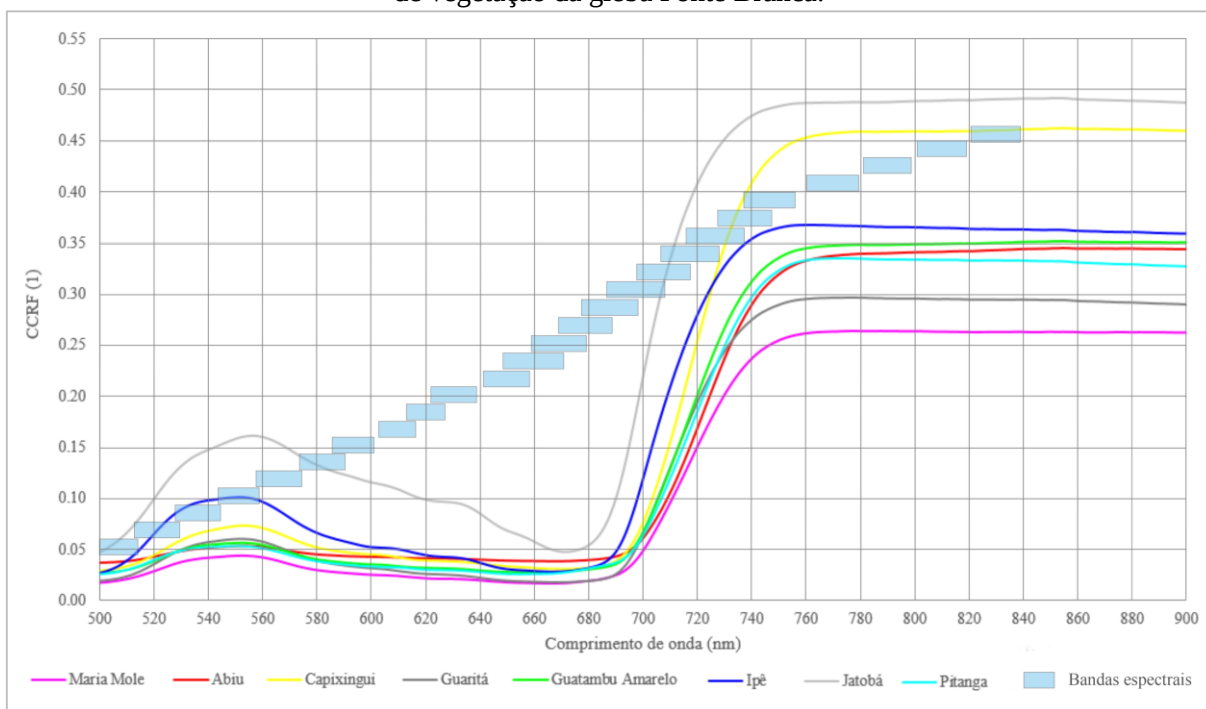
Figura 42 - CCRF simulado para as bandas espectrais da Configuração 1 da câmara Rikola.



Observando as respostas espectrais simuladas (Figura 42) com as respostas espectrais determinadas a partir do espectrorradiômetro (Figura 40) nota-se que ambas têm comportamento semelhante. Ainda há a presença de diferenças de intensidade nas respostas espectrais na região do visível e do infravermelho próximo. Na borda do vermelho as diferenças também foram preservadas. Logo, tem-se que a Configuração 1 pode ser utilizada com a câmara Rikola.

A partir da Configuração 1, uma segunda configuração (Configuração 2) foi adaptada por Moriya (2015) considerando o entorno da gleba Ponte Branca, a cultura de cana-de-açúcar. Para essa configuração foram utilizadas as respostas espectrais de cana-de-açúcar sadia e doente (MORIYA et al., 2015) e os picos de absorção de clorofila. A simulação espectral foi realizada para as respostas espectrais da vegetação apresentadas no item 4.2, pois o enfoque desse trabalho são as espécies de vegetação florestal. As bandas espectrais configuradas são ilustradas na Figura 43 e apresentadas no Quadro 6. Na Figura 44 é apresentada a simulação espectral de bandas.

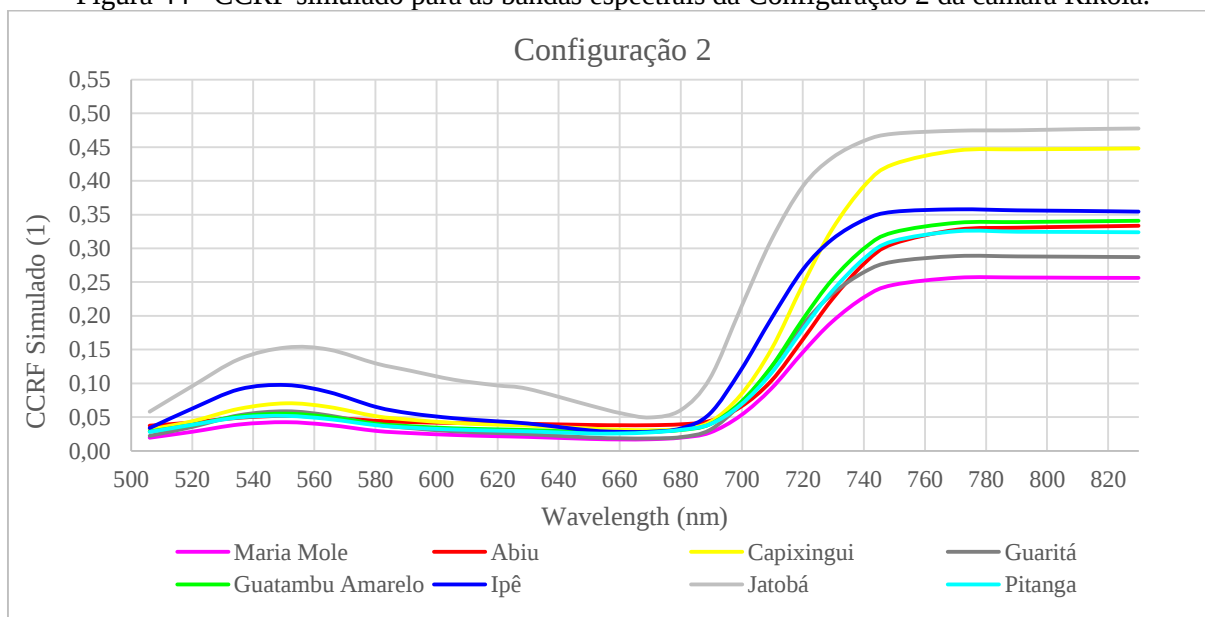
Figura 43 - Bandas espectrais configuradas (Configuração 2) sobre os espectros de CCRF das folhas de vegetação da gleba Ponte Branca.



Quadro 6 - Bandas espectrais configuradas (configuração 2).

Banda	λ (nm)	FWHM (nm)	Banda	λ (nm)	FWHM (nm)
1	506,07	15,65	14	680,06	21,00
2	520,00	17,51	15	689,56	21,67
3	535,45	16,41	16	699,62	21,89
4	550,76	15,16	17	709,71	20,78
5	564,71	16,60	18	719,99	20,76
6	580,08	15,14	19	729,56	21,44
7	591,49	14,67	20	740,45	20,64
8	605,64	13,82	21	749,65	19,43
9	619,55	14,59	22	770,46	19,39
10	629,93	22,85	23	790,21	18,50
11	650,28	15,85	24	810,15	17,66
12	660,27	24,11	25	829,93	18,62
13	669,96	21,70			

Figura 44 - CCRF simulado para as bandas espectrais da Configuração 2 da câmara Rikola.



Assim como na simulação espectral da Configuração 1, as respostas simuladas da Configuração 2 ainda mantém as diferenças espectrais das folhas de vegetação da Ponte Branca, sendo possível a discriminação destas espécies e sua caracterização espectral utilizando a câmara Rikola. Logo, optou-se por utilizar a Configuração 2 quando realizado voos abrangendo a cultura canavieira e a Configuração 1 para os outros casos.

4.4 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Com as bandas espectrais definidas, foi realizado o processo de validação do método de processamento adotado. Para tal, foram utilizadas imagens distribuídas em duas faixas de voo e adquiridas em trabalho de campo realizado em 19/05/2015 na área CANA1. A coleta das imagens ocorreu entre 12h55 e 13h10 do horário local (UTC-3) com os ângulos solares de elevação, azimutal e zenital variando conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Variação do ângulo solar durante a aquisição das imagens em 19/05/2015.

Horário	Azimute solar	Zenital solar
12h55min38s	349°54'36"	132°46'12"
13h09min34s	345°13'12"	133°27'36"

Fonte: < <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/> >

O cenário imageado era composto por vegetação em regeneração (borda da gleba Ponte Branca), solo exposto e cultura de cana-de-açúcar, optando pela aquisição das

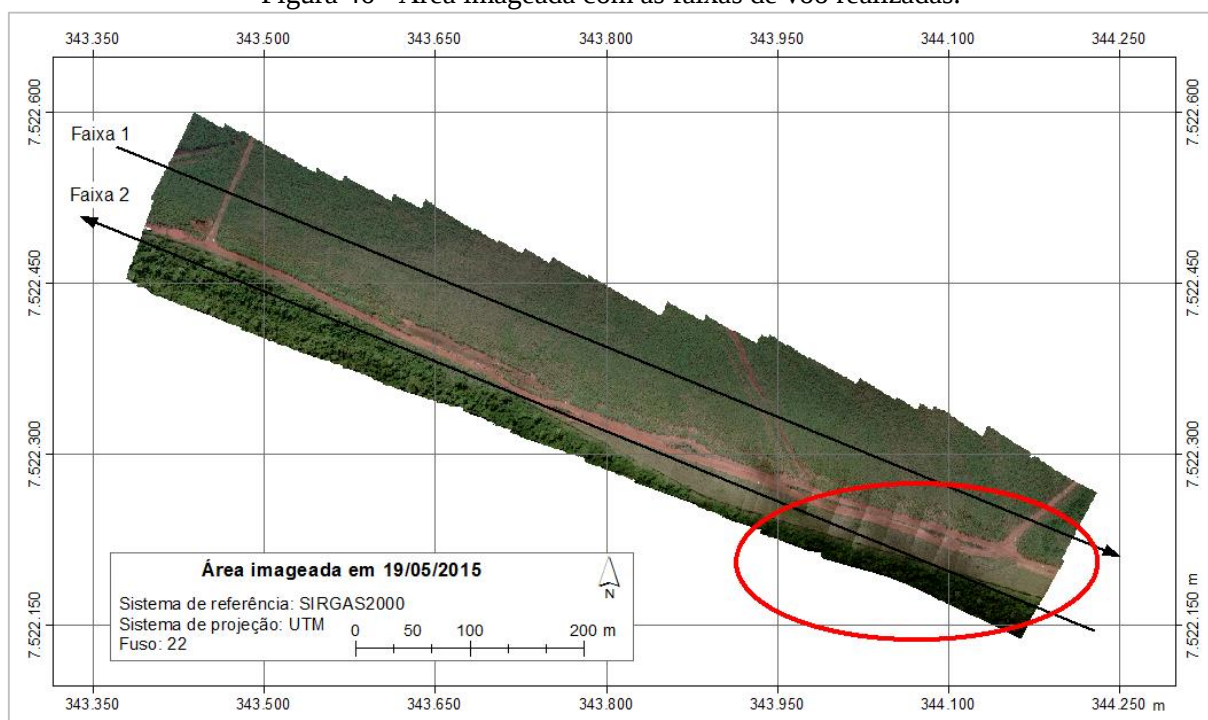
imagens com a Configuração 2 das bandas espectrais (item 4.3). Quanto à condição climática do local, o céu era claro, porém, com a presença de nuvens esparsas (Figura 45).

Figura 45 - Condições climáticas durante a aquisição das imagens (19/05/2015).



Antes do início da aquisição das imagens foram distribuídos alvos de EVA nas cores branca, preta e cinza na área a ser imageada (Figura 46) para aplicação do método da linha empírica e validação do processamento radiométrico. Os alvos foram distribuídos apenas na estrada de terra do local devido à altura e densidade da cultura canavieira e da floresta em regeneração que não permitiam a visualização dos alvos nas imagens. A imagem escura, para correção da corrente escura, foi adquirida com a lente da câmara obstruída pelo poliestireno estruturado e em seguida as imagens foram adquiridas com a câmara acoplada ao VANT.

Figura 46 - Área imageada com as faixas de voo realizadas.



Na Figura 46 ainda é destacada a parte inferior direita do mosaico de imagens, que possui diferenças visíveis de iluminação mesmo após as correções radiométricas aplicadas. Tal variação foi causada pela presença de nuvens durante a aquisição das imagens. Logo, nota-se que as imagens foram adquiridas em condições desfavoráveis, pois as nuvens causam variações de iluminação nas imagens registradas.

Após a correção da corrente escura e correção radiométrica das imagens, fez-se ajustamento radiométrico em bloco (item 3.3.5). Para tal, foi utilizando o programa desenvolvido e fornecido pela Dr. Eija Honkavaara do FGI, intitulado *RadiometricBlockAdjustment-2015-07-30-sea200*. Como dados de entrada do programa são utilizados: i) POI de um dos sensores; ii) POE das imagens; iii) MDS da área abrangida pelas imagens; iv) MDS subamostrado para resolução espacial de 5 m, utilizado para a geração dos pontos radiométricos de enlace e correção relativa das imagens; v) dados de irradiância utilizados como parâmetros iniciais da correção relativa, e; vi) Parâmetros de ganho e offset da linha empírica. A resolução espacial do mosaico ortorretificado corrigido radiometricamente será definida pela resolução espacial do MDS da área (item iii).

Os POI foram obtidos pela calibração geométrica da câmara Rikola e os POE das imagens foram refinados pelo processo de fototriangulação das imagens, realizados em Berveglieri e Tommaselli (2016). A fototriangulação foi realizada no módulo fotogramétrico do *ERDAS Imagine*, o *ERDAS LPS*.

Com a finalidade de verificar a necessidade da correção da BRDF e correção relativa das variações de iluminação das imagens foram realizados cinco testes aplicando:

- Nenhuma correção na geração do mosaico de ortoimagens (*ORTO*);
- Somente a correção da BRDF (*BRDF*);
- Correção da BRDF e relativa com parâmetros de entrada os coeficientes de correção obtidos pelo sensor de irradiância da câmara (*BRDF_rela_câmara*);
- Correção da BRDF e relativa utilizando os coeficientes de correção obtidos a partir dos dados de campo (*BRDF_rela_campo*);
- Correção da BRDF e relativa utilizando como parâmetros de entrada os mesmos valores para todas as imagens (*BRDF_rela*);

Para as cinco correções (*ORTO*, *BRDF*, *BRDF_rela_câmara*, *BRDF_rela_campo* e *BRDF_rela*) optou-se pela aplicação da linha empírica após o

processamento das imagens, devido às possíveis diferenças de valores de brilho na imagem, atribuindo os valores 1 e 0 como parâmetros de ganho (a_{abs}) e *offset* (b_{abs}) no programa de processamento (*RadiometricBlockAdjustment-2015-07-30-sea200*).

- **Parâmetros iniciais de correção relativa das imagens**

Considerando que foram coletados dados de irradiância em campo e pelo sensor embarcado no VANT, optou-se por realizar três dos cinco processamentos utilizando diferentes parâmetros iniciais de correção relativa: i) *BRDF_rela_câmara*; ii) *BRDF_rela_campo*; iii) e *BRDF_rela*. Esse último justificado pela extensão do mosaico e devido à variação da orientação do sensor de irradiância, que acompanha as variações de atitude do VANT. Na *BRDF_rela* adotou-se como parâmetro inicial de correção relativa ($a_{rel,j}$) o valor 1 para todas imagens.

Os dados de irradiância obtidos pelo sensor da câmara (Figura 47) foram obtidos no arquivo de metadados de cada imagem. Para a irradiância coletada em campo (Figura 48), medidas de radiância foram adquiridas com o espectrorradiômetro e convertidas para irradiância conforme Equação 27. Em seguida, aplicou-se a simulação espectral para aquisição da irradiância relativa de cada imagem considerando o intervalo espectral da câmara Rikola, 500 nm à 900 nm. Por fim, os valores de irradiância foram relacionados com cada imagem utilizando a hora de aquisição das medidas.

Figura 47 - Irradiância de cada imagem registrada pelo sensor de irradiância da câmara.

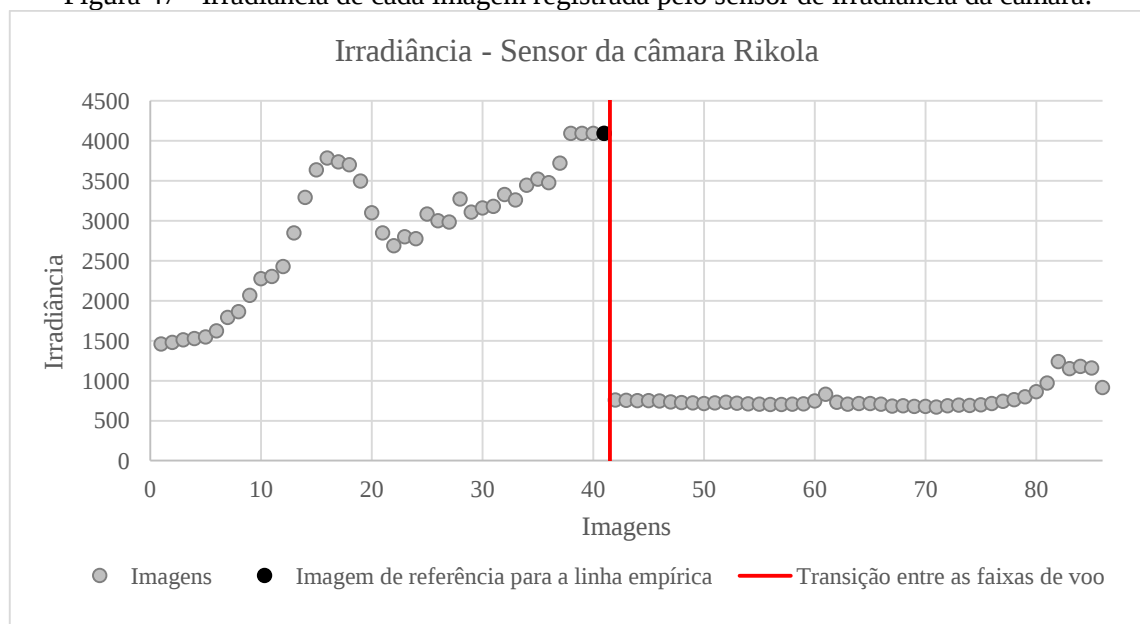
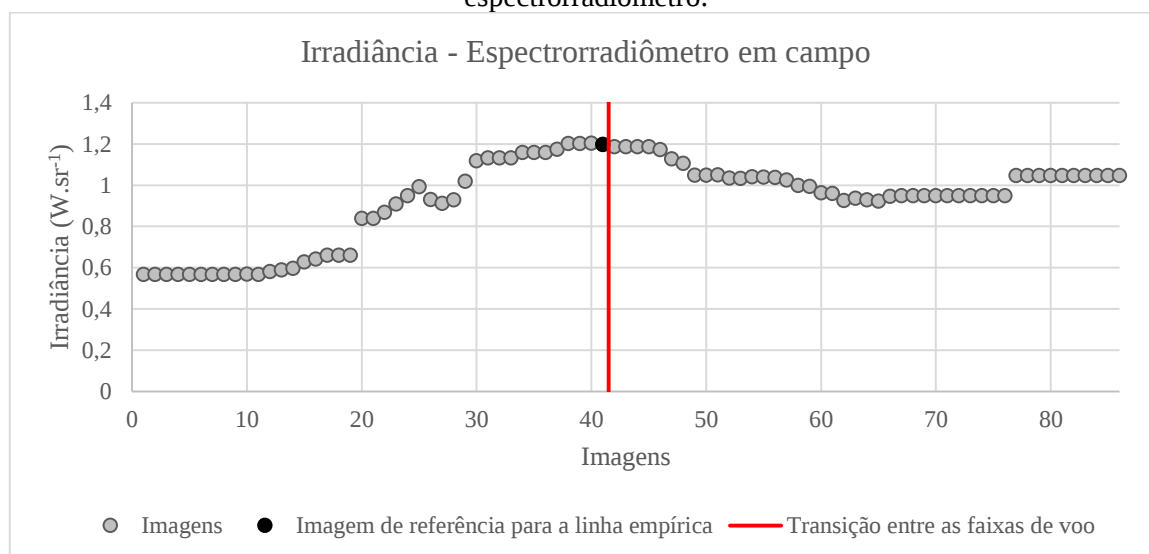
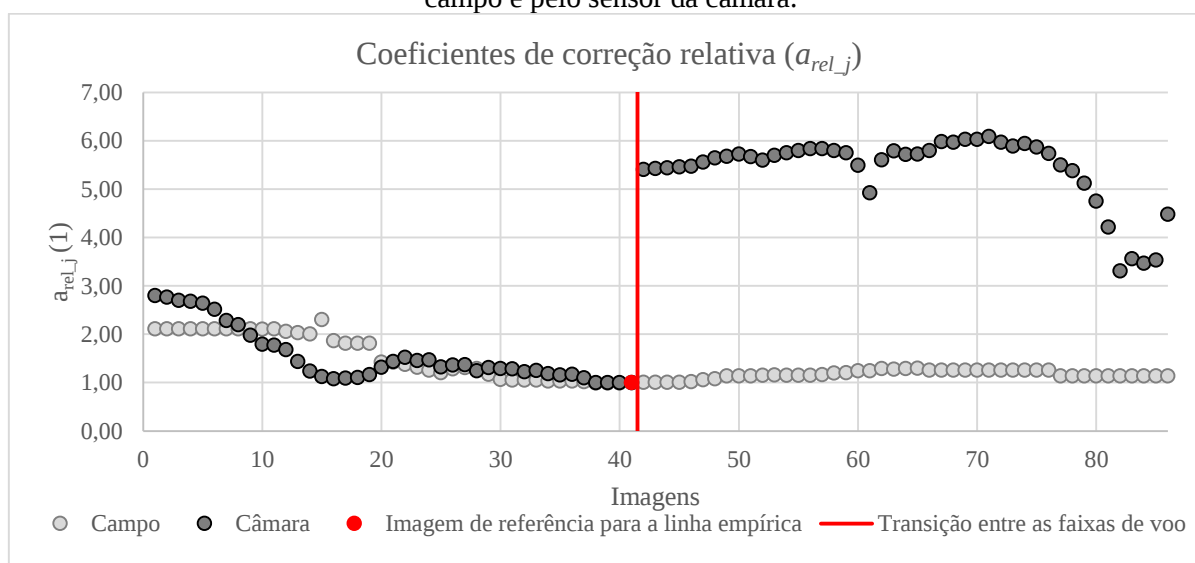


Figura 48 - Irradiância de cada imagem determinada a partir dos dados coletados em campo com o espectrorradiômetro.



Os valores iniciais para o coeficiente $a_{rel,j}$ foram determinados para cada imagem e cada dado de irradiância para as correções dos dados da câmara ($BRDF_rela_câmara$) e do campo ($BRDF_rela_campo$). A Figura 49 ilustra tais coeficientes bem como a imagem adotada como referência para o cálculo dos coeficientes. Ressalta-se que a imagem de referência está localizada na transição entre as duas faixas de voo e foi escolhida por possuir os alvos de referência para aplicação do método da linha empírica.

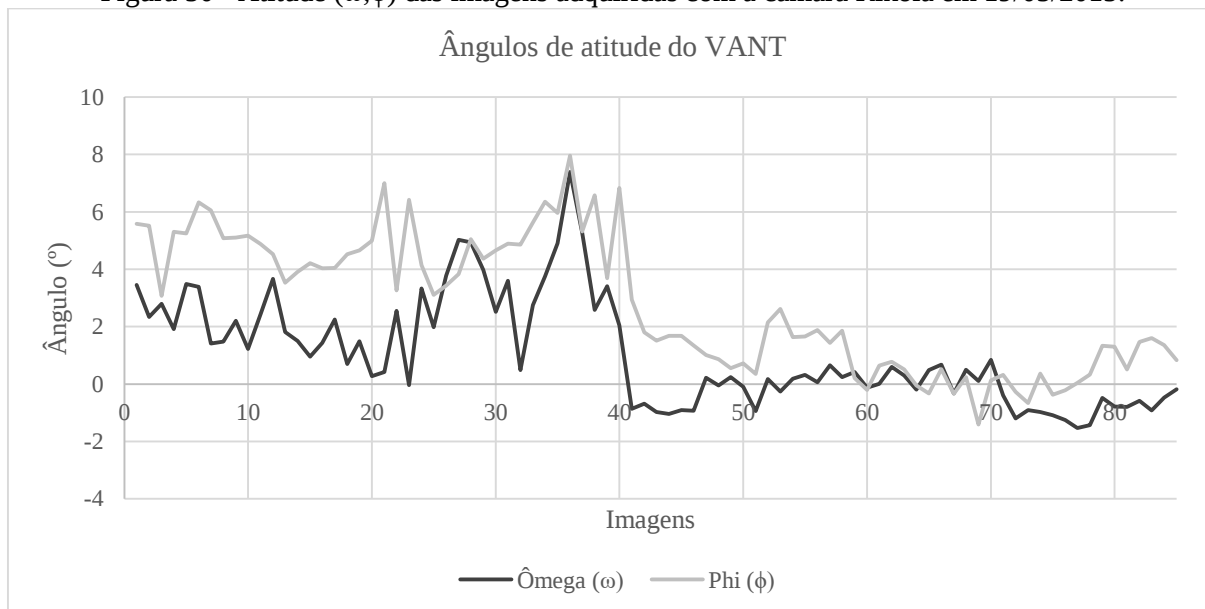
Figura 49 - Coeficientes iniciais de correção relativa ($a_{rel,j}$) calculados a partir dos dados coletados em campo e pelo sensor da câmara.



Para ambos os dados, do espectrorradiômetro e do sensor da câmara, percebe-se uma maior variação de irradiância no início da aquisição das imagens, antes da segunda faixa

de voo. Como hipótese para explicar essa variação tem-se a presença de nuvens no céu durante a aquisição das imagens, principalmente para a primeira faixa de voo, e para o caso do sensor de irradiância da câmara tem-se a atitude do VANT, que modifica a orientação do sensor que está fixo no VANT. A Figura 50 ilustra a variação dos ângulos de atitude (ω , ϕ) de cada imagem.

Figura 50 - Atitude (ω, ϕ) das imagens adquiridas com a câmara Rikola em 19/05/2015.

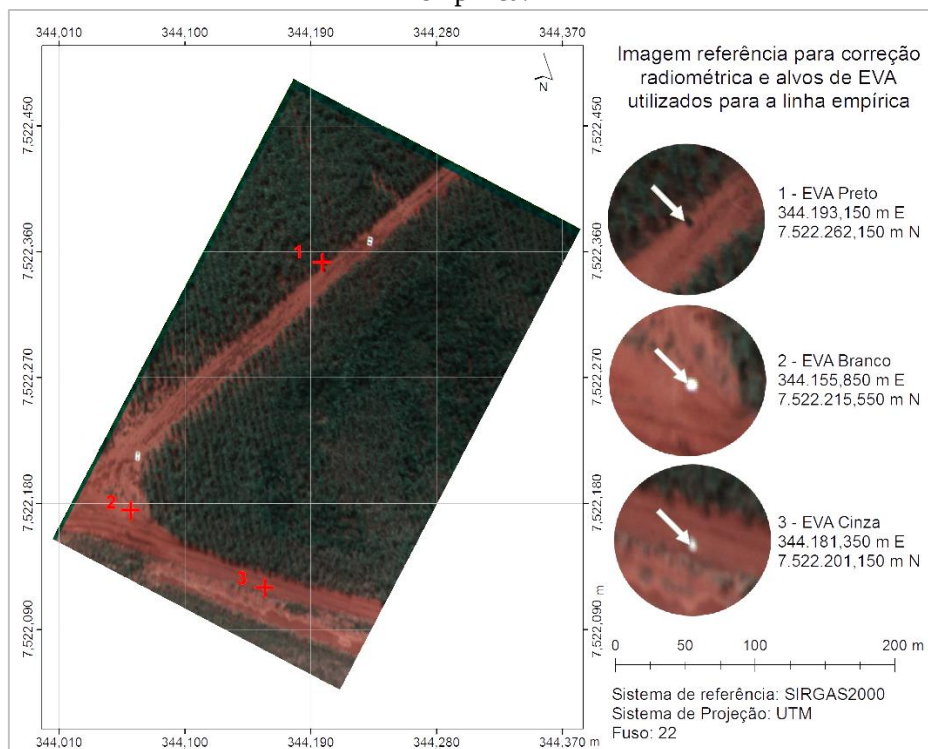


Pela análise das Figuras 47 e 50 que apresentam, respectivamente, os valores de irradiância registrados pelo sensor da câmara e os ângulos ω e ϕ das imagens nota-se a correlação entre os valores mais altos de irradiância e atitude para as imagens da primeira faixa de voo. Quando maior a atitude e sua variação, maiores foram os valores de irradiância, sendo possível concluir que nessas imagens o sensor de irradiância estava inclinado em direção ao Sol.

- **Aplicação do método da linha empírica**

Para aquisição dos valores de HCRF aplicou-se o método da linha empírica no mosaico de imagens resultante do ajustamento radiométrico. Três alvos foram utilizados como referência para o cálculo dos parâmetros de transformação e eram feitos de EVA nas cores branca, preta e cinza (Figura 51).

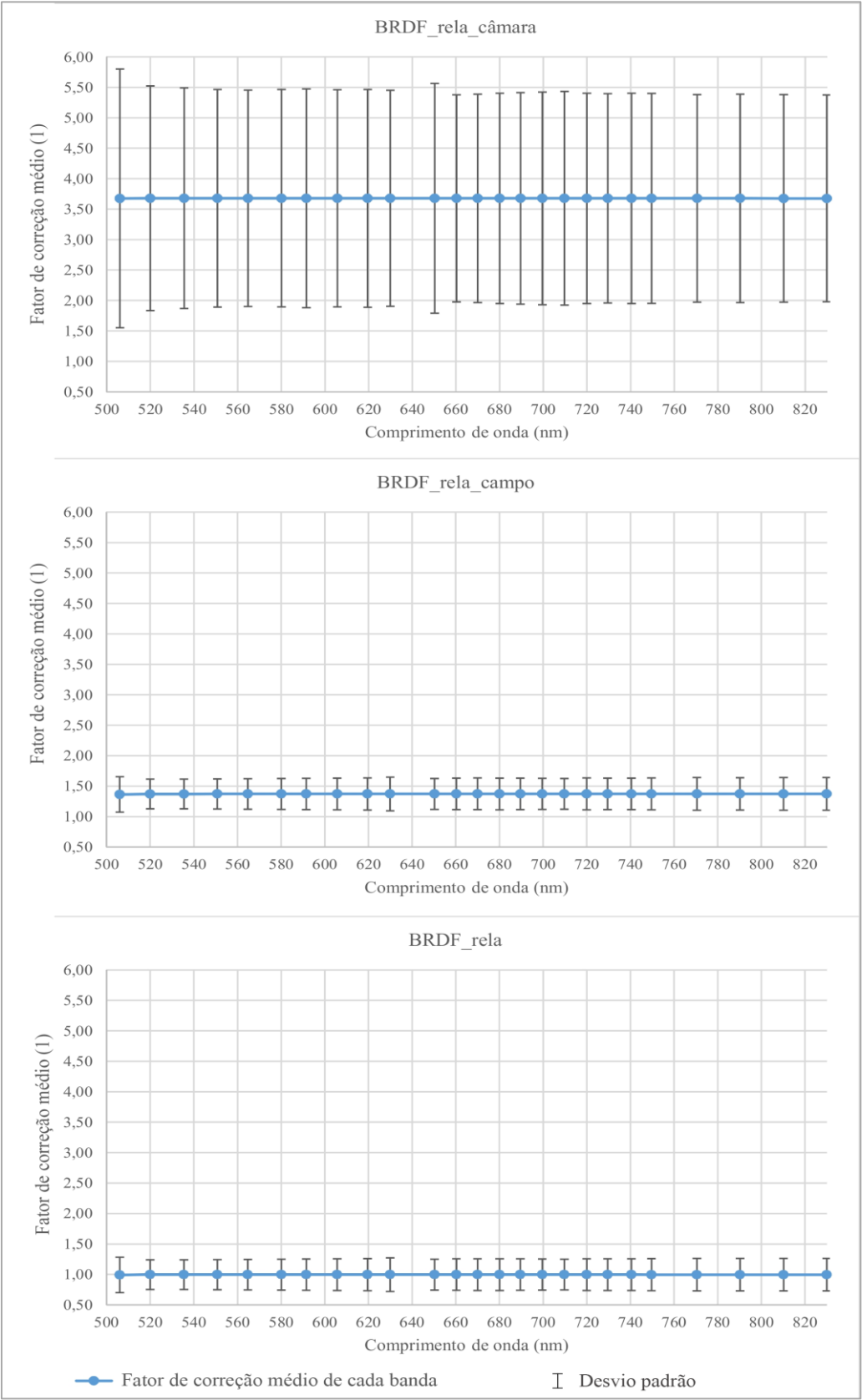
Figura 51 - Imagem e alvos de EVA utilizados como referência para aplicação do método da linha empírica.



- **Resultados dos processamentos radiométricos das imagens**

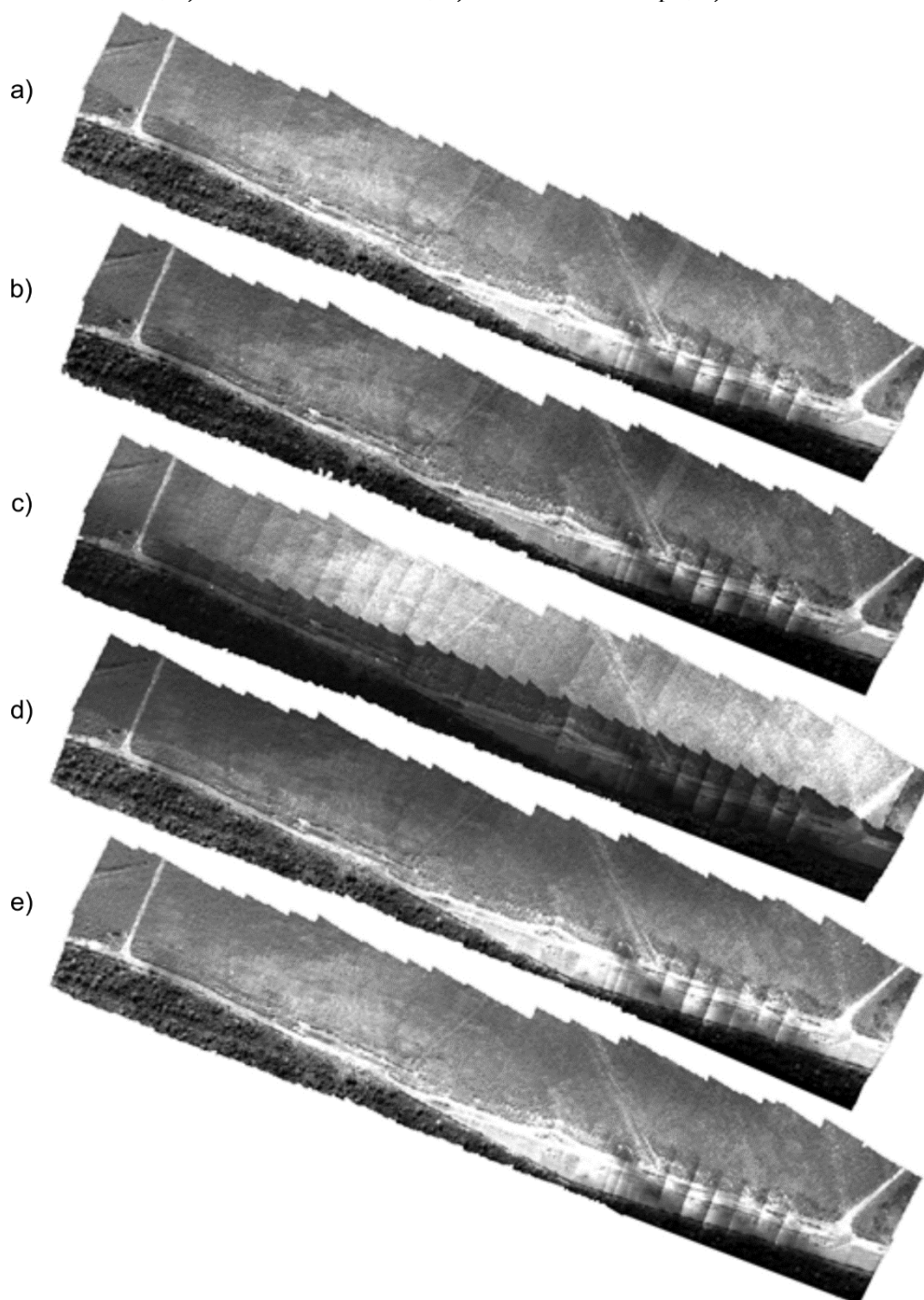
Após a realização dos processamentos radiométricos das imagens, foram obtidos cinco mosaicos com valores de HCRF. Para os mosaicos em que foram aplicadas a correção relativa e ajustamento radiométrico das imagens (*BRDF_rela_câmara*, *BRDF_rela_campo* e *BRDF_rela*) foram obtidos os valores finais de fatores de correção relativa, cujos valores médios e desvios padrão para cada banda espectral são apresentados na Figura 52. Pode-se verificar na Figura 52 que a correção *BRDF_rela_câmara* foi a que apresentou maior variação nos coeficientes de correção, diferente do que ocorreu com a correção *BRDF_rela*, sendo possível concluir que os fatores dessa correção estavam mais próximos do esperado e calculado pelo ajustamento radiométrico.

Figura 52 - Média e desvio padrão dos fatores de correção de cada banda espectral para as correções *BRDF_rela_câmara*, *BRDF_rela_campo* e *BRDF_rela*.



A banda 1, que corresponde ao comprimento de onda 506,07 nm, de cada mosaico gerado nos processamentos radiométrico é ilustrada na Figura 53, onde se verifica a existência de diferenças de brilho entre algumas imagens.

Figura 53 - Mosaicos realçados (banda 1, 506,07 nm) gerados pelas diferentes correções: a) *ORTO*; b) *BRDF*; c) *BRDF_rela_câmara*; d) *BRDF_rela_campo*; e) *BRDF_rela*.



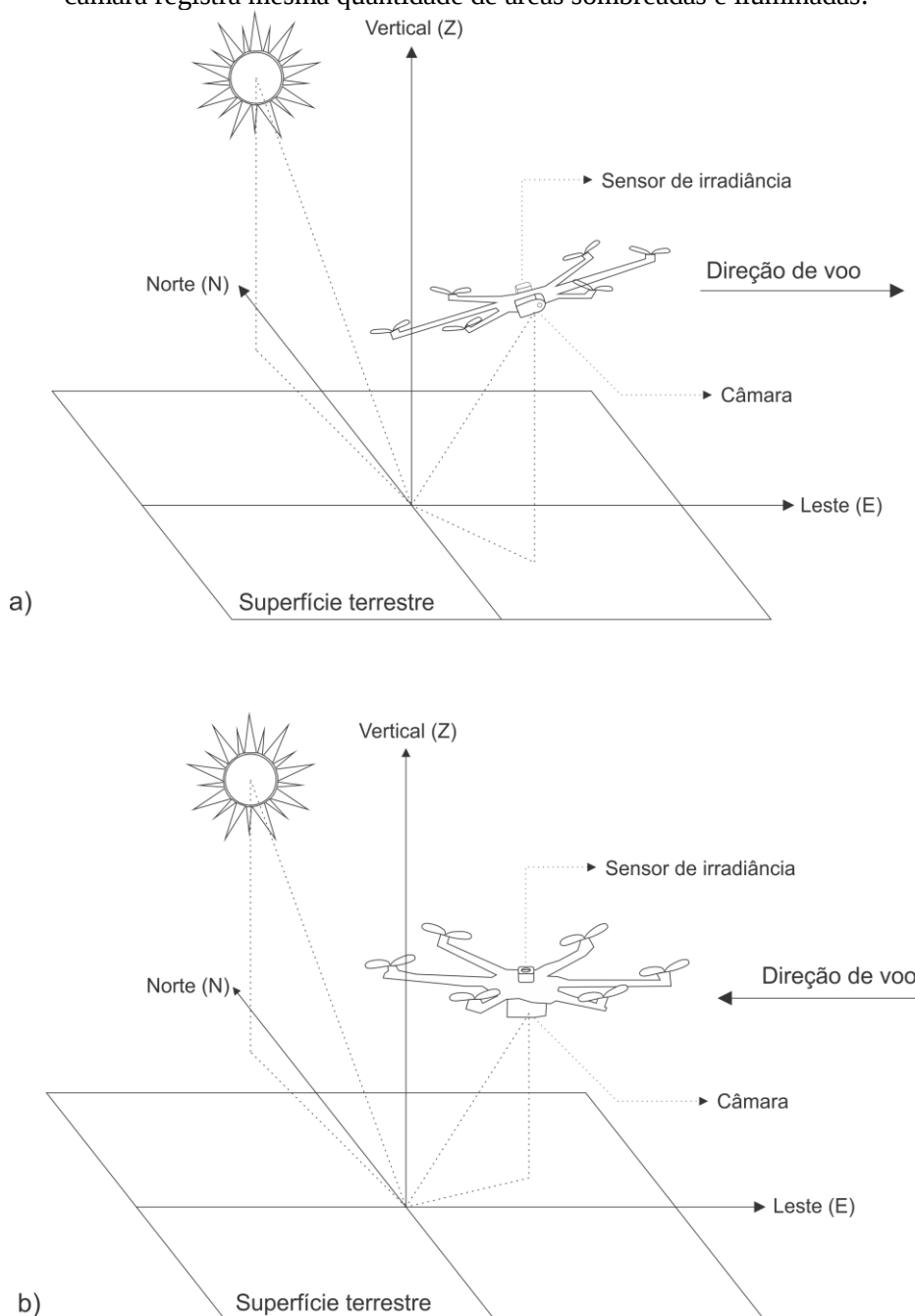
No canto inferior do mosaico de todos os processamentos nota-se que a diferença de brilho ainda ocorre mesmo após o ajustamento radiométrico. As hipóteses para tais ocorrências são as inclinações da plataforma durante o deslocamento do VANT e condições

climáticas no momento de aquisição destas imagens. Variações de brilho também podem ser verificadas, principalmente, para a correção *BRDF_rela_câmara* mesmo após o ajustamento radiométrico.

Uma das hipóteses para variações de brilho da *BRDF_rela_câmara* são as variações de atitude do VANT durante seu deslocamento. Dependendo da atitude do VANT em relação ao Sol, os valores de irradiância registrados e utilizados para o cálculo dos fatores iniciais de correção relativa variam, acentuando os efeitos do retroespalhamento ou reflexão especular. Outra hipótese, é a confiabilidade dos fatores de correção calculados a partir dos dados de irradiância do sensor da câmara, pois não há informação de unidade de medida, intervalo espectral de funcionamento e precisão dos valores registrados pelo sensor. Por fim, também se tem a imagem adotada como referência, que modifica os valores calculados para os fatores de correção.

A Figura 54 ilustra a orientação do VANT em relação ao Sol nas duas faixas de voo considerando os ângulos de orientação provenientes da fototriangulação (Figura 50). Na primeira faixa de voo, devido aos ângulos ω e ϕ , o sensor de irradiância fica direcionado para o Sol, registrando maiores valores de irradiância. Na Faixa 2, os ângulos ω e ϕ são quase nulos, mantendo o sensor de irradiância na horizontal e, conseqüentemente, registrando valores menores de irradiância se comparado aos da Faixa 1. Desta forma, a atitude do VANT influenciou no cálculo dos fatores de correção calculados, acentuando o efeito do retroespalhamento e da reflexão especular na correção *BRDF_rela_câmara*.

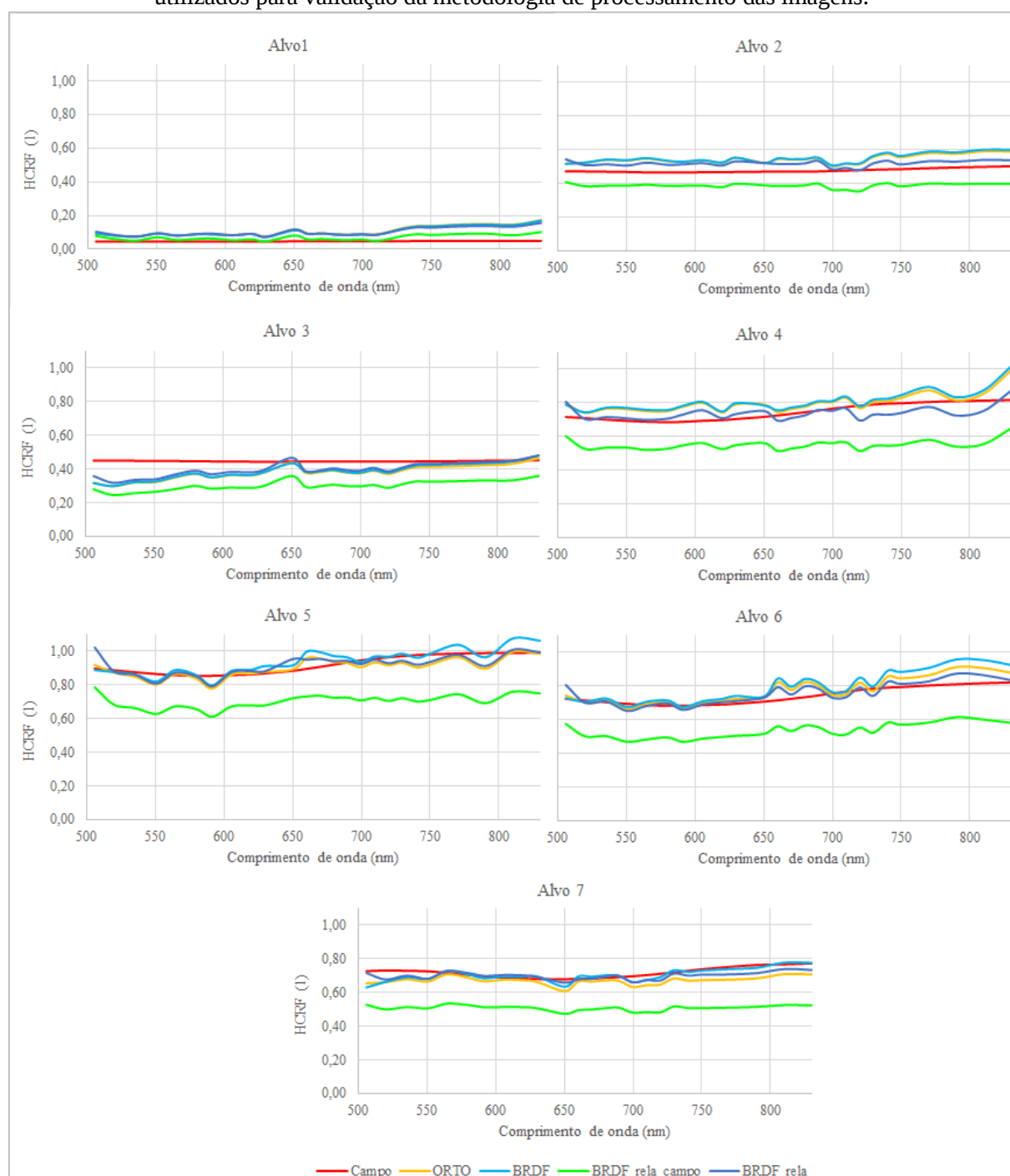
Figura 54 - Atitude do VANT durante a aquisição das imagens: a) na Faixa 1, o sensor de irradiância está inclinado em direção ao Sol e o efeito do retroespalhamento é acentuado; b) na Faixa 2, onde o sensor de irradiância não está inclinado e registra valores menores de irradiância do que na Faixa 1 e a câmara registra mesma quantidade de áreas sombreadas e iluminadas.



Após a aplicação do método linha empírica, foi realizada a validação dos do ajustamento radiométrico e dos valores de HCRF dos mosaicos. Foram utilizados 7 alvos de EVA nas cores preta, branca e cinza, distribuídos ao longo da área imageada. Nos mosaicos de cada correção foram obtidas as respostas espectrais de cada banda para cada alvo. Em campo foram coletados valores de radiância desses alvos de EVA e foram calculados os valores de HCRF.

Como o espectrorradiômetro possui maior resolução espectral do que a câmara que adquiriu as imagens, aplicou-se a simulação espectral de bandas para obtenção do HCRF de cada banda. A Figura 55 ilustra os espectros de HCRF de cada alvo, obtidos em cada mosaico e o obtido pela simulação espectral, considerado como referência e representado por “campo”. Ressalta-se que os espectros de HCRF da correção *BRDF_rela_câmara* não foram representados na Figura 55, pois apresentaram discrepâncias maiores do que 5 unidades.

Figura 55 - Espectros de HCRF dos 7 alvos de EVA, de cada correção e de referência (campo), utilizados para validação da metodologia de processamento das imagens.



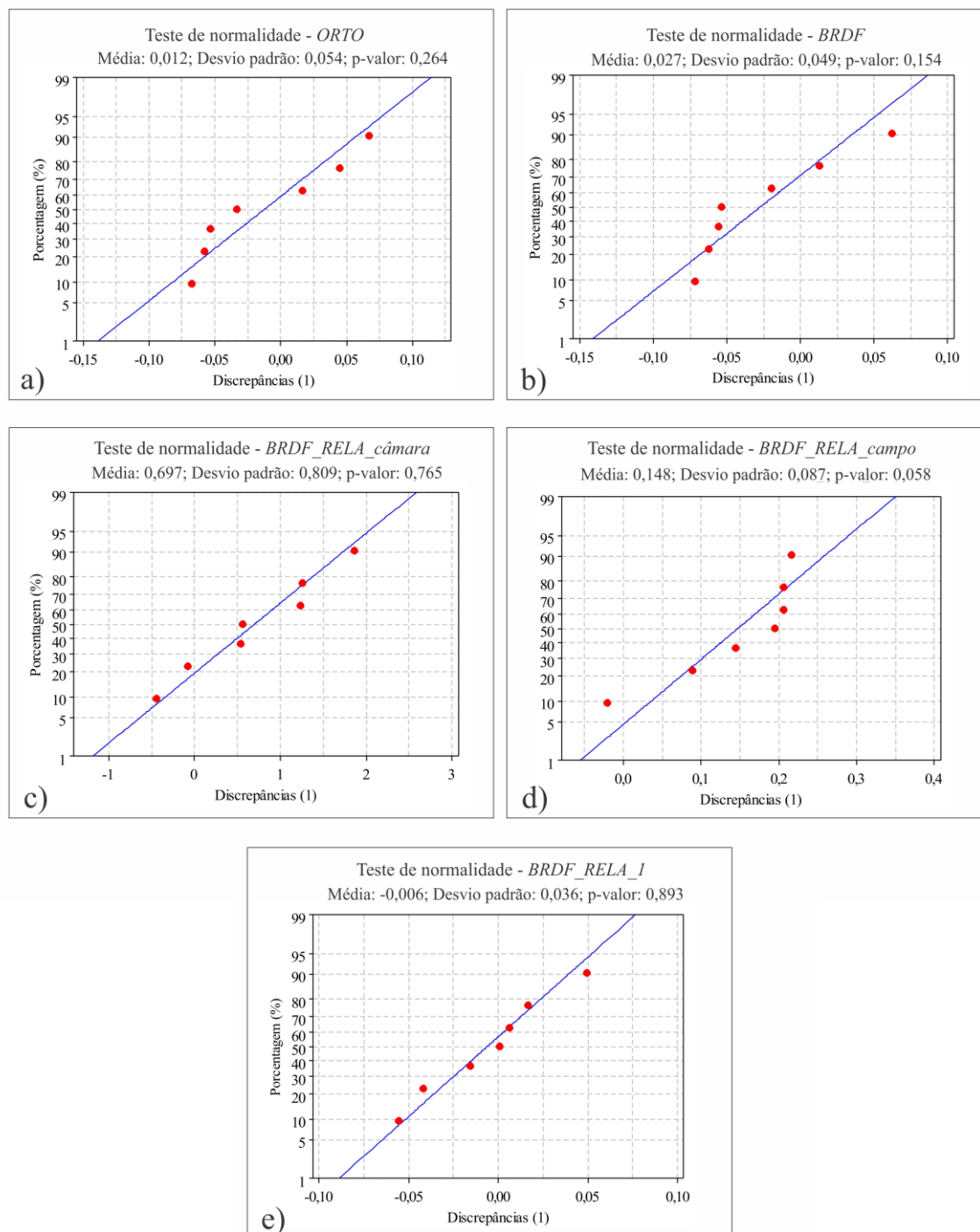
Observando a Figura 55 e desconsiderando as discrepâncias da correção *BRDF_rela_câmara*, tem-se que os valores de HCRF da correção *BRDF_rela_campo* foram os mais discrepantes em relação à resposta espectral de referência (campo). As respostas espectrais das correções *ORTO*, *BRDF* e *BRDF_rela* apresentaram forma similar para todos os casos. Para analisar as correções e verificar se as medidas obtidas no mosaico de imagens eram equivalentes aos dados coletados em campo, foram calculadas as discrepâncias entre os valores de HCRF de cada banda, para cada correção, em relação à resposta espectral de referência. As discrepâncias médias de cada alvo e respectivos valores de média, desvio padrão e RMSE são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Discrepâncias médias, adimensionais (1), entre as respostas espectrais extraídas do mosaico e a com uso do espectrorradiômetro.

Alvo	ORTO	BRDF	BRDF_rela_câ mara	BRDF_rela_cam po	BRDF_rela
1	-0,058	-0,056	1,858	-0,021	-0,056
2	-0,068	-0,072	-0,456	0,088	-0,042
3	0,067	0,062	1,231	0,144	0,049
4	-0,054	-0,063	-0,083	0,194	0,006
5	0,016	-0,020	0,548	0,216	0,000
6	-0,033	-0,054	0,533	0,206	-0,016
7	0,045	0,013	1,252	0,207	0,016
Média (1)	-0,012	-0,027	0,697	0,148	-0,006
Desvio padrão (1)	0,054	0,049	0,809	0,087	0,036
RMSE (%)	8,863	9,041	175,150	28,815	5,724

Previamente foi necessário verificar a normalidade das discrepâncias, a fim de atestar que elas possuíam probabilidades iguais de ocorrência e que podiam ser modeladas pela função de densidade e probabilidade normal (WOLF; GHILANI, 1997). Foi aplicado o teste de Anderson-Darling (ANDERSON; DARLING, 1952) com nível de confiança de 95%, sendo encontrado, para todos os casos, valor superior a 0,05 para o p-valor, atestando assim a normalidade dos dados de discrepâncias (Figura 56).

Figura 56 - Teste de normalidade de Anderson-Darling para as correções: a) *ORTO*; b) *BRDF*; c) *BRDF_rela_câmara*; d) *BRDF_rela_campo*; e) *BRDF_rela*.



Com a normalidade das discrepâncias verificada, aplicou-se o teste de hipótese t-Student considerando a hipótese nula de que a média das discrepâncias é igual a zero, contra a hipótese alternativa de ser diferente de zero (WOLF; GHILANI, 1997). Foram 6 graus de liberdade e 95% de nível de confiança, resultando no valor tabelado 2,44. Os valores estatísticos calculados são apresentados na Tabela 4, em que se verifica que apenas a média das

discrepâncias da *BRDF_rela_campo* não pode ser considerada igual às medidas de campo, pois o módulo do valor calculado é maior do que o valor tabelado.

Tabela 4 - Valores estatísticos calculados e resultados do teste de hipótese t-Student, que verifica se a média das discrepâncias (dados da imagem e do campo) são iguais a zero.

Correção	Valor estatístico calculado	Rejeita a hipótese alternativa?
<i>ORTO</i>	-0,593	SIM
<i>BRDF</i>	-1,471	SIM
<i>BRDF_rela_câmara</i>	2,281	SIM
<i>BRDF_rela_campo</i>	4,482	NÃO
<i>BRDF_rela</i>	-0,445	SIM

Como os valores de HCRF de quatro correções (*ORTO*, *BRDF*, *BRDF_rela_câmara* e *BRDF_rela*) podem ser considerados iguais aos coletados em campo, a aplicabilidade do método de correção radiométrico foi validada, sendo que os melhores resultados foram aqueles obtidos quando utilizados os mesmos parâmetros de correção relativa para o ajustamento radiométrico (*BRDF_rela*), pois apresentou menor média das discrepâncias, desvio padrão e RMSE. Consequentemente foi a correção utilizada para pós-processar as imagens do experimento seguinte.

4.5 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO EM NÍVEL DE COPA

Com o objetivo de obter as respostas espectrais das copas de espécies de vegetação, foram adquiridas imagens hiperespectrais em 11/08/2015 em área da gleba Ponte Branca (TRANSECTO1), com latitude e longitude aproximadas de 22°23'54"S e 52°31'17"O, respectivamente. As imagens foram adquiridas entre 14h20min00s e 14h23min40s, de modo que os ângulos solares variaram de acordo com o apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Variação do ângulo solar durante a aquisição das imagens em 11/08/2015.

Horário	Azimute solar	Zenital solar
14h20min00s	323°22'12"	135°30'00"
14h23min40s	322°21'36"	136°00'36"

Fonte: < <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/> >

As imagens foram adquiridas com a Configuração 1 da câmara hiperespectral (item 4.3) por não abranger cultura canavieira e o processamento foi realizado com a mesma metodologia aplicada anteriormente (item 4.4). Inicialmente foi aplicada a correção da corrente

escura com imagem adquirida antes do voo do VANT. Na sequência as imagens adquiridas em diferentes bandas espectrais foram co-registradas para corrigir os deslocamentos relativos entre bandas de uma mesma cena. Com os dados provenientes do receptor GNSS e IMU, os POE foram refinados por meio do processo de fototriangulação no módulo fotogramétrico do *ERDAS Imagine*.

Para geração do MDS da área imageada, foram utilizadas imagens coloridas adquiridas com câmara digital modelo *NEX 7* e marca *Sony*. Essas imagens foram fototrianguladas no módulo fotogramétrico do *ERDAS Imagine*, onde também foi gerado MDS com resolução espacial de 50 cm. Esse MDS foi reamostrado para resolução espacial de 15 cm com finalidade de gerar o mosaico de ortofotos das imagens adquiridas com a câmara Rikola com maior resolução espacial.

Com o MDS de 15 cm de resolução, POI da câmara, POE das imagens e parâmetros de correção relativa iniciais iguais, abordagem adotada com base nos resultados do experimento que verificou que a correção *BRDF_rela* era a mais adequada (item 4.4), gerou-se o mosaico ajustado radiometricamente utilizando o programa *RadiometricBlockAdjustment-2015-07-30-sea200*, porém, sem a transformação da imagem para valores de HCRF pelo método da linha empírica, aplicado somente na última etapa desse processo.

Três alvos de EVA foram utilizados para aplicação do método da linha empírica, um branco, um preto e um cinza. Ao final do processamento radiométrico e calculado os valores de HCRF, não foi realizada a validação desses processamentos, realizada em experimento anterior descrito no item 4.4. O mosaico gerado é apresentado na Figura 57, que também apresenta os alvos utilizados como referência para o método da linha empírica.

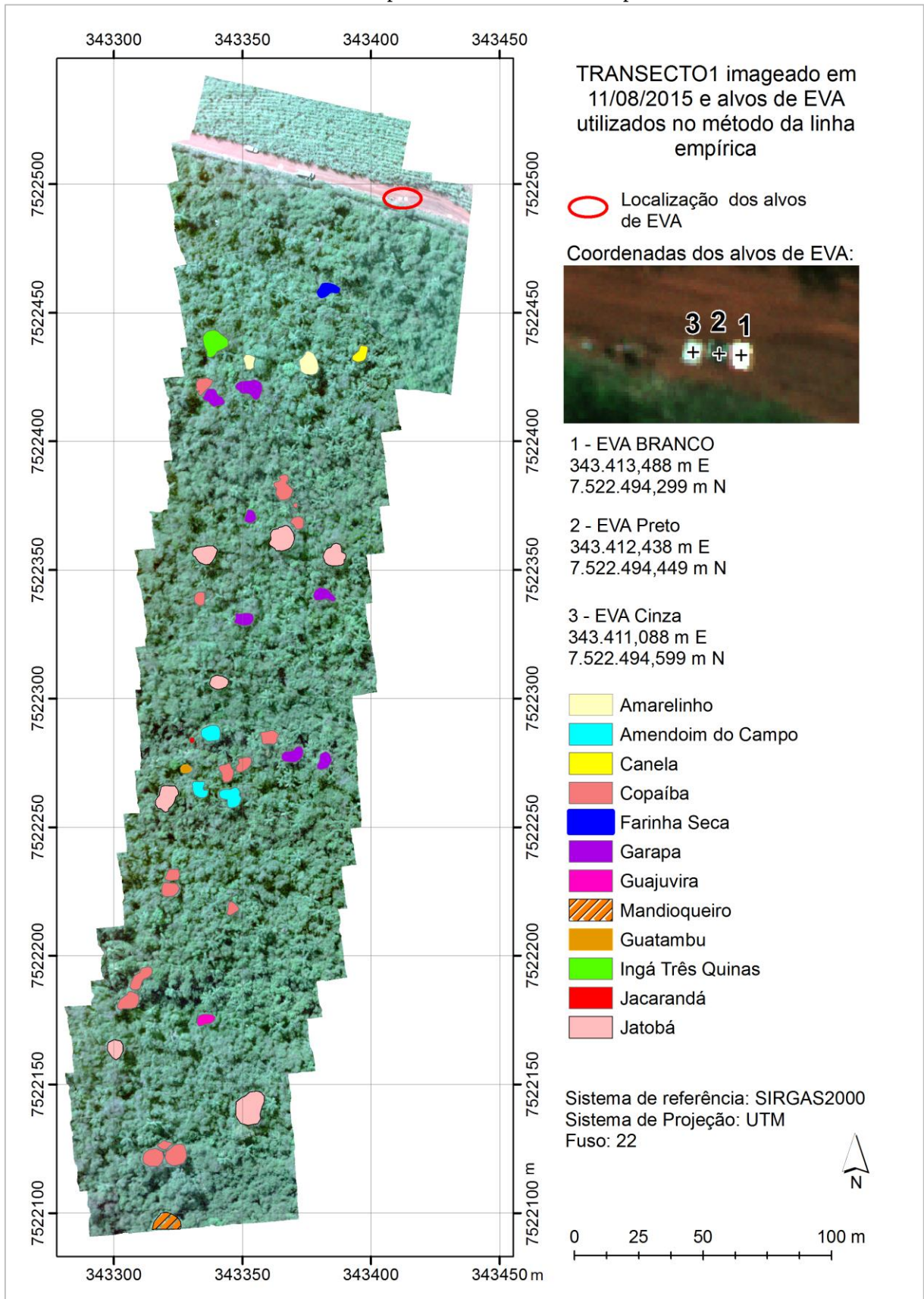
Para realizar a caracterização espectral da vegetação em nível de copa, foi necessária a realização de trabalho de campo para reconhecimento das espécies secundárias e clímax. Tais espécies possuem importante papel para o monitoramento e classificação do estágio sucessional das florestas com dados de campo (BRASIL, 1993; IBGE, 2012). Ainda foram reconhecidas espécies primárias que se destacavam no mosaico de imagens. A identificação das espécies localizadas no mosaico de imagens foi realizada pelo guia do trabalho de campo. O Quadro 7 apresenta características das espécies identificadas e a Figura 57 ilustra as copas das espécies delimitadas manualmente.

Quadro 7 - Características das espécies de vegetação cujas copas foram delimitadas no mosaico de imagens hiperspectrais.

Nome popular	Nome Científico	Floresce em	Frutos	Altura (m)	Diâmetro à Altura do Peito (cm)	Comprimento das folhas (cm)
amarelinho	<i>Helietta apiculata</i>	Novembro-Dezembro	Março-Maio	5-18	30-50	1,5-4
amendoim do campo	<i>Platypodium elegans</i>	Agosto-Setembro	Setembro-Outubro	8-12	40-50	2-4
canela	<i>Nectanara megapotamica</i>	Junho-Setembro	Novembro-Janeiro	15-25	40-60	8-14
copaíba	<i>Copaifera langsdorffii</i>	Dezembro-Março	Agosto-Setembro*	10-15	50-80	4-5
farinha seca	<i>Ouratea castaneifolia</i>	Outubro-Novembro	Novembro-Dezembro	8-14	30-50	14-20
garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>	Agosto-Setembro**	Janeiro-Fevereiro	25-35	60-90	5-13
guajuvira	<i>Cordia americana</i>	Setembro-Novembro***	Novembro-Dezembro	10-25	70-80	3-6
guatambu	<i>Aspidosperma subincanum</i>	Setembro-Novembro***	Agosto-Setembro	5-20	40-50	9-15
ingá três quinas	<i>Inga vera</i>	Agosto-Novembro	Dezembro-Fevereiro	5-10	20-30	4-14
jacarandá	<i>Machaerium nyctitans</i>	Fevereiro-Maio	Setembro-Outubro	8-18	40-70	2-3
jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Outubro-Dezembro	A partir de Julho	15-20	Até 100	6-14
mandioqueiro	<i>Didymopanax morototonii</i>	Março-Maio	Agosto-Outubro	7-30	60-90	12,5-40

*Árvore quase sem folhas. **Árvore completamente sem folhas. *** Árvore com nova folhagem.
Fonte: Lorenzi (2008).

Figura 57 - Mosaico de imagens de 11/08/2015 com os polígonos das copas das árvores e, alvos de EVA utilizados para o método da linha empírica.

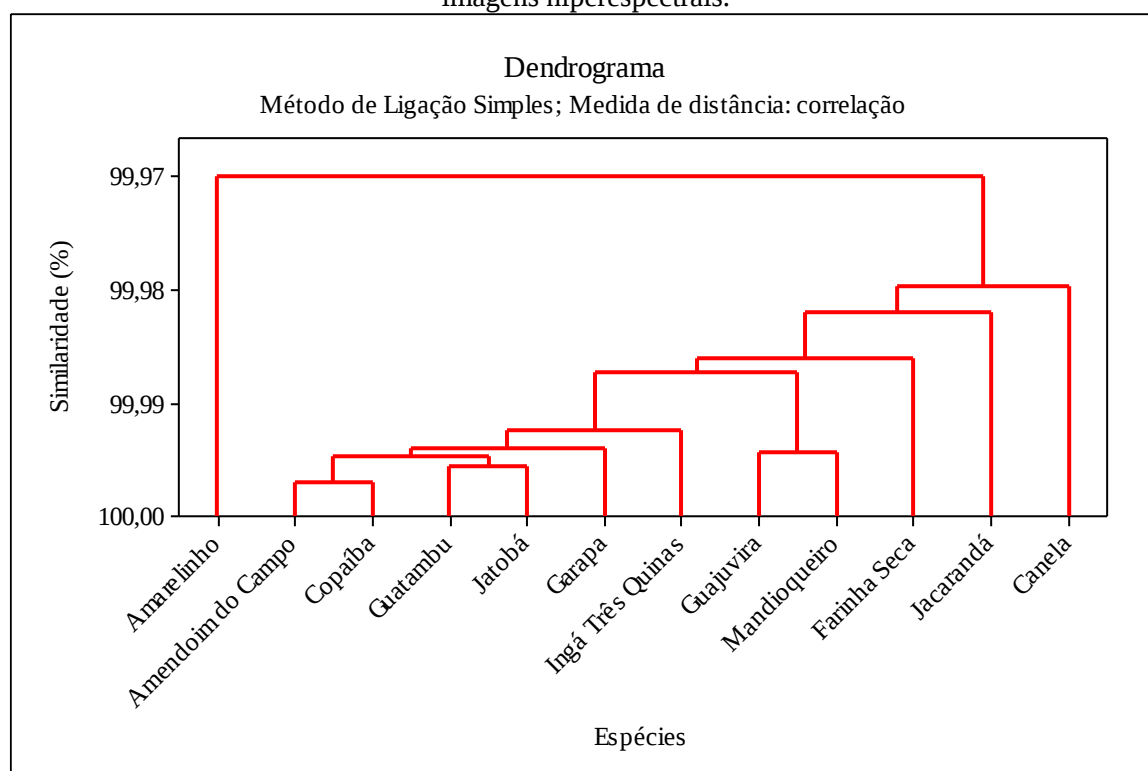


A resposta espectral da copa de cada espécie foi calculada pela média aritmética dos valores de HCRF do polígono da copa. Quando identificada mais de uma unidade para determinada espécie, calculou-se a média aritmética entre os valores de HCRF de cada copa. Os valores de HCRF de cada espécie são apresentados na Figura 58 e os respectivos valores de desvio padrão, calculados pela propagação de erros, são apresentados na Figura 59.

Em relação à forma das respostas espectrais apresentadas, nota-se que todas aparentam ser semelhantes, possuindo maior variação de intensidade na borda do vermelho e infravermelho próximo. Tem-se também que não há picos nas respostas espectrais na região do visível, principalmente na região da luz verde. Para tais respostas, é necessário considerar que ao delimitar as copas, havia áreas sombreadas, presença dos galhos, presença de folhas de outras espécies e até influência dos estratos inferiores, que alteram a resposta espectral ao longo do espectro eletromagnético.

A similaridade das respostas espectrais foi confirmada por meio da análise de agrupamento realizada no programa Minitab 16.2.0. Foi utilizado Método de Ligação Simples e correlação como medida de distância. Como critério para agrupamento de classes foi utilizada a similaridade de 95%. Os resultados são apresentados na Figura 60, onde é possível verificar que todas as respostas espectrais apresentam similaridade superior a 99,90%, o que poderia resultar em confusão na classificação da imagem considerando as diferentes espécies como classes.

Figura 60 - Dendrograma da análise de agrupamento das respostas espectrais obtidas no mosaico das imagens hiperespectrais.



Considerando a similaridade das respostas espectrais, foram calculados sete índices de vegetação com a finalidade de acentuar as diferenças entre as respostas espectrais destas espécies. Os índices aplicados foram: i) SIPI; ii) PSSRa; iii) PSSRb; iv) PRI; v) PSRI;

vi) NDVI; e, vii) REP. Todos os índices de vegetação foram adaptados para as bandas espectrais da câmara hiperespectral, sendo adotado como critério de escolha, a banda espectral mais próxima do comprimento de onda do índice de vegetação. A adaptação foi necessária devido aos fatores limitantes da câmara hiperespectral, que já tem comprimento de onda e FWHM pré-definidos.

No SIPI foram utilizadas as bandas de 819,74 nm e 506,07 nm no numerador do índice e 819,74 nm e 680,06 nm no denominador do índice. A banda centrada em 819,74 nm também foi adotada como numerador dos índices PSSRa e PSSRb, que tiveram como denominadores as bandas centradas em 680,06 nm e 629,23 nm, respectivamente. Já para a aplicação do PSRI foram escolhidas as bandas 749,65 nm, 680,06 nm e 506,07 nm. Por fim, a região do infravermelho próximo escolhida para aplicação do NDVI foi a centrada em 749,65 nm e 650,28 nm para a região do vermelho.

O cálculo da REP foi adaptado do método de Cho e Skidmore (2006), sendo que as curvas espectrais resultantes da primeira derivada não foram suavizadas para não alterar a derivada de segunda ordem. Esse método foi escolhido por ser mais robusto que os métodos de Guyot e Baret (1988) e Dawson e Curran (1998), pois calcula as respostas espectrais mínimas e máximas entre os intervalos de 680 nm e 700 nm e, 725 nm e 760 nm para cálculo da REP, resultando em uma maior variância nos valores de REP. Os resultados dos índices são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Índices de vegetação, média e desvio padrão, dos valores de HCRF obtidos no mosaico de imagens hiperespectrais.

Índice de vegetação		SIPI (1)	PSSR_a (1)	PSSR_b (1)	PRI (1)	PSRI (1)	NDVI (1)	REP (nm)
Espécie	amarelinho	0,956	15,762	0,207	0,028	-0,049	0,874	720,772
	amendoim do campo	0,973	17,234	0,153	0,026	-0,031	0,878	723,197
	canela	0,970	19,839	0,242	0,035	-0,036	0,894	723,233
	copaíba	0,967	15,448	0,097	0,007	-0,038	0,862	721,442
	farinha seca	0,989	18,205	0,152	0,067	-0,014	0,882	721,171
	garapa	0,971	14,950	0,112	0,020	-0,035	0,856	719,429
	guajuvira	0,984	14,994	0,234	0,026	-0,019	0,873	724,257
	guatambu	0,962	14,943	0,350	0,009	-0,044	0,847	723,969
	ingá três quinas	0,952	22,423	0,530	-0,030	-0,056	0,882	725,746
	jacarandá	0,998	14,963	0,137	0,052	-0,002	0,854	723,054
	jatobá	0,958	18,521	0,161	-0,010	-0,049	0,879	722,349
	mandioqueiro	0,988	12,031	0,259	0,014	-0,013	0,814	724,828
Média		0,972	16,609	0,220	0,020	-0,032	0,866	722,787
Desvio padrão		±0,015	±2,775	±0,121	±0,026	±0,017	±0,022	±1,831

Como os índices possuem diferentes escalas, os dados foram padronizados pela média e desvio padrão (JOHNSON; WINCHERN, 2007) e são apresentados na Tabela 7. No entanto, para verificar a possibilidade de utilizar um número menor de índices de vegetação, foi calculada a correlação entre eles (Tabela 8) utilizando o programa Minitab 16.2.0.

Tabela 7 - Índices de vegetação padronizados das espécies de vegetação identificadas no mosaico de imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.

Índice de vegetação		SIPI (1)	PSSRa (1)	PSSRb (1)	PRI (1)	PSRI (1)	NDVI (1)	REP (1)
Espécie	amarelinho	0,956	-0,305	-0,106	0,315	-0,976	0,874	-1,101
	amendoim do campo	0,973	0,225	-0,548	0,220	0,049	0,878	0,224
	canela	0,970	1,164	0,182	0,574	-0,246	0,894	0,243
	copaíba	0,967	-0,419	-1,010	-0,525	-0,349	0,862	-0,735
	farinha seca	0,989	0,575	-0,558	1,820	1,109	0,882	-0,883
	garapa	0,971	-0,598	-0,887	-0,003	-0,147	0,856	-1,834
	guajuvira	0,984	-0,582	0,118	0,213	0,790	0,873	0,803
	guatambu	0,962	-0,600	1,077	-0,435	-0,679	0,847	0,646
	ingá três quinas	0,952	2,095	2,562	-1,938	-1,439	0,882	1,616
	jacarandá	0,998	-0,593	-0,680	1,208	1,774	0,854	0,146
	jatobá	0,958	0,689	-0,479	-1,190	-1,016	0,879	-0,240
	mandioqueiro	0,988	-1,650	0,329	-0,260	1,130	0,814	1,115

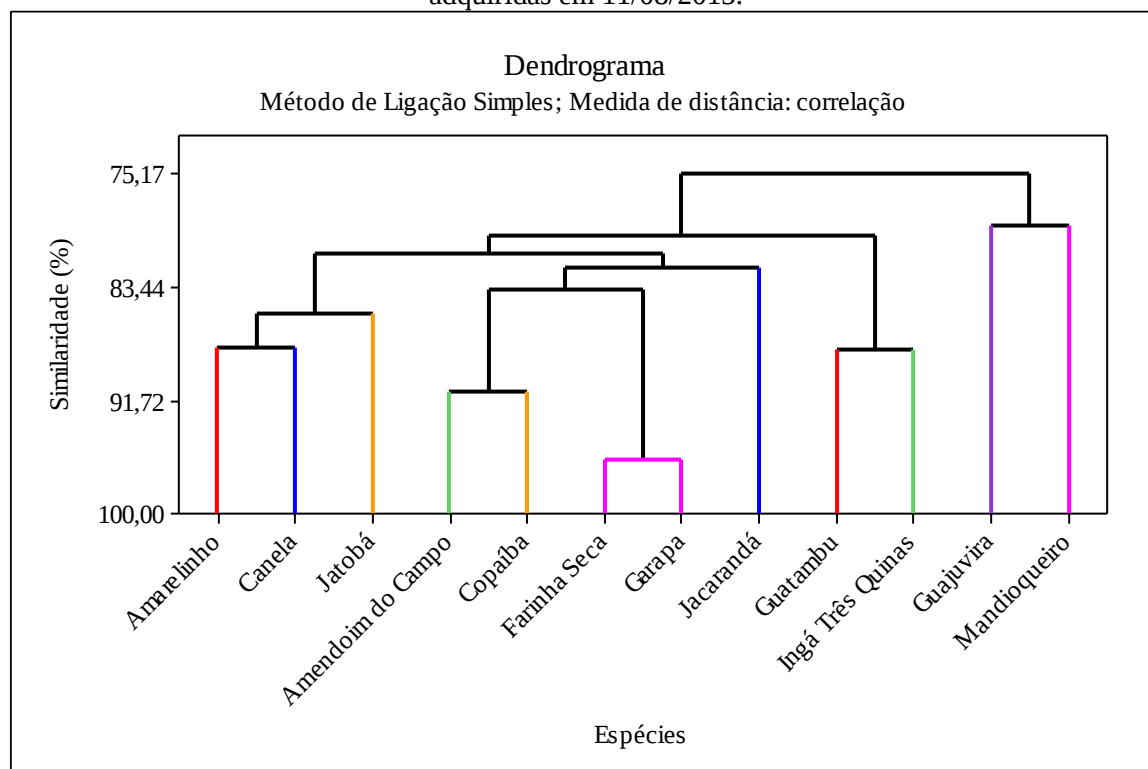
Tabela 8 - Correlação entre os índices de vegetação padronizados calculados a partir do mosaico de imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.

	SIPI	PSSRa	PSSRb	PRI	PSRI	NDVI	REP
SIPI	1,000	-	-	-	-	-	-
PSSRa	-0,490	1,000	-	-	-	-	-
PSSRb	-0,419	0,449	1,000	-	-	-	-
PRI	0,726	-0,285	-0,571	1,000	-	-	-
PSRI	0,998	-0,526	-0,434	0,734	1,000	-0,387	-
NDVI	-0,364	0,814	0,025	0,070	-0,387	1,000	-
REP	0,037	0,182	0,747	-0,404	0,018	-0,161	1,000

Analisando os valores de correlação entre os índices padronizados, notou-se que o SIPI e o PSSRa possuem as maiores correlações positivas com os demais índices. Logo, visando a utilização de um número menor de índices espectrais optou-se pela retirada desses dois índices e realização da análise de agrupamento no programa Minitab 16.2.0. Os critérios utilizados na análise de agrupamento foram a correlação como medida de distância e Método

de Ligação Simples, agrupando as espécies que possuísem mais do que 95% de similaridade. Os resultados da análise de agrupamento são ilustrados no dendrograma da Figura 61.

Figura 61 - Dendrograma da análise de agrupamento dos índices de vegetação padronizados, calculados com as respostas espectrais das espécies obtidas no mosaico das imagens hiperespectrais adquiridas em 11/08/2015.



Na análise de agrupamento da Figura 61 tem-se que a maioria das espécies são discriminadas. Foram geradas 11 classes, sendo que apenas a farinha seca e a garapa foram agrupadas, ou seja, possuem similaridade maior que 95%. Logo, pode-se concluir que embora os espectros de HCRF dos dosséis possuam elevado grau de similaridade, superior a 99,90%, o uso combinado dos índices de vegetação padronizados viabiliza a discriminação das espécies, o que pode auxiliar a classificação das imagens hiperespectrais quando consideradas as diferentes espécies de vegetação existentes.

Sobre a caracterização espectral dos dosséis, é necessário ressaltar que ela foi realizada utilizando imagens adquiridas no dia 11/08/2015. Nesta época a estação climática é o inverno, considerado mais seco e menos úmido na região Sudeste se comparado com as outras estações climáticas (MAPA; INMET, 2015). Segundo INMET (2015), não houve precipitação pluviométrica desde o dia 26/07/2015 sendo então adquiridas as imagens em período seco. Além da estação climática há também a fenologia da vegetação, que engloba o período de florescência e maturação dos frutos, diferente para cada espécie. A fenologia das espécies identificadas nas imagens pode ser vista em Lorenzi (2008).

Por fim, tem-se que as imagens utilizadas têm GSD de 15 cm e as respostas espectrais consideraram não apenas as folhas de vegetação das espécies. As respostas espectrais foram influenciadas pela presença de áreas sombreadas, galhos, solo (dependendo da densidade da copa e tamanho das folhas), folhas de outras espécies, estratos inferiores, cipós e lianas nas copas delimitadas. A presença destes alvos dificulta a discriminação das espécies utilizando somente a resposta espectral.

4.6 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL EM NÍVEL FOLIAR REALIZADA EM LABORATÓRIO

Como as respostas espectrais em nível de copa e foliar diferem, folhas de vegetação foram coletadas entre os dias 03/12/2015 e 04/12/2015, no TRASECTO1, pelo guia dos trabalhos de campo para a caracterização espectral em nível foliar realizada em laboratório. A caracterização espectral foliar não foi realizada em campo logo após a coleta das folhas devido: i) à presença de árvores e cipós dentro floresta, que atenuam a REM incidente, e; ii) à insuficiência da REM incidente fora da floresta devido ao tempo de deslocamento e permanência dentro da floresta.

Os nomes populares das espécies coletadas e respectivos nomes científicos são apresentados no Quadro 8, extraídos de Lorenzi (2008) que também apresenta as características destas espécies.

Quadro 8 - Nome científico das espécies de folhas coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015 para caracterização espectral em nível foliar.

Nome Popular	Nome Científico	Floresce em	Frutos	Altura (m)	Diâmetro à Altura do Peito (cm)	Comprimento das folhas (cm)
abiu	<i>Pouteria ramiflora</i>	Agosto-Outubro	Janeiro-Fevereiro	15-30	40-60	7-12
amarelinho	<i>Helietta apiculata</i>	Novembro-Dezembro	Março-Maio	5-18	30-50	1,5-4
amendoim do campo	<i>Platypodium elegans</i>	Agosto-Setembro	Setembro-Outubro	8-12	40-50	2-4
canela	<i>Nectanara megapotamica</i>	Junho-Setembro	Novembro-Janeiro	15-25	40-60	8-14
copaíba	<i>Copaifera langsdorffii</i>	Dezembro-Março	Agosto-Setembro*	10-15	50-80	4-5
farinha seca	<i>Ouratea castaneifolia</i>	Outubro-Novembro	Novembro-Dezembro	8-14	30-50	14-20
garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>	Agosto-Setembro**	Janeiro-Fevereiro	25-35	60-90	5-13
guajuvira	<i>Cordia americana</i>	Setembro-Novembro***	Novembro-Dezembro	10-25	70-80	3-6
ingá três quinas	<i>Inga vera</i>	Agosto-Novembro	Dezembro-Fevereiro	5-10	20-30	4-14
ipê amarelo do cerrado	<i>Tabebuia caraiba</i>	Setembro-Novembro	Setembro-Outubro	20-40	40-80	10-20
ipê tabaco	<i>Zeyheria tuberculosa</i>	Novembro-Janeiro	Julho-Setembro	15-23	40-60	40-60
jacarandá	<i>Machaerium nyctitans</i>	Fevereiro-Maio	Setembro-Outubro	8-18	40-70	2-3
jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Outubro-Dezembro	A partir de Julho	15-20	Até 100	6-14
jequitibá rosa	<i>Cariniana legalis</i>	Dezembro-Fevereiro	Agosto-Setembro	30-50	70-100	4-8
mandioqueiro	<i>Didymopanax morototonii</i>	Março-Maio	Agosto-Outubro	7-30	60-90	12,5-40
maria mole	<i>Dilodendron bipinnatum</i>	Maio-Junho	Setembro-Novembro	5-10	40-60	3-4,5

Fonte: Lorenzi (2008).

No total, foram realizadas 50 medidas radiométricas para cada espécie, distribuídas em cinco diferentes folhas, para uma medida mais acurada da resposta espectral das espécies. As medidas radiométricas foram realizadas entre 4 e 7 horas após a coleta utilizando a mesma geometria descrita no item 3.3.2 sobre caracterização espectral foliar. Foi calculada a média aritmética dos 50 valores de CCRF obtidos, aplicado o filtro de média móvel de tamanho 7 e calculado o desvio padrão dos valores de CCRF por meio da propagação de erros. Os valores de CCRF e respectivos desvios padrão são apresentados nas Figuras 62 e 63.

Figura 62 - CCRF de folhas de espécies de vegetação coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.

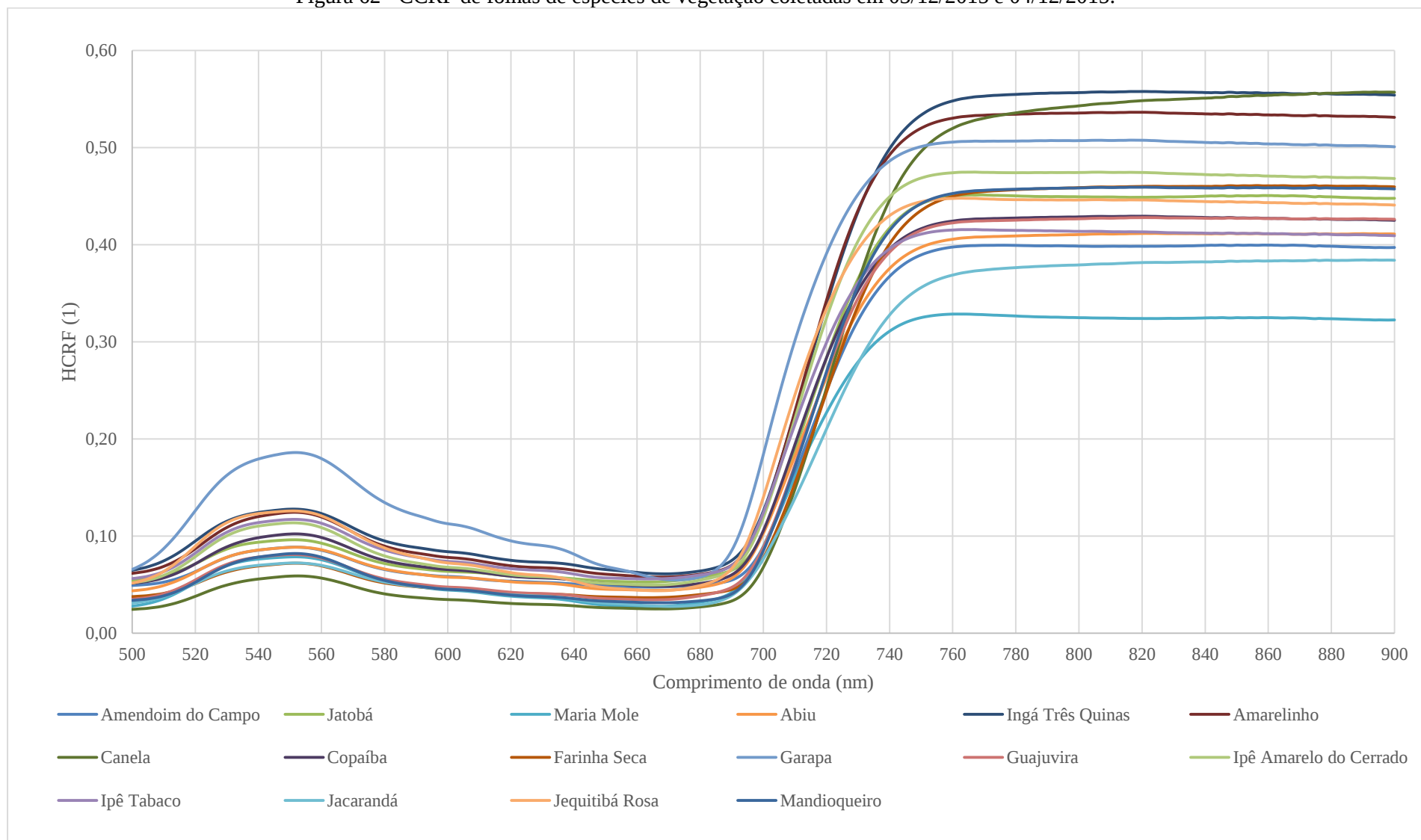
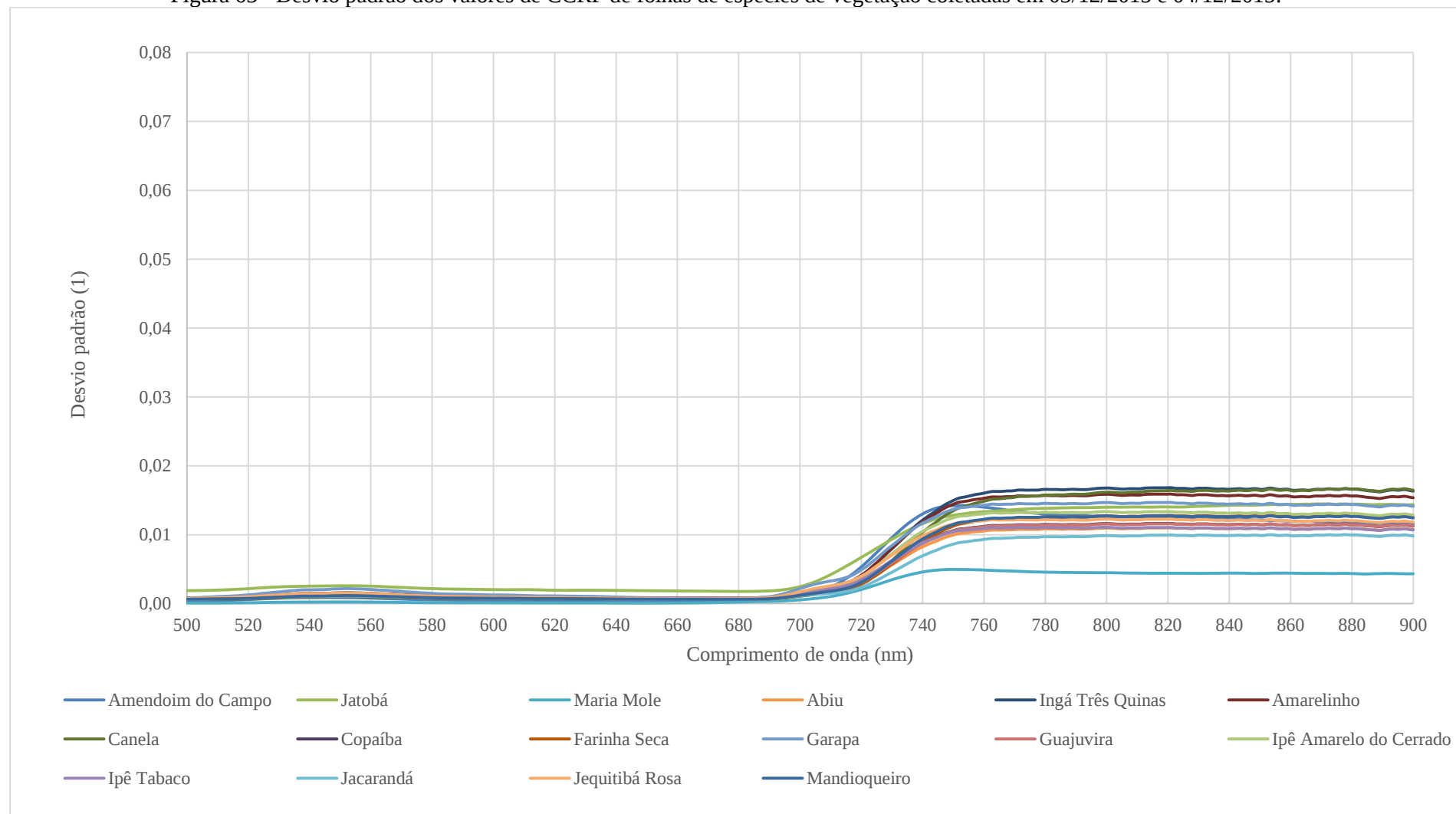


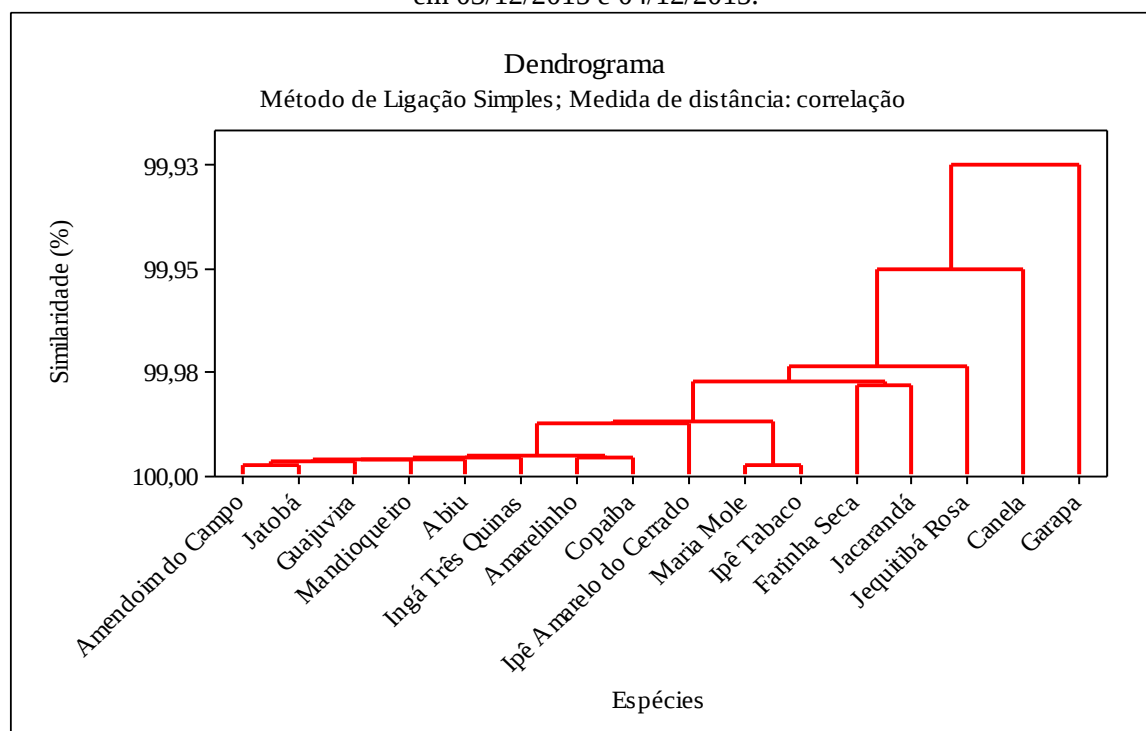
Figura 63 - Desvio padrão dos valores de CCRF de folhas de espécies de vegetação coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.



Os valores de CCRF das espécies de vegetação apresentam maiores diferenças do que os valores de HCRF das copas e menores desvios padrão. Tais diferenças podem ser causadas por alguns fatores como: i) a maior resolução espectral do espectrorradiômetro, cuja resolução é 1 nm; ii) ausência do espalhamento volumétrico uma vez que as medidas foram em uma folha e não no conjunto de folhas, e; iii) ausência de outros alvos que possam interferir na resposta espectral da folha (galhos, sombra, cipós, lianas, entre outros).

A semelhança entre as respostas espectrais foi verificada pela análise de agrupamento realizada no programa Minitab 16.2.0, utilizando como medida de similaridade a correlação e 95% de similaridade como critério para agrupar duas espécies. O dendrograma da análise de agrupamento é ilustrado na Figura 64, onde nota-se que todas as respostas espectrais possuem similaridade superior à 99,90%.

Figura 64 - Dendrograma da análise de agrupamento das respostas espectrais das folhas adquiridas em 03/12/2015 e 04/12/2015.



Com a finalidade de ressaltar as diferenças entre as respostas espectrais, foram calculados os mesmos índices de vegetação calculados para as respostas espectrais extraídas das imagens hiperespectrais: i) SIPI; ii) PSSR_a; iii) PSSR_b; iv) PRI; v) PSRI; vi) NDVI, e; vii) REP.

Para os índices SIPI, PSSR_a, PSSR_b, PRI e PSRI não foi necessária a modificação das bandas espectrais presentes na literatura (GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992; PEÑUELAS; BARET; FILELLA, 1995; BLACKBURN, 1998; MERZLYAK et al.,

1999; SIMS; GAMON, 2002), pois as respostas espectrais obtidas em laboratório abrangem os comprimentos de onda utilizados nos índices. Para o NDVI foram escolhidas as bandas centradas em 750 nm e 650 nm, por estarem localizados, respectivamente, no infravermelho próximo e vermelho (SIMS; GAMON, 2002; JENSEN, 2005). O cálculo da REP utilizou o método adaptado de Cho e Skidmore, pois não foi realizada a suavização da primeira derivada devido ao Filtro de Média Móvel aplicado anteriormente. Os resultados dos índices são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Índices de vegetação, média e desvio padrão, dos valores de CCRF das folhas coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.

Índices de vegetação		SIPI (1)	PSSR _a (1)	PSSR _b (1)	PRI (1)	PSRI (1)	NDVI (1)	REP (nm)
Espécie	amarelinho	0,998	8,843	8,048	0,031	-0,002	0,791	710,464
	amendoim do campo	1,002	8,029	7,724	0,027	0,002	0,779	713,071
	canela	1,005	20,154	18,732	0,021	0,005	0,900	720,726
	copaíba	1,000	8,386	7,643	0,023	0,000	0,782	707,796
	farinha seca	1,005	11,560	11,494	0,033	0,005	0,842	717,439
	garapa	0,982	8,797	5,815	0,024	-0,016	0,759	697,170
	guajuvira	1,009	11,100	10,678	0,044	0,009	0,842	711,732
	jacarandá	0,995	13,002	10,281	0,032	-0,005	0,840	713,628
	jatobá	1,017	5,674	5,235	0,036	0,014	0,717	713,237
	mandioqueiro	0,999	13,805	12,457	0,039	-0,001	0,862	713,063
	maria mole	1,014	10,219	9,264	0,044	0,012	0,837	704,716
	ipê amarelo do cerrado	1,006	8,712	8,330	0,043	0,006	0,803	707,699
	ipê tabaco	1,011	6,906	6,549	0,033	0,009	0,757	703,869
	jequitibá rosa	0,994	9,100	7,786	0,053	-0,005	0,810	700,340
	abiu	1,010	8,687	8,129	0,025	0,009	0,796	708,409
	ingá três quinas	0,998	8,707	7,727	0,036	-0,001	0,781	712,247
Média		1,003	10,105	9,118	0,034	0,002	0,806	709,725
Desvio padrão		±0,009	±3,401	±3,2269	±0,009	±0,008	±0,046	±6,088

De forma semelhante aos índices de vegetação calculados para os valores de HCRF (item 4.5) os resultados destes índices foram padronizados (Tabela 10) pela média e desvio padrão por não estarem na mesma de grandeza. Em seguida foi calculada a correlação

entre os índices padronizados visando o uso de um número menor de índices de vegetação. A correlação foi calculada no programa Minitab 16.2.0 e os valores resultantes são apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 - Índices de vegetação padronizados dos valores de CCRF obtidos pela espectroscopia de laboratório.

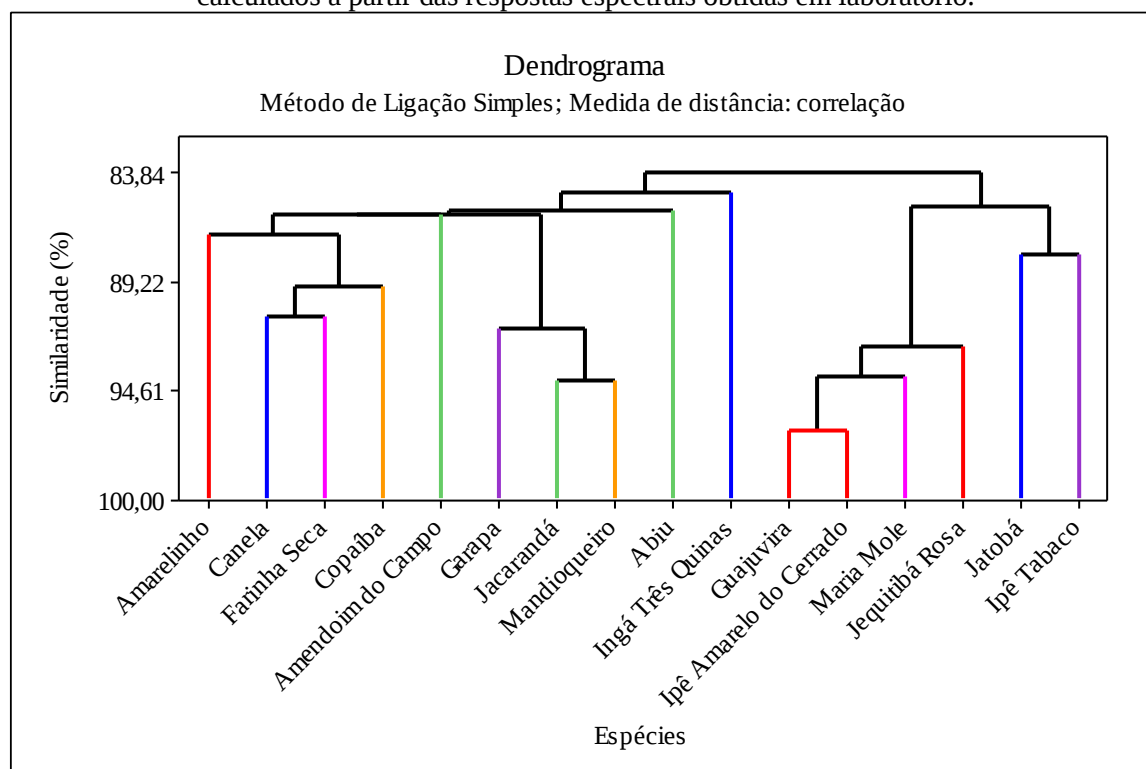
Índices de vegetação		SIPI (1)	PSSRa (1)	PSSRb (1)	PRI (1)	PSRI (1)	NDVI (1)	REP (nm)
Espécie	amarelinho	-0,564	-0,371	-0,332	-0,367	-0,569	-0,329	0,121
	amendoim do campo	-0,132	-0,610	-0,432	-0,769	-0,128	-0,593	0,549
	canela	0,236	2,954	2,979	-1,417	0,335	2,047	1,807
	copaíba	-0,373	-0,505	-0,457	-1,266	-0,372	-0,532	-0,317
	farinha seca	0,256	0,428	0,736	-0,154	0,307	0,786	1,267
	garapa	-2,349	-0,385	-1,024	-1,079	-2,368	-1,026	-2,062
	guajuvira	0,750	0,293	0,483	1,168	0,811	0,789	0,330
	jacarandá	-0,897	0,852	0,360	-0,259	-0,956	0,746	0,641
	jatobá	1,639	-1,303	-1,203	0,192	1,486	-1,944	0,577
	mandioqueiro	-0,461	1,088	1,035	0,514	-0,470	1,214	0,548
	maria mole	1,264	0,033	0,045	1,131	1,291	0,674	-0,823
	ipê amarelo do cerrado	0,409	-0,409	-0,244	1,023	0,418	-0,064	-0,333
	ipê tabaco	0,899	-0,941	-0,796	-0,104	0,864	-1,075	-0,962
	jequitibá rosa	-1,029	-0,296	-0,413	2,092	-1,031	0,073	-1,542
	abiu	0,857	-0,417	-0,307	-0,978	0,894	-0,226	-0,216
	ingá três quinas	-0,505	-0,411	-0,431	0,274	-0,510	-0,540	0,414

Tabela 11 - Correlação entre os índices de vegetação padronizados calculados para as respostas espectrais das folhas coletadas em 03/12/2015 e 04/12/2015.

	SIPI	PSSRa	PSSRb	PRI	PSRI	NDVI	REP
SIPI	1,000	-	-	-	-	-	-
PSSRa	-0,121	1,000	-	-	-	-	-
PSSRb	0,062	0,970	1,000	-	-	-	-
PRI	0,183	-0,185	-0,148	1,000	-	-	-
PSRI	0,998	-0,088	0,098	0,178	1,000	-	-
NDVI	-0,027	0,907	0,917	0,090	0,013	1,000	-
REP	0,339	0,555	0,659	-0,271	0,351	0,474	1,000

Analisando a Tabela 11, verifica-se que o SIPI e o PRRS_a possuem as maiores correlações positivas entre os índices, resultado semelhante ao encontrado para os índices calculados para os espectros de HCRF (item 4.5). Esses índices não foram utilizados na análise de agrupamento, que utilizou o Método de Ligação Simples e correlação como medida de similaridade. A análise de agrupamento foi realizada no programa Minitab 16.2.0 e seu resultado é apresentado no dendrograma da Figura 65.

Figura 65 - Dendrograma da análise de agrupamento dos índices de vegetação padronizados calculados a partir das respostas espectrais obtidas em laboratório.



Pelos resultados da análise de agrupamento dos índices padronizados (Figura 65), verificou-se que apenas a guajuvira e o ipê amarelo do cerrado possuem similaridade maior que 95%. Ou seja, a discriminação das espécies, utilizando os índices padronizados, é maior do que quando apenas utilizadas as respostas espectrais logo, podem ser variáveis indicadas para a classificação de espécies.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa consiste na caracterização espectral de espécies de Mata Atlântica de Interior utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, visando contribuir para o monitoramento de fragmentos de remanescentes florestais de Mata Atlântica de Interior do Estado de São Paulo. Os objetivos foram alcançados por meio da especificação das bandas espectrais da câmara Rikola (Experimento 4.3), validação da metodologia de processamento das imagens (Experimento 4.4) e caracterização espectral de espécies de vegetação em nível foliar e de copa (Experimentos 4.5 e 4.6).

A metodologia descrita considerou as características da área de estudo e dos sensores utilizados. Ela pode ser utilizada para definição de bandas espectrais de diferentes sensores, multiespectrais ou hiperespectrais, aquisição, pós-processamento e validação, de imagens, podendo ser empregada para atender outras finalidades como, por exemplo, o monitoramento de culturas agrícolas.

A caracterização espectral em nível foliar, utilizando amostras de vegetação da área de estudo e realizada por meio de espectroscopia de laboratório, foi importante para especificação das bandas espectrais a serem configuradas na câmara Rikola. Essa configuração permitiu analisar espectralmente os diferentes tipos de vegetação. A simulação espectral mostrou-se importante pois permitiu a verificação das respostas teóricas obtidas em cada banda espectral da câmara sem a necessidade de deslocamento até as áreas de interesse para aquisições de imagens em campo.

As correções da BRDF, variações de iluminação e ajustamento radiométrico em bloco são etapas importantes, e que demandam maior tempo de processamento para aquisição dos valores de HCRF nas imagens visto que durante a aquisição de imagens há alterações nas condições de iluminação e variação de atitude da plataforma do sensor, que influenciam o registro das imagens.

A validação do método de processamento das imagens foi realizada com sucesso. Foram utilizadas as respostas espectrais, obtidas em campo e no mosaico de imagens, de alvos de EVA nas cores branca, preta e cinza, que foram comparadas entre si utilizando o teste de hipóteses t-Student.

Nos experimentos realizados referentes aos métodos de processamento das imagens (Experimento 4.4), os melhores resultados de pós-processamento foram os obtidos

quando se aplicou a correção da BRDF e ajustamento radiométrico em bloco, utilizando parâmetros iniciais de correção relativa de mesmo valor (*BRDF_rela*).

O método da linha empírica, diferente da maioria dos métodos de correção atmosférica, necessita da resposta de alvos de referência nas imagens e suas respectivas respostas espectrais medidas em campo. Logo, esse método pode ser utilizado desde que se tenha alvos de referência na área de interesse e que seja realizada a medição, ou cálculo, da grandeza radiométrica na qual se deseja transformar as imagens.

A caracterização espectral em nível de copa foi realizada, em sua maioria, para espécies de vegetação secundária e clímax, cujas densidades fazem parte da caracterização dos estádios de sucessão ecológico da vegetação natural. A delimitação individual das copas só foi possível devido ao GSD do mosaico de imagens, 15 cm. Tal tarefa poderia não ser possível em imagens com menor resolução espacial (métrica).

Em nível foliar foram utilizadas medidas radiométricas, distribuídas em cinco diferentes folhas de cada espécie, coletadas em campo e armazenadas até a realização das medidas em laboratório. Os valores de CCRF calculados em nível foliar foram maiores e mais precisos do que os de HCRF das copas, pois não sofreram influência de diferentes alvos.

A análise de agrupamento das respostas espectrais da vegetação, obtidas tanto nas imagens como em laboratório, permitiu a verificação da similaridade entre elas. A similaridade entre as respostas espectrais foi minimizada com o uso de índices de vegetação que, quando padronizados, podem auxiliar na classificação de espécies. Métodos de classificação que utilizam as respostas espectrais das espécies de vegetação como referência também podem ser aplicadas.

A tecnologia existente na câmara Rikola é relativamente nova, sendo que no início do projeto foi necessário estudar e compreender a fundo seu o funcionamento e procedimentos a serem adotados para a configuração e aquisição das imagens. A largura das bandas é pré-definida para cada espaço entre os interferômetros, não sendo possível a aquisição de bandas espectrais com diferentes larguras de bandas. As correções radiométrica e da corrente escura são essenciais para a eliminação de ruídos nas imagens provenientes da ótica e da eletrônica do sensor, e realizada com uso dos parâmetros de correção radiométrica fornecidos pelo fabricante. Não se recomenda o uso das informações provenientes do sensor de irradiância da câmara para a realização das correções radiométricas das imagens em virtude da falta de informações sobre o sensor.

O processamento dos dados adquiridos pela câmara Rikola deve levar em conta a geometria de aquisição e de iluminação, o que torna o processo de aquisição de dados mais complexo se comparado aos levantamentos fotogramétricos convencionais. Além da modelagem da superfície, um dos objetivos dos levantamentos fotogramétricos convencionais, o pós-processamento das imagens da câmara Rikola objetiva produzir um mosaico cujos dados radiométricos sejam valores de HCRF.

Ao longo do desenvolvimento do projeto, ficou clara a importância da equipe de campo para a aquisição e validação dos dados, provendo o suporte necessário para a coleta de dados, desde a abertura de trilhas na floresta, reconhecimento de espécies e auxílio na operação dos equipamentos para coleta de dados. A eficiência da operação em campo mostrou-se muito importante frente à dificuldade de realização de revisitas à área. Fatores climáticos, disponibilidade de equipamentos e pessoal são condicionantes à realização dos trabalhos de campo que limitam as oportunidades de execuções dos mesmos. Outro fator importante a ser considerado para caracterização espectral é a época de aquisição dos dados de campo, devido às diferenças de florescência e maturação dos frutos de cada espécie.

Como contribuições deste projeto de mestrado têm-se a especificação das bandas espectrais mais adequadas para discriminação das espécies vegetais, elaboração de uma biblioteca com as respostas espectrais da vegetação em nível foliar e de copa, que podem ser utilizadas para a discriminação de espécies e monitoramento de fragmentos florestais, além da definição da metodologia de aquisição e processamento de imagens adquiridas com a câmara Rikola.

Para trabalhos futuros, recomenda-se testar o sensor de irradiância da câmara Rikola sob condições diferentes de orientação e luminosidade para compreensão dos dados registrados, de forma a modelar analiticamente suas respostas para que seus dados possam ser utilizados no cálculo dos fatores de correção das variações de iluminação nas imagens. Ainda recomenda-se acoplar o sensor de irradiância em suporte que compense as variações de atitude do VANT, como o *gimble* utilizado no FGI. Outras recomendações sobre o sensor de irradiância são a sua calibração em relação a outro sensor de irradiância que forneça mais informações como, por exemplo, resolução e intervalo espectral de funcionamento ou, testar outros sensores de irradiância acoplados ao VANT.

Em relação às espécies de vegetação caracterizadas espectralmente em nível de copa e foliar, recomenda-se o aumento de registros da biblioteca espectral, com a assinatura espectral de espécies de vegetação e aquisição dos dados em diferentes épocas para que se

conheça o comportamento espectral sazonal dessas espécies. Ainda se recomenda a aquisição da concentração de pigmentos das folhas e IAF, que podem ser utilizados para simulação da resposta espectral dos dosséis utilizando modelos de reflectância de dosséis vegetais como, por exemplo, o SAIL (*Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*).

Por fim, recomenda-se a conversão dos valores de CCRF das folhas para valores de HCRF para que possam ser comparados e relacionados com as respostas espectrais das copas e que sejam utilizadas as respostas espectrais das copas para mapeamento das espécies de vegetação da Mata Atlântica de Interior pertencentes à gleba Ponte Branca a partir de classificadores como o SID (Informação de Divergência Espectral, do inglês *Spectral Information Divergence*) e o SAM.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. Asymptotic Theory of Certain “Goodness of Fit” Criteria Based on Stochastic Processes. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 23, n. 2, p. 193-212, 1952.
- ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. 2 ed. Curitiba, PR: UFPR, 2003.
- ASD – Analytical Spectral Devices. **FieldSpec® UV/NIR HandHeld Spectroradiometer User’s Guide**. Boulder CO, 2002. 72 p.
- ASNER, G. P.; BRASWELL, B. H.; SCHIMEL, D. S.; WESSMAN, C. A. Ecological Research Needs from Multiangle Remote Sensing Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, n. 2, p. 155-165, 1998.
- BEISL, U. Absolute spectroradiometric calibration of the ADS40 sensor. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, 2006.
- BERVEGLIERI, A.; TOMMASELLI, A. M. G. Exterior orientation of hyperspectral frame images collected with UAV for forest applications. **Proceedings of the Calibration and Orientation Workshop – EuroCOW 2016**. Lausanne, Switzerland, 2016.
- BIRTH, G.; MCVEY, G. R. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v. 60, n. 6, p. 640-643, 1968.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **The International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 657-675, 1998.
- BORENGASSER, M.; HUNGATE, W. S.; WATKINS, R. **Hyperspectral Remote Sensing: principles and applications**. Crc Press Taylor & Francis Group, 2007. 119 p.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 10, de 1 de outubro de 1993**. Publicada no DOU no 209 de 3 de novembro de 1993, Seção 1, páginas 16497-16498. Estabelece os parâmetros básicos para análise dos estágios de sucessão de Mata Atlântica. 1993.
- BUNTING, P.; LUCAS, R. The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 230-248, 2006.
- CELES, C. H. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; CAMPOS, M. A. A.; HIGUCHI, N. Estimativa de biomassa em uma floresta tropical no município de Maués–AM, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 65/3, p. 541-554, 2013.
- CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, n. 2, p. 181-193, 2006.
- CLARK, M. L.; ROBERTS, D. A. Species-Level Differences in Hyperspectral Metrics among Tropical Rainforest Trees as Determined by a Tree-Based Classifier. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1820-1855, 2012.

CLARK, M. L.; ROBERTS, D. A.; CLARK, D. B. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3, p. 375-398, 2005.

CLEVERS, J. G. P. W. Imaging spectrometry in agriculture-plant vitality and yield indicators. **Imaging spectrometry - A tool for environmental observations**, p. 193-219. Springer, Netherlands, 1994.

CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L.; GHOLZ, H. L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. **Tree physiology**, v. 7, p. 33-48, 1990.

DAUGHTRY, C. S. T.; BIEHL, L. L. **Changes in Spectral Properties os Detached Leaves**. Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS) Technical Reports. West Lafayette, IN, 1984. 21 p.

DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J. Technical note: A new technique for interpolating the reflectance red edge position. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2133-2139, 1998.

EISENBEISS, H.; ZHANG, L. Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVI-5, p. 90-96, 2006.

EVERAERTS, J. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, p. 1187-1192, 2008.

FÉRET, J. B.; ASNER, G. P. Tree Species Discrimination in Tropical Forests Using Airborne Imaging Spectroscopy. **Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions, v. 51, n. 1, p. 73-84, 2013.

FONSECA, C. R.; CARVALHO, F. A. Aspectos florísticos e fitossociológicos da comunidade arbórea de um fragmento urbano de floresta atlântica (Juiz de Fora, MG, Brasil). **Bioscience Journal**, v. 28, n. 5, 2012.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica Período 2012-2013**. São Paulo, SP, 2014.

GALVAO, L. S.; PONZONI, F. J.; EPIPHANIO, J. C. N.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R. Sun and view angle effects on NDVI determination of land cover types in the Brazilian Amazon region with hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1861-1879, 2004.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 1, p. 35-44, 1992.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas**. Curitiba, PR: Editora UFPR, 1994. 319 p.

GETZIN, S.; WIEGAND, K.; SCHÖNING, I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, n. 2, p. 397-404, 2012.

GUYOT, G.; BARET, F. Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux. **Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing**, France, v. 287, 1988.

HAKALA, T. et al. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Rostock, Germany, v. XL-1/W2, 2013.

HOLDEN, H.; LEDREW, E. Spectral discrimination of healthy and non-healthy corals based on cluster analysis, principal components analysis, and derivative spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 2, p. 217-224, 1998.

HONKAVAARA, E.; HAKALA, T.; KIRJASNIEMI, J.; LINDFORSC, A.; MÄKYNEN, J.; NURMINEN, K.; RUOKOKOSKI, P.; SAARI, H.; MARKELIN, L. New light-weight stereoscopic spectrometric airborne imaging technology for high-resolution environmental remote sensing case studies in water quality mapping. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Hannover, Germany, v. XL-1/W1, p. 139-144, 2013a.

HONKAVAARA, E.; SAARI, H.; KAIVOSOJA, J.; PÖLÖNEN, I.; HAKALA, T.; LITKEY, P.; MÄKYNEN, J.; PESONEN, L. Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. **Remote Sensing**, v. 5, p. 5006-5039, 2013b.

HONKAVAARA, E.; KAIVOSOJA, J.; MÄKYNEN, J.; PELLIKKA, I.; PESONEN, L.; SAARI, H.; SALO, H.; HAKALA, T.; MARKELIN, L.; ROSNELL, T. Hyperspectral reflectance signatures and point clouds for precision agriculture by light weight UAV imaging system. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Melbourne, Australia, v. I-7, p. 353-358, 2012.

HORN, H. S. The ecology of secondary succession. **Annual review of ecology and systematics**, p. 25-37, 1974.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. **MODIS vegetation index (MOD13)**. Algorithm theoretical basis document, v. 3, p. 213, 1999. Disponível em < http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Sistema fitogeográfico Inventário das formações florestais e campestres. Técnicas e manejo de coleções botânicas. Procedimentos para mapeamentos. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2012. 271 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Precipitação acumulada**. 2015. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo2/mapasPrecipitacao>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

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.

Rudorff, Cláudia M. Almeida e Lênio S. Galvão. 2. ed. São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2009. 598 p.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6 ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. 773 p.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

KALACSKA, M.; BOHLMAN, S.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CASTRO-ESAU, K.; CAELLI, T. Hyperspectral discrimination of tropical dry forest lianas and trees: Comparative data reduction approaches at the leaf and canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 4, p. 406-415, 2007.

KATTENBORN, T.; MAACK, J.; FAßNACHT, F.; ENßLE, F.; ERMERT, J.; KOCH, B. Mapping forest biomass from space—Fusion of hyperspectral EO1-hyperion data and Tandem-X and WorldView-2 canopy height models. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 359-367, 2015.

KIDDER, S. Q.; HAAR, T. H. V. **Satellite Meteorology: An introduction**. 6 ed. London, UK: Gulf Professional Publishing, 1995. 466 p.

LIESENBERG, V. **Análise multi-angular de fitofisionomias do bioma cerrado com dados MISR/TERRA**. 2006. 120 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2006.

LONGHI, S. J.; BRENA, D. A.; GOMES, J. F.; NARVAES, I. D. S.; BERGER, G.; SOLIGO, A. J. Classificação e caracterização de estágios sucessionais em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista na FLONA de São Francisco de Paula. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 2, p. 113-125, 2006.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 5. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008. 384 p.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZINHO, E.; MORAN, E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. **Forest Ecology and Management**, v. 181, n. 3, p. 301-312, 2003.

LUCAS, R.; BUNTING, P.; PATERSON, M.; CHISHOLM, L. Classification of Australian forest communities using aerial photography, CASI and HyMap data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 2088-2103, 2008.

MACIEL, M. de N. M.; WATZLAWICK, L. F.; SCHOENINGER, E. R.; YAMAJI, F. M.. Classificação ecológica das espécies arbóreas. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 69-78, 2003.

MÄKYNEN, J.; HOLMLUND, C.; SAARI, H.; OJALA, K.; ANTILA, T. Unmanned aerial vehicle (UAV) operated megapixel spectral camera. **Proceedings SPIE 8186, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications V**, v. 8186, p. 81860Y-81860Y-9, 2011.

MARKELIN, L.; HONKAVAARA, E.; PELTONIEMI, J.; SUOMALAINEN, J.; AHOKAS, E. Radiometric evaluation of digital aerial cameras. **International Archives of the**

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Paris, France, v. XXXVI part 1, 2006.

MARTINUZZI, S.; GOULD, W. A.; VIERLING, L. A.; HUDAK, A. T.; NELSON, R. F.; EVANS, J. S. Quantifying tropical dry forest type and succession: substantial improvement with LiDAR. **Biotropica**, v. 45, n. 2, p. 135-146, 2013.

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

MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; RAKITIN, V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.

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

MILTON, E. J.; SCHAEPMAN, M. E.; ANDERSON, K.; KNEUBÜHLER, M.; FOX, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S92-S109, 2009.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2005. 297 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA); INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Boletim agroclimatológico mensal de agosto – 20.15**. Boletim agroclimatológico com o objetivo de fornecer informações meteorológicas que possam contribuir para o planejamento agrícola. Brasília, 2015. 46 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Mata Atlântica**. 2015. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica>>. Acesso em: 09 jun. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de manejo da Estação Ecológica Mico-Leão-Preto**. Plano de manejo feito em conjunto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Brasília, 2007. 259 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Quarto relatório nacional para a convenção Sobre diversidade biológica Brasil**. Brasília, 2011. 248 p.

MIURA, S.; AMACHER, M.; HOFER, T. SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; ERNAWATI; THACKWAY, R. Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 35-46, 2015.

MORIYA, E. A. S. **Identificação de bandas espectrais para detecção de cultura de cana-de-açúcar sadia e doente utilizando câmara hiperespectral embarcada em VANT**. 2015. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente – SP, 2015.

MORIYA, E. A. S.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; MIYOSHI, G. T. Determinação de regiões espectrais sensíveis a presença de agentes patógenos na cana-de-açúcar, caso ferrugem alaranjada e estria vermelha. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0521.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2015.

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, 1977. 52 p.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São José dos Campos, SP: Blucher, 2010. 308 p.

OLIVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; IMAI, N. N.; HONKAVAARA, E.; HYYPPÄ, J.; HAKALA, T.; JAAKKOLA, A. Avaliação do corregristo de imagens coletadas por uma câmara hiperespectral de quadro. In: XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), 2014, Gramado. **Anais...** Sociedade Brasileira de Cartografia, 2014. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/585/CT04-98_1404422_611.pdf>. Acesso em: 22 out. 2014

PANEQUE-GÁLVEZ, J; MCCALL, M. K.; NAPOLETANO, B. M.; WICH, S. A.; KOH, L. P. Small drones for community-based forest monitoring: an assessment of their feasibility and potential in tropical areas. **Forests**, v. 5, n. 6, p. 1481-1507, 2014.

PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, p. 221-230, 1995.

PIAZZA, G. A. **Processamento digital de imagens de alta resolução espacial com enfoque na classificação dos estágios sucessionais iniciais da Floresta Ombrófila Densa em Santa Catarina**. 2014. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau – SC, 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto da vegetação**. São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2007. 862 p.

PROS, A.; COLOMINA, I.; NAVARRO, J. A.; ANTEQUERA, R.; ANDRINAL, P. Radiometric block adjusment and digital radiometric model generation. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-1/W1, p. 293-298, 2013.

REES, W. G. **Physical Principles of Remote Sensing**. 2 ed. Cambridge University Press, 2007. 343 p.

RIKOLA Ltd. **The first generation of snapshot hyperspectral camera is airborne**. Kaitoväylä, Oulu. [2014a]. 1 p.

RIKOLA Ltd. **Rikola Hyperspectral Imager - Quick star Guide draft**. Kaitoväylä, Oulu. 2014b. 17 p.

ROMIJN, E.; LANTICAN, C. B.; HEROLD, M.; LINDQUIST, E.; OCHIENG, R.; WIJAYA, A.; MURDIYARSO, L. V. Assessing change in national forest monitoring capacities of 99 tropical countries. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 109-123, 2015.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA special publication**, v. 351, p. 309, 1974.

SAARI, H.; AALLOS. V. V.; AKUJÄRVI, A.; ANTILA, T.; HOLMLUND, C.; KANTOJÄRVI, U.; MÄKYNEN, J.; OLLILA, J. Novel miniaturized hyperspectral sensor for

UAV and space applications. **Proceedings SPIE 7474, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII**, v. 7474, p. 74741M-74741M-12, 2009.

SAARI, H.; PELLIKKA, I.; PESONEN, L.; TUOMINEN, S.; HEIKKILÄ, J.; HOLMLUND, C.; MÄKYNEN, J.; OJALA, K.; ANTILA, T. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications. **Proceedings SPIE 8174, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII**, v. 8174, p. 81740H-81740H-15, 2011.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

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.

SHIPPERT, P. Why use hyperspectral imagery?. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 70, n. 4, p. 377-396, 2004.

SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C.; GURIES, R. P.; RUSCHEL, A. R.; dos REIS, M. S. Secondary forest succession in the Mata Atlantica, Brazil: floristic and phytosociological trends. **ISRN Ecology**, v. 2011, 2011.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2, p. 337-354, 2002.

SMITH, G. M.; MILTON, E. J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, p. 2653-2662, 1999.

SOMERS, B.; ASNER, G. P. Hyperspectral time series analysis of native and invasive species in Hawaiian rainforests. **Remote Sensing**, v. 4, n. 9, p. 2510-2529, 2012.

SOMERS, B.; ASNER, G. P. Tree species mapping in tropical forests using multi-temporal imaging spectroscopy: Wavelength adaptive spectral mixture analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 31, p. 57-66, 2014.

SOUZA, C. L.; RIBEIRO, M. C.; PONZONI, F. J. Influência do tempo e do tipo de armazenamento na reflectância spectral de folhas de *Eucalyptus grandis* "EX-SITU". **Revista Árvore**, v. 20, p. 255-265, 1996.

STEIN, A.; VAN DER MEER, F.; GORTE, B. N. **Spatial Statistics for Remote Sensing**. Kluwer Academic Publishers, 1999. 284 p.

SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetatio**, v. 75, n. 1-2, p. 81-86, 1988.

TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 41-51, 1998.

VAN DER MEER, F. D.; JONG, S. M. de. **Imaging Spectrometry**: basic principles and prospective applications. Kluwer Academic Publishers, 2001. 403 p.

VIEIRA, I. C. G.; ALMEIDA, A. S. de; DAVIDSON, E. A.; STONE, T. A.; CARVALHO, C. J. R. de, GUERRERO, J. B. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 470-481, 2003.

WALTHALL, C. L.; NORMAN, J. M.; WELLES, J. M.; CAMPBELL, G.; BLAD, B. L. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. **Applied Optics**, v. 24, n. 3, p. 383-387, 1985.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS**. Wiley Series in Surveying and Boundary Control, 1997. 564 p.