

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Caroline Lorenci Mallmann

**ESPECTROSCOPIA DE CAMPO PARA A DISCRIMINAÇÃO DE
ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS E NATIVAS EM FLORESTA
SUBTROPICAL**

Santa Maria, RS
2021

Caroline Lorenci Mallmann

**ESPECTROSCOPIA DE CAMPO PARA A DISCRIMINAÇÃO DE ESPÉCIES
EXÓTICAS INVASORAS E NATIVAS EM FLORESTA SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS
2021

Caroline Lorenci Mallmann

**ESPECTROSCOPIA DE CAMPO PARA A DISCRIMINAÇÃO DE ESPÉCIES
EXÓTICAS INVASORAS E NATIVAS EM FLORESTA SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

Aprovado em 23 de fevereiro de 2021:

Waterloo Pereira Filho, Dr.
(Presidente/Orientador)

Evlyn Novo, Dra. (INPE) - Videoconferência

Fabio Breunig, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico as minhas filhas Helena e Yasmin.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Antônio Mallmann e Carmen Lorenci, pelo incentivo constante na minha formação.

As minhas irmãs, Camila e Kalinka, pelo apoio.

Ao meu companheiro Júlio H. Welter pelo suporte e paciência.

As minhas filhas, Helena e Yasmin, pela compreensão aos momentos ausentes.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao PPGGEO, pela oportunidade de crescimento acadêmico.

Ao professor Dr. Waterloo Pereira Filho, pela orientação e incentivo durante todo o período do mestrado.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias da Universidade Federal de Santa Maria (LABGEOTEC) pela colaboração.

Ao professor Dr. Fabio Breunig e à pesquisadora Dra. Evlyn Novo, pelas contribuições na banca de Qualificação e Defesa.

À professora Dra. Luciane Almeri Tabaldi, pelo suporte nas análises laboratoriais.

Aos professores do PPGF Dr. Fabiano de Oliveira Fortes e Dr. Fernando Coelho Eugenio.

Ao amigo e colega do PPGF Mateus Schuh, pelos ensinamentos em R.

Ao amigo e professor de inglês, Jonas Meltzer.

Aos amigos Jaqueline B.B. Dreyer, Milena Anchieta e Richard Kohler Marczewski.

À amiga e pesquisadora Dra. Flavia Machado Durgante, pela ajuda na implementação das análises discriminantes.

À Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Infraestrutura, em especial aos colegas da Regional Santa Maria.

Ao Parque Estadual Quarta Colônia, sobretudo aos guardas-parque Aquiles B. Naressi e Leomar Concikovski.

EPÍGRAFE

“Toda diversidade, todo encanto, toda a beleza da vida é feita de sombra e de luz”.
(Anna Kariênina - Liev Tolstói)

RESUMO

ESPECTROSCOPIA DE CAMPO PARA A DISCRIMINAÇÃO DE ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS E NATIVAS EM FLORESTA SUBTROPICAL

AUTORA: Caroline Lorenci Mallmann
ORIENTADOR: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Espécies Exóticas Invasoras (EEI) apresentam vantagens adaptativas e competitivas em relação às espécies nativas que coabitam os ecossistemas invadidos. Essas características podem ser expressas em seus atributos funcionais foliares e utilizadas como suporte para discriminar plantas invasoras em ambientes florestais complexos. Por esse motivo, é necessário compreender a relação dessas características com suas assinaturas espectrais. Nesse sentido, propomos a adoção de um arcabouço metodológico para avaliar a discriminação entre plantas nativas e invasoras, com base em seus atributos funcionais das folhas, associado ao uso da espectroscopia de campo. Analisamos quatro espécies arbóreas, duas invasoras (*P. guajava* e *H. dulcis*) e duas nativas (*P.cattleianum* e *L. divaricata*). Primeiramente, analisamos e diferenciamos os atributos funcionais foliares e o comportamento espectral das plantas invasoras e nativas. Os pigmentos fotossintéticos foram responsáveis pela maior variabilidade interespecífica, em especial na região do verde em torno de 550nm. Após, analisamos os espectros de reflectância e aplicamos um modelo de Análise Discriminante Linear (LDA), obtivemos 97% de acerto na discriminação das espécies. Os espectros mais informativos concentram-se na faixa do visível, próximos às principais feições de absorção de pigmentos. Por último, procuramos compreender as propriedades ópticas funcionalmente significativas para as EEI, a partir da técnica fundamentada na combinação de bandas estreitas e modelos de regressão linear. A invasora *P. guajava* apresentou suas propriedades ópticas funcionalmente mais significativas para: área foliar específica (R822/R801; $R^2=0,95$); Car/Clh (R839/R785; $R^2=0,93$) e conteúdo relativo de água (R817/R802; $R^2=0,83$). A invasora, *H. dulcis*, obteve os melhores resultados para conteúdo relativo de água (R706/R531; $R^2=0,85$), área foliar específica (R706/R531; $R^2=0,77$) e Clha/Clhb (R818/R769; $R^2=0,47$). As informações espectrais das espécies invasoras obtidas nesse estudo podem ser utilizadas para desenvolver modelos simulados de dossel, a fim de ampliar a resolução espaço-temporal, por meio da utilização de dados de reflectância extraídos de imagens adquiridas de plataformas orbitais e suborbitais. Finalmente, acreditamos que a metodologia é apropriada para discriminação de plantas invasoras. Entretanto, exige parametrização por espécie para que possa ser expandida a outras espécies de interesse.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Hiperespectral. Invasão Biológica. Atributos Funcionais das Folhas. Análise Discriminante Linear. Tipos ópticos.

ABSTRACT

FIELD SPECTROSCOPY FOR THE DISCRIMINATION OF INVASIVE ALIEN SPECIES AND NATIVE PLANTS IN SUBTROPICAL FOREST

AUTHOR: Caroline Lorenci Mallmann

ADVISOR: Dr. Waterloo Pereira Filho

Alien species have adaptive and competitive advantages compared to coexisting native species. These advantages can be expressed in their leaf functional traits and should be used in order to discriminate invasive plants in a complex forest environments. For this reason, it is necessary to understand the relationship of these characteristics with their spectral signatures. We propose a methodological framework to assess discrimination between native and invasive species based on their leaf functional traits associated with field spectroscopy. For this purpose, four tree species were analysed, two invasive (*P. guajava* and *H. dulcis*) and two native species (*P. cattleianum* and *L. divaricata*). First we evaluated the leaf functional traits and the spectral behavior of invasive and native plants. Photosynthetic pigments were responsible for the greatest interspecific variability especially in the green region around 550nm. Afterwards we applied a Linear Discriminant Analysis (LDA) to analyze the reflectance spectra and we achieved accuracy of 97% in discrimination of species. The most informative spectra are concentrated in the visible light close to the main pigment absorption features. Finally, we aim to understand the functional significance of the optical properties of invasive species by using a technique based on the combination of narrow bands and linear regression models. *P. guajava* had better functionally optical properties for: specific leaf area (R_{822}/R_{801} ; $R^2=0,95$); Car/Clh (R_{839}/R_{785} ; $R^2=0,93$) and relative water content (R_{817}/R_{802} ; $R^2=0,83$). *H. dulcis* had the best results for relative water content (R_{706}/R_{531} ; $R^2=0,85$), specific leaf area (R_{706}/R_{531} ; $R^2=0,77$) and $Clha/Clhb$ (R_{818}/R_{769} ; $R^2=0,47$). The spectral responses of invasive species in this study can be used to develop canopy models to increase spatio-temporal resolution through the use of reflectance data extracted from images acquired from suborbital and orbital platforms. Overall, we propose that this methodology is appropriate for discriminating invasive plants. However, parameterization by species is necessary to allow it to be expanded to other species of interest.

Keywords: Remote Sensing; Invasive Species; Leaf Functional Traits; Linear Discriminant Analysis; Optical Types.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática para conceituar a sequência de eventos da introdução à invasão. As principais barreiras que limitam a propagação de plantas exóticas introduzidas (geográfica, ambiental, reprodutiva, dispersão, habitats perturbados e habitats naturais).	31
Figura 2 - Representação esquemática de uma folha.	40
Figura 3 - Trajetória da água na folha.	41
Figura 4 - Estrutura interna de uma folha e relação com suas propriedades óticas.....	42
Figura 5 - Curva da reflectância espectral de uma vegetação verde saudável.	43
Figura 6 - Taxonomia do SR da biodiversidade.	48
Figura 7 - Características da vegetação em função das diferentes escalas espaciais e temporais.	50
Figura 8 - Localização do Parque Estadual Quarta Colônia.....	56
Figura 9 - Detalhe da vegetação florestal presente no Parque Estadual Quarta Colônia e entorno.	57
Figura 10 - Aspectos taxonômicos e morfológicos das EEI alvo: a) detalhe das folhas da <i>H. dulcis</i> ; b) detalhe das folhas para <i>P. guajava</i> ; c) fisionomia de um agrupamento de <i>H. dulcis</i> ; d) fisionomia de um indivíduo de <i>P. guajava</i>	58
Figura 11 - Aspectos taxonômicos e morfológicos das Espécies nativas selecionadas: a) detalhe das folhas da <i>L. divaricata</i> ; b) detalhe das folhas para <i>P. cattleianum</i> ; c) fisionomia de um indivíduo isolado de <i>L. divaricata</i> ; d) fisionomia de um indivíduo isolado de <i>P. cattleianum</i>	59
Figura 12 - Aspectos do dossel da área amostral em setembro de 2019. Imagem RGB obtida com o sensor <i>Zenmuse 5X</i> do Drone <i>Inspire - 1 Pró</i>	62
Figura 13 - Sequência de imagens exemplificando a amostragem realizada em campo: a) Identificação do indivíduo, anotação das coordenadas e informações auxiliares para posterior coleta das folhas; b) Radiometria para cada amostra de folhas (4 folhas sobrepostas), no detalhe calibração do equipamento; c) Armazenamento das folhas destinadas a extração de pigmentos e d) Armazenamento das folhas destinadas à obtenção do conteúdo de água e massa seca)...	64
Figura 14 - Extração do conteúdo de pigmentos no laboratório.....	66
Figura 15 - Folhas escaneadas em laboratório referente a uma amostra e individualizado por espécie: a) <i>P. guajava</i> ; b) <i>P. cattleianum</i> ; c) <i>H. dulcis</i> e d) <i>L. divaricata</i>	67
Figura 16 - Procedimentos adotados no laboratório para obtenção do conteúdo de água e massa seca: a e b) Condicionamento das folhas em estufa para obtenção do peso seco; c) Detalhe da estufa utilizada para secagem das amostras; d) Detalhe da balança de precisão utilizada para obtenção do peso fresco e seco das amostras.	68
Figura 17 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) SLA ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) e (b) LMA ($\text{g}.\text{m}^{-2}$) por espécie (PC= <i>P. cattleianum</i> ; PG= <i>P. guajava</i> ; LD= <i>L. divaricata</i> ; HD= <i>H. dulcis</i>).....	74
Figura 18 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) LWC (%), (b) FMC (%) e (c) EWT ($\text{g}.\text{m}^{-2}$) por espécie (PC= <i>P. cattleianum</i> ; PG= <i>P. guajava</i> ; LD= <i>L. divaricata</i> ; HD= <i>H. dulcis</i>).	77
Figura 19 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) Clh a+b ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) e (b) Clh_total ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) por espécie (PC= <i>P. cattleianum</i> ; PG= <i>P. guajava</i> ; LD= <i>L. divaricata</i> ; HD= <i>H. dulcis</i>).	79
Figura 20 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) Clh-a ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$); (b) Clh-b ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) e (c) Clha/Clhb por espécie (PC= <i>P. cattleianum</i> ; PG= <i>P. guajava</i> ; LD= <i>L. divaricata</i> ; HD= <i>H. dulcis</i>).	81
Figura 21 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) Carotenoide ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) e (b) Car/Clh por espécies (PC= <i>P. cattleianum</i> ; PG= <i>P. guajava</i> ; LD= <i>L. divaricata</i> ; HD= <i>H. dulcis</i>).....	83
Figura 22 - Matriz de correlação.	84

Figura 23 - Mapa Fatorial: os componentes são coloridos de acordo com o \cos^2 . As variáveis mais importantes para interpretação dos primeiros componentes encontram-se posicionadas mais próximas da borda do círculo. Já as variáveis situadas no centro do círculo possuem menor peso na composição dos primeiros componentes.	85
Figura 24 - Contribuição das variáveis nas duas primeiras componentes.	86
Figura 25 - Contribuição das dimensões na explicação do percentual de variância acumulado.	87
Figura 26 - Número de componentes principais recomendados (intersecção entre a linha vermelha e azul).	88
Figura 27 - Espectros de reflectância para as 04 espécies estudadas.	89
Figura 28 - Detalhe da feição espectral das espécies estudadas na faixa espectral: (a) azul, (b) verde, (c) vermelho e (d) NIR.	91
Figura 29 - Análise Discriminante Linear (LDA) processada usando o recurso <i>plsda.fit</i> do Pacote <i>PLSDA, RStudio</i> (2020), como resposta para a discriminação das espécies. Gráfico de pontos das espécies distribuídas nos eixos LD1 e LD2.	93
Figura 30 - Correlograma das espécies (nativas e invasoras) em relação ao seu espectro de reflectância para (a) LMA e (b) SLA.	97
Figura 31 - Correlograma das espécies (nativas e invasoras) em relação ao seu espectro de reflectância para (a) FMC; (b) EWT e (c) LWC.	99
Figura 32- Correlograma das espécies (nativas e invasoras) em relação ao seu espectro de reflectância para (a) Clh-a; (b) Clh-b e (c) Clh-total.	101
Figura 33 - Correlograma para as espécies (nativas e invasoras) do conteúdo de Carotenóides em relação ao seu espectro de reflectância.	102
Figura 34 - Ambiente de interação Correlativa (ICA) aplicado para todas as espécies agrupadas para razão Clha/Clhb, atributo que obteve o melhor resultado $r = 0,36$ para Razão 574/528 do espectro de reflectância.	103
Figura 35 - Modelo de Regressão Linear Simples (MRLS) para as propriedades ópticas funcionalmente mais significativas para espécie invasora <i>P. guajava</i> : (a) LWC (%) em função da razão 817/802; (b) SLA ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) em função da razão 822/801 e (c) Razão Car/Clh em função da razão 839/785; (Nível de conf. De 99%; Nível de significância de 99% ($p\text{-value}<0,001$)).	106
Figura 36 - Modelo de Regressão Linear Simples (MRLS) para as propriedades ópticas mais significativas para espécie <i>H. dulcis</i> : (a) LWC (%) em função da razão R696/R531; (b) SLA ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) em função da razão R706/R531; (c) Clha/Clhb em função da razão R818/R769; Nível de conf. De 99%; Nível de significância de 99% ($p\text{-value}<0,001$)).	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Terminologias e conceitos recomendados e utilizados em Ecologia de plantas invasoras.	29
Quadro 2 - Classificação e descrição taxonômica, caracterização biológica e ecológica para EEI <i>P. guajava</i>	36
Quadro 3 - Classificação e descrição taxonômica, caracterização biológica e ecológica para EEI <i>H. dulcis</i>	38
Quadro 4 - Comparativo entre espécies invasoras e nativas selecionadas para o estudo.	60
Quadro 5 - Conjunto de atributos funcionais das folhas relacionadas às suas características estruturais e ao conteúdo bioquímico.	61
Quadro 6 - Posição geográfica de cada indivíduo amostrado por espécie e seu respectivo código de identificação.	62
Quadro 7 - Síntese estatística de 12 características foliares para 96 amostras coletadas de 4 espécies (<i>P. cattleianum</i> , <i>P. guajava</i> , <i>L. divaricata</i> e <i>H. dulcis</i>). Vars (variável); n (número de amostras); mean (média aritmética); sd (desvio padrão); median (mediana); trimed (média truncada); mad (desvio absoluto médio); min (mínimo); max (máximo); range (amplitude total); skew (assimetria); kurtosis (curtose); se (erro padrão). Conteúdo de umidade do combustível (FMC) (%); Conteúdo de água (LWC)(%); Espessura equivalente de água (EWT) (g.m ⁻²); Massa foliar por área (LMA) (g.m ⁻²); Área foliar Específica (SLA) (cm ² .g ⁻¹); Conteúdo de Clorofila-a (Clha) (µg.cm ⁻²); Conteúdo de Clorofila-b (Clhb) (µg.cm ⁻²); Conteúdo total de Clorofila (Clh) (µg.cm ⁻²); Conteúdo de carotenoide (Car) (µg.cm ²); Razão da Clorofila a:b (Clha/Clhb); Razão do carotenoide pela clorofila total (Car/Clh); Conteúdo de Clha+Clhb (Clha+b). Intervalo de Confiança de 95% para um nível de significância de 5%.....	71
Quadro 8 - Síntese das variáveis e sua contribuição para a primeira componente principal (PC1) e segunda componente principal (PC2).	86
Quadro 9 - Matriz de confusão para avaliação da capacidade de generalização do modelo em relação a precisão da classificação das espécies invasoras e nativas.	94
Quadro 10 - Propriedades ópticas funcionalmente significativas para espécie <i>P. guajava</i> . LWC (%), SLA (cm ² .g ⁻¹) e razão Car/Clh; Número de amostras por variável (N); R múltiplo (R); Coeficiente de determinação (R ²) do modelo de regressão linear; Raiz do erro quadrado médio (RMSE) correspondente; Coeficiente de variação (CV= RMSE/valor médio das amostras); Soma do quadrado dos resíduos (SQR); Nível de conf. De 99%; nível de significância de 99% (p-value<0,001).	104
Quadro 11 - Propriedades ópticas funcionalmente significativas para espécie <i>H. dulcis</i> . LWC (%), SLA (cm ² .g ⁻¹) e Clha/Clhb; Número de amostras por variável (N); R múltiplo (R); Coeficiente de determinação (R ²) do modelo de regressão linear; Raiz do erro quadrado médio (RMSE) correspondente; Coeficiente de variação (CV= RMSE/valor médio das amostras); Soma do quadrado dos resíduos (SQR); Nível de conf. De 99%; Nível de significância de 99% (p-value<0,001).	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices espectrais desenvolvidos como indicadores de pigmentos fotossintéticos, conteúdo de água e massa seca.	45
Tabela 2 - Comprimentos de onda (nm) mais informativos para discriminação de espécies invasoras e nativas obtidos pelo método Stepwise; Região do VIS: B (azul); G (verde) e R (vermelho).	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Car	Carotenoide
CBD	Convenção sobre Diversidade Biológica
Clha	Clorofila a
Clhb	Clorofila b
Clh	Clorofila total
EWT	Espessura Equivalente de Água
FMC	Conteúdo de Umidade Combustível
GISD	Banco de Dados Global de Espécies Invasoras
EEI	Espécies Exóticas Invasoras
ICA	Ambiente de Correlação Interativa
IUCN	União Internacional para Conservação da Natureza
LDA	Análise Discriminante Linear
LES	Espectro Econômico das Folhas
LMA	Massa Foliar por Área
LOO	<i>Leave-one-out</i>
LWC	Conteúdo de Água Relativo
LWIR	Infravermelho de onda longa
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MRLS	Modelo de Regressão Linear Simples
NIR	Infravermelho próximo
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PCA	Análise de Componentes Principais
PEQC	Parque Estadual Quarta Colônia
R ²	Coefficiente de Determinação
REM	Energia Eletromagnética
RF	<i>Random forest</i>
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RPAS	Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SD	Desvio Padrão
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul
SLA	Área Foliar Específica
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
SR	Sensoriamento Remoto
SQR	Soma do Quadrado dos Resíduos
SVM	<i>Support vector machine</i>
SWIR	Infravermelho médio
UC	Unidade de Conservação
USNPS	Serviço Nacional de Parques dos Estados Unidos
VIS	Região Espectral do Visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS	29
2.2	ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS ALVO DO ESTUDO	35
2.2.1	<i>Psidium guajava</i> L.....	35
2.2.2	<i>Hovenia dulcis</i> Thunb.	36
2.3	PROPRIEDADES ÓPTICAS DAS FOLHAS	38
2.3.1	Extração de informação.....	43
2.4	SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO APLICADO À BIODIVERSIDADE	47
2.5	SENSORIAMENTO REMOTO E SUA APLICAÇÃO PARA DETECÇÃO, MAPEAMENTO E MONITORAMENTO DE ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS	51
3	METODOLOGIA	55
3.1	ÁREA DE ESTUDO	55
3.2	ESPÉCIES ALVO.....	57
3.3	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	60
3.3.1	Atributos funcionais das folhas.....	60
3.3.2	Área amostral	61
3.3.3	Amostragem.....	63
3.3.4	Campo e laboratório	63
3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	68
3.4.1	Análises dos Atributos Funcionais das Folhas	68
3.4.2	Análise de Componentes Principais (PCA).....	69
3.4.3	Análises dos Espectros de Reflectância	69
3.4.4	Análise Discriminante Linear (LDA)	69
3.4.5	Análise integrada dos Atributos funcionais das folhas e dos Espectros de Reflectância.....	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	ATRIBUTOS FUNCIONAIS DAS FOLHAS.....	71
4.1.1	Massa seca.....	72
4.1.2	Água.....	75
4.1.3	Pigmentos	78
4.1.4	Análise de Componentes Principais (PCA).....	83
4.2	ESPECTRO DE REFLECTÂNCIA DAS FOLHAS	88
4.2.1	Análise discriminante dos espectros de reflectância	92
4.3	RELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FUNCIONAIS FOLIARES E SEUS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA	95
4.3.1	Matéria Seca	95
4.3.2	Conteúdo de Água	97
4.3.3	Pigmentos fotossinteticamente ativos	100
4.4	Tipos ópticos ou Espécies espectrais	103
4.4.1	<i>Psidium guajava</i>	104
4.4.2	<i>Hovenia dulcis</i>	107
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

A invasão biológica é considerada uma das "cinco grandes" questões ambientais de interesse público, em conjunto com o desmatamento, mudanças climáticas, aumento das emissões de CO₂ e deposição de nitrogênio, e compõem os principais fatores de mudanças na biodiversidade de ecossistemas terrestres (SALA et al., 2000). Ademais, espécies exóticas invasoras representam uma das principais ameaças à biodiversidade, perdendo apenas para a fragmentação de habitats (WILCOVE et al., 1998; MCGEOCH et al. 2010).

A globalização gerou uma nova fase quanto à magnitude e diversidade das invasões biológicas, impulsionadas pelo aumento das redes de transporte e pela demanda por mercadorias, que elevaram o risco de novas invasões (HULME, 2009). O custo anual estimado associado ao impacto e controle de espécies invasoras foi superior a 12 bilhões €/ano na Europa (MCNEELY et al., 2005; COM, 2008), e em torno de US\$ 120 bilhões/ano nos EUA (PIMENTEL et al., 2005). Os custos anuais (ambientais, econômicos e sanitários) excedem a todos os outros desastres naturais juntos (USGS, 2020), apresentando elevados riscos para a saúde humana, plantas e animais nativos, habitats e ecossistemas naturais.

Espécies Exóticas Invasoras (EEI) representam um grande desafio no gerenciamento de áreas protegidas (ALLEN et al., 2009). Os diversos usos da terra no entorno das Unidades de Conservação (UC) caracterizam ecossistemas perturbados que, quando associados a vetores e corredores biológicos, condicionam uma forte pressão na dispersão de propágulos sobre essas áreas, contribuindo para o sucesso da invasão (STADLER et al., 2000; STOHLGREN, 2002, 2011; FOXCROFT et al., 2009, 2011). As unidades de Conservação no Brasil possuem grande importância ecológica e consistem em uma das principais estratégias para conservação da biodiversidade (BRASIL, 2019). Contudo, estas áreas atualmente vêm sendo ameaçadas pela invasão biológica, somada à fragmentação de habitats e à presença de ambientes perturbados (HULME, 2006; SPEAR, 2011).

Ecossistemas invadidos podem sofrer perturbações em nível de estrutura e funcionamento, podendo ocasionar impactos permanentes às suas propriedades, o que torna necessário o avanço em estudos que desenvolvam novas abordagens metodológicas para detecção precoce e monitoramento, com o objetivo de minimizar o impacto dessas espécies sobre os ecossistemas naturais. Nesse sentido, o potencial do sensoriamento remoto é reconhecido por fornecer dados e informação para apoiar a conservação e o gerenciamento dos recursos naturais em todos os níveis (local, regional e global). Entretanto, é necessária a compreensão de padrões espaciais e espectrais acerca das plantas invasoras alvo. Atributos

funcionais, quando relacionados às assinaturas espectrais, podem contribuir para melhorar a discriminação e o mapeamento dessas espécies em comparação a vegetação nativa (MUCHONEY, 2008; NIPHADKAR e NAGENDRA, 2016). Atributos funcionais foliares caracterizam as propriedades funcionais dos distintos grupos de plantas e são constituídos pelos tecidos, tipos celulares e conteúdo bioquímico das folhas. Essas características relacionam-se com processos fisiológicos da fotossíntese, respiração e transpiração. Ainda, a convergência dessas características pode ser refletida nas propriedades ópticas das folhas e subsidiar estudos aplicados à vegetação (USTIN e GAMON, 2010; JACQUEMOUD e USTIN, 2019; CAVENDER-BARES et al., 2020a).

Espécies Exóticas Invasoras são uma ameaça global à biodiversidade, promovem alterações nos padrões de diversidade florística e biodiversidade, e apresentam vantagens adaptativas e competitivas em relação às espécies nativas que coabitam os ecossistemas invadidos. Portanto, com base na premissa de que essas vantagens podem ser expressas em seus atributos funcionais foliares e utilizadas como suporte para discriminar plantas invasoras, a presente pesquisa tem como objetivos: (I) caracterizar os atributos funcionais foliares e o comportamento espectral das plantas invasoras e nativas; (II) utilizar medidas de reflectância obtidas a partir da espectroscopia de campo para discriminar plantas invasoras em relação às nativas; (III) compreender a relação entre as características funcionais das plantas invasoras e os seus padrões espectrais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS

Espécies Exóticas Invasoras (EEI) ou *Invasive alien species* (IAS) - é o termo internacionalmente aceito para espécies não nativas com alto potencial de disseminação e que produzem efeitos nocivos aos aspectos ecológicos, ambientais, econômicos e culturais (MASTERS e NORGROVE 2010; BOLCH et al., 2020). O conceito de Espécies Exóticas Invasoras é, na maioria das vezes, vinculado ao impacto dessas espécies sobre a biodiversidade, economia ou saúde. Para a IUCN (2000), espécie invasora é uma espécie exótica estabelecida em ecossistemas e habitats naturais e/ou seminaturais, que ameaça e provoca mudanças na diversidade biológica nativa. Espécie invasora, por vezes também é denominada de espécie introduzida ou espécie exótica, que, por definição, seria qualquer espécie não nativa que modifica ou perturba os ecossistemas que coloniza (RAFFERTY, 2019). Contudo, para Richardson et al. (2000), o termo invasor deve ser usado em referência ao status biogeográfico/demográfico de uma espécie, sem nenhuma conotação ao impacto produzido. Os autores destacam que apenas 10% das espécies invasoras provocam impactos negativos à biodiversidade e exigem uma grande alocação de recursos para contenção, controle e erradicação. O quadro 1 aborda as principais terminologias recomendadas pelos autores.

Quadro 1 - Terminologias e conceitos recomendados e utilizados em Ecologia de plantas invasoras.

Terminologia	Sinônimos	Conceito
Plantas exóticas	Plantas alienígenas; plantas não nativas; plantas não indígenas.	Táxons cuja presença em uma determinada área ocorre por introdução intencional ou acidental como resultado direto da atividade humana
Plantas exóticas casuais		Plantas que podem florescer e até reproduzir ocasionalmente em uma área, mas não formam populações viáveis. Os processos de introdução devem ser repetidos.
Plantas naturalizadas	Plantas alienígenas casuais	Espécies exóticas que se reproduzem e sustentam populações ao longo de muitos ciclos de vida sem intervenção humana direta. Contudo, não invadem ecossistemas naturais, seminaturais ou antropogênicos.

Plantas invasoras		Plantas naturalizadas que produzem descendentes reprodutivos, geralmente em números muito grandes, e a uma distância considerável das plantas progenitoras, e que, portanto, tem o potencial de se espalhar por uma área considerável.
Plantas daninhas	Ervas daninhas	São plantas que crescem em locais onde não são desejadas e possuem características econômicas ou ambientais negativas.
“Transformers”		Subconjunto de plantas invasoras que alteram o caráter, condição, forma ou natureza dos ecossistemas em uma área substancial em relação à sua abrangência.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A invasão ocorre por uma sequência de eventos que seguem a partir da introdução da espécie (Figura 1). A introdução é quando a planta ou seu propágulo supera uma barreira geográfica por ação humana. A naturalização é o processo que inicia quando as barreiras ambientais são superadas e sua reprodução é regular. Já o processo de invasão ocorre quando a planta é estabelecida e supera a barreira de dispersão dentro da nova região, além da sua capacidade de lidar com os fatores ambientais associados. Nessa etapa muitas espécies tornam-se invasoras e já conseguem se estabelecer em ambientes degradados. O sucesso de invasão, em comunidades não perturbadas, é alcançado quando o táxon exótico supera diferentes fatores de resistência (RICHARDSON et al., 2000).

Figura 1 - Representação esquemática para conceituar a sequência de eventos da introdução à invasão. As principais barreiras que limitam a propagação de plantas exóticas introduzidas (geográfica, ambiental, reprodutiva, dispersão, habitats perturbados e habitats naturais).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Espécies Exóticas Invasoras são amplamente aceitas como uma das principais causas diretas de perda de biodiversidade, contudo MacDougall e Turkington, (2005) consideram existente uma relação entre a perturbação do ambiente e o domínio de EEI, ou seja, uma consequência indireta da alteração de habitat que leva à perda de espécies nativas. Para Didham et al., (2005) ocorrem efeitos aditivos ou sinérgicos da perturbação do habitat e invasões de espécies, a exemplo da competição por luz e nutrientes que limitam o estabelecimento e desenvolvimento de espécies nativas. Nesse sentido, as paisagens contemporâneas são dominadas por espécies exóticas, como uma consequência direta desta exclusão competitiva. Esta situação pode levar a um ciclo de retroalimentação entre perturbação do habitat e invasão de espécies o que resultaria, segundo Simberloff et al. (1999, 2006), em um "colapso invasivo"¹ de ecossistemas perturbados.

¹ São alterações provocadas por plantas invasoras que perturbam o funcionamento ecossistêmico, favorecendo a entrada e o estabelecimento de novas plantas invasoras.

Espécies Exóticas Invasoras são responsáveis por influenciar os padrões de diversidade florística em diferentes regiões do mundo. As espécies exóticas mais difundidas são normalmente originárias do continente Europeu e Asiático, que por vezes são promotores da internacionalização das florestas, em especial no continente Americano. Processos históricos de distribuição geográfica de espécies em larga escala formaram os padrões de riqueza de espécies que conhecemos hoje. No entanto, o comércio e transporte global de espécies na atualidade podem influenciar fortemente mudanças nesses padrões, ditar os futuros padrões de biodiversidade e, com isso, contribuir para o processo de homogeneização da flora (STOHLGREN et al., 2011)

Habitats florestais geralmente são menos invadidos do que ambientes antropogênicos, porém a ocorrência de espécies invasoras tem aumentado nesses ecossistemas, o que causa impactos negativos na composição de espécies, microclima da floresta e química do solo (MEDVECKÁ et al., 2018). Mais de 430 espécies de árvores são reconhecidas como invasoras, grande parte das quais, são introduzidas por uma gama de razões, como produção de madeira, produção alimentícia, forragens, sequestro de carbono, fins ornamentais, para restauração florestal e como fonte de energia (REJMÁNEK e RICHARDSON, 2013; VAN WILGEN e RICHARDSON, 2014). Richardson e Rejmánek, (2011) identificaram 622 espécies de plantas lenhosas (357 árvores e 265 arbustos), pertencentes a 78 famílias e 286 gêneros, como invasoras em escala global. As regiões, em ordem decrescente, com maior número de espécies invasoras arbóreas/arbustivas são: Austrália, África Austral, América do Norte, Ilhas do Pacífico e Nova Zelândia. Essas espécies podem fornecer alimento sazonal para avifauna (GRAY e VAN HEEZIK, 2016), sendo que mais de 40% das espécies invasoras arbóreas e mais de 60% dos arbustos são dispersos por pássaros (RICHARDSON e REJMÁNEK, 2011). Essas espécies, também podem provocar alterações na taxa de decomposição de matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes, na disponibilidade de luz, na composição de espécies do sub-bosque e até inibir o crescimento de outras plantas por alelopatia (FUREY et al., 2014; WOZIWODA et al., 2014; BONIFACIO et al., 2015; VÍTKOVÁ et al., 2017).

Espécies Exóticas Invasoras representam, além de uma ameaça, um enorme desafio à gestão das áreas protegidas (SPEAR et al., 2011), as quais sofrem grande pressão de propágulos de plantas invasoras junto aos seus limites, influência exercida diretamente por características da paisagem do seu entorno. Estradas e redes de drenagem são facilitadoras dos processos de dispersão e colonização dessas espécies, já que formam corredores biológicos antropogênicos

e promovem o intercâmbio entre populações. Isso é motivado pelo alto nível de atividades humanas, sobretudo próximo a habitats perturbados, e com disponibilidade de vetores que auxiliam nesse processo (HULME, 2006; VAN DER WINDT e SWART, 2008). Estratégias adotadas para controle de EEI geralmente focam na detecção e erradicação precoce, combinando a adoção de práticas de manejo para as espécies consideradas com maior probabilidade de produzir impactos negativos nas funções ecossistêmicas. Identificar áreas com maior probabilidade de invasão, assim como entender o padrão de invasão dessas espécies, compreendem fatores relevantes para aprimorar a gestão de IAS nessas áreas (FOXCROFT et al., 2011).

O Serviço Nacional de Parques dos Estados Unidos (USNPS) considera a invasão biológica uma grande ameaça à conservação e manutenção de recursos naturais significativos protegidos por esses espaços naturais; características ambientais e ecológicas estão relacionadas à ocorrência de plantas invasoras em 43 parques americanos (ALLEN et al., 2009). Assim como o USNPS, a gestão de parques nacionais da África do Sul possui programas específicos destinados à prevenção e mitigação de espécies invasoras (KOENIG 2009, FOXCROFT et al., 2011). A escala espacial é fundamental para entender e gerenciar invasões biológicas. Nesse sentido, Foxcroft, et al. (2009) exploraram o papel da escala espacial na interpretação, gerenciamento e monitoramento de plantas invasoras em uma grande área protegida, qual seja, o *Kruger National Park*, na África do Sul. Ao avaliar os padrões de plantas invasoras em diferentes escalas (0,1 a 0,5 km e 1 a 5 km), concluíram que dados em escalas com pior resolução (> 1 km) são úteis para estabelecer prioridades e planejamento de intervenções; já dados com resolução espacial entre 0,1 a 0,5 km fornecem detalhes para avaliar padrões e taxas de invasão.

A reconhecida ameaça global que as EEI representam para a biodiversidade, ecossistemas, economias e meios de subsistência (SCHINE et al., 2009), motivou a Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD) considerar este um tema de relevância para os países signatários, sendo incluída na meta de Aichi:

Até 2020, espécies exóticas invasoras e seus vetores terão sido identificados, espécies prioritárias terão sido controladas ou erradicadas e medidas de controle de vias de dispersão estarão estabelecidas visando impedir sua introdução e estabelecimento (Meta de Aichi 9, CDB, COP 10).

A Política Nacional da Biodiversidade² tornou-se o principal instrumento para a implementação de cumprimento das metas previstas pela CDB, e recebeu grande destaque para prevenção, erradicação e controle de espécies exóticas invasoras que possam afetar a biodiversidade. Ainda, a grande problemática das invasões biológicas no país levou o Ministério do Meio Ambiente (MMA) a lançar um programa especial sobre a temática (MMA, 2019). A presença de EEI em Unidades de Conservação (UC) no território nacional coloca em risco os principais objetivos desses espaços. Portanto, essas espécies devem ser alvos de programas de controle e erradicação (ZILLER, 2006). Dechoum et al. (2018) avaliaram 197 Planos de manejo³ de unidades de conservação federais e constataram em 82% dos instrumentos a informação da presença de espécies invasoras dentro da área protegida. Os registros indicaram que 56% das espécies ocorrem em áreas naturais e 20% em áreas degradadas. Para os autores as áreas protegidas no território Brasileiro não possuem planos de manejo eficazes para prevenção e controle de espécies exóticas invasoras. Entretanto, esses espaços são legalmente instituídos pelo Poder Público para garantir a conservação e preservação dos recursos naturais e da biodiversidade inseridos nos seus limites. A Lei Federal 9.985/00, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), proíbe a introdução de espécies não autóctones (exóticas) e propõe a remoção de EEI.

No Estado do Rio Grande do Sul, 100 espécies exóticas são reconhecidas como invasoras⁴. O estado, também, possui o Programa Estadual de Controle de Espécies Exóticas Invasoras – INVASORAS RS –, vinculado à Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul. A importância da temática foi evidenciada pela realização do 1º Seminário Regional de Espécies Exóticas Invasoras, PR, SC, RS, o qual ampliou a difusão e a troca de conhecimento acerca do tema entre os diversos setores da sociedade (SEMA, 2020).

² Decreto Federal nº 4.339, de 22 de agosto de 2002, institui princípios e diretrizes para a implementação da Política Nacional da Biodiversidade.

³ Documento técnico que define os objetivos da unidade de conservação e estabelece o seu zoneamento e normas que presidem o uso da área e o manejo dos recursos naturais (Lei Federal nº 9.985 de 18 de julho de 2000).

⁴ Portaria SEMA nº 79/2013, reconhece a Lista de Espécies Exóticas Invasoras do Estado do Rio Grande do Sul e demais classificações, estabelece normas de controle e dá outras providências.

2.2 ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS ALVO DO ESTUDO

2.2.1 *Psidium guajava* L.

Psidium guajava (Quadro 2), popularmente conhecida como goiabeira, é uma espécie nativa da América tropical. Provavelmente possui sua distribuição natural entre o sul do México e o norte da América do Sul. É uma árvoreta⁵, ramificando-se da base e frequentemente produzindo brotação pelo tronco ou raiz (JANICK e PAULL, 2008; PAULL e DUARTE, 2012). Possui folhas simples e opostas, com punções translúcidas; pecíolo com 3-10 mm de comprimento; lâmina elíptica a oblonga, 5-15 x 3-7 cm, glabra acima, finamente pubescente abaixo, veias proeminentes abaixo. Sua síndrome de dispersão é zoocórica, ou seja, por intermédio de animais. É considerada uma espécie tropical de rápido crescimento, adaptada a uma ampla gama de condições ambientais. É tolerante à sombra, com reprodução precoce e dispersão de sementes auxiliada por aves e mamíferos. Pode formar matas densas que deslocam a vegetação nativa e é relatada como uma EEI em muitos países. Possui frutos comestíveis, altamente apreciados, o que motivou e potencializou a sua introdução. O equilíbrio entre sua produção de frutas e seu potencial invasivo requer monitoramento cuidadoso (CRONK e FULLER, 1995; SMITH, 1998; WEBER, 2003).

A *Psidium guajava* possui diversas vantagens adaptativas quando comparada a espécies florestais nativas, sendo geralmente mais eficiente (CRONK e FULLER, 1995). É uma transformadora de habitats (HENDERSON, 2001) e pode produzir efeitos alopatícos⁶ em plantas nativas, prejudicando o seu crescimento e desenvolvimento (SMITH, 1985, 1998). A espécie compõe o Banco de Dados Global de Espécies Invasoras, o qual concentra-se em espécies exóticas invasoras que ameaçam a biodiversidade nativa e áreas naturais (GISD, 2020). Possui registro de invasão em diversos países do continente Africano, em ilhas da Oceania e do Caribe, em locais asiáticos, como Hong Kong, Filipinas, Singapura, Japão, Austrália, Estados Unidos da América e na América do Sul, sobretudo na Argentina e Brasil (GBIF, 2021; CABI, 2020a). No território brasileiro, é registrada como invasora em 15 estados, incluindo o Rio Grande do Sul, e invade preferencialmente locais abertos e iluminados como áreas de atividade agropecuária, áreas degradadas e florestas em estágio inicial e médio (INSTITUTO HÓRUS, 2020).

⁵ Árvore de pequeno porte (com até 10 metros de altura).

⁶ Alelopatia é a capacidade das plantas, superiores ou inferiores, produzirem substâncias químicas que, quando liberadas no ambiente, influenciam de forma favorável ou desfavorável o desenvolvimento de outras espécies.

Quadro 2 - Classificação e descrição taxonômica, caracterização biológica e ecológica para EEI *P. guajava*.

	Classificação Taxonômica
Divisão	Magnoliopyta (Angiosperma)
Classe	Magnoliopsida (Dicotiledonea)
Ordem	Myrtales
Família	Myrtaceae
Espécie	<i>Psidium guajava</i> L.
	Descrição Taxonômica
Forma	arvoreta
Porte	pequeno (< 10 metros)
Dossel	manchas densas, presente no sub-bosque
copa	globosa e densa
Folhas	Simples e opostas, subcoriáceas
Tipo de folha	semi-perenifólias
Flores	brancas e solitárias
	Características Biológicas e Ecológicas
Desenvolvimento	rápido crescimento
Reprodução	precoce
Dispersão	zoocórica
	Habitats
Origem	ecótonos de formações <i>savânicas</i>
Preferenciais de invasão	bordas de florestas e pastagens

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.2.2 *Hovenia dulcis* Thunb.

A espécie *Hovenia dulcis* (Quadro 3), possui origem asiática (China, Japão, Coreia do Norte, Coreia do Sul, Tailândia e Vietnã) e é conhecida popularmente na região sul do Brasil como uva-do-japão. É uma árvore caducifólia, que pode atingir até 25 m de altura e 50 cm ou mais de DAP⁷ no sul do Brasil. Sua frutificação inicia entre 3-4 anos no Rio Grande do Sul, e o período de queda das folhas ocorre entre abril e agosto. Possui folhas simples, alternas, com 10 cm a 15 cm de comprimento e 7 cm a 12 cm de largura; glabras na parte superior e ligeiramente pubescentes na parte inferior, e ligeiramente pilosas. Possui síndrome de dispersão zoocórica, e apresenta características de planta "pioneira"⁸ ou "nômade". Na região de

⁷ Diâmetro medido à altura do peito (1,30 metros).

⁸ São espécies de rápido crescimento, regeneração precoce, com produção contínua de sementes e normalmente possuem ciclo de vida curto.

ocorrência natural, na China, é componente ocasional do estrato intermediário das florestas decíduas de carvalho (*Quercus spp*). A espécie apresenta regeneração natural intensa por sementes. Aproveita clareiras de florestas exploradas para se estabelecer. Não raro, cresce em terrenos baldios e próximo a habitações, formando agrupamentos. Sua área de distribuição natural ocorre em altitudes de 165 m até 2.200 m e com temperatura média anual de 7°C a 17°C. Quanto aos aspectos edáficos, apresenta grande plasticidade, desenvolvendo-se em solos compactos, rasos e pedregosos, desde arenosos até argilosos (CARVALHO, 1994).

Foi introduzida como espécie ornamental em ambientes urbanos, e para usos múltiplos em propriedades rurais. Isso impulsionou a invasão em fragmentos florestais, observada e registrada em diferentes estágios sucessionais⁹, incluindo as bordas da floresta madura. A espécie possui registro de invasão em países como Estados Unidos da América, Austrália, Índia, Tanzânia, Argentina, Paraguai e Brasil (GBIF, 2021; CABI, 2020b). Invade ambientes florestais da América do Sul, sobretudo no domínio da Mata Atlântica¹⁰ (PADILHA et al., 2015), sendo, no Brasil, invasora nos estados da Bahia, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Na região Sul do Brasil é considerada uma das espécies exóticas invasoras mais agressivas, principalmente na bacia do Uruguai, em ambientes de Floresta Estacional e de Floresta Ombrófila Mista (INSTITUTO HÓRUS, 2020).

Promove mudanças na estrutura e composição das comunidades de plantas em florestas subtropicais de diferentes tipos (SCHAFF et al., 2006; BOENI, 2011). Considerada uma das quatro piores espécies invasoras de plantas nas florestas subtropicais brasileiras, competindo com espécies nativas por espaço, luz e nutrientes (ZENNI e ZILLER, 2011). Seus frutos são consumidos por um grande número de espécies de animais, o que contribui para a sua disseminação (WITT e LUKE, 2017).

⁹ É a subdivisão do processo de sucessão secundária em fases distintas, mesmo que discricionárias, é usado para compreender o processo de sucessão ecológica em florestas secundárias (florestas em regeneração natural após distúrbios humanos e/ou naturais provocados na vegetação natural).

¹⁰ O Bioma Mata Atlântica engloba uma área de 1.306.000 km², cerca de 15% do território Brasileiro, cobrindo total ou parcialmente 17 estados. Formada por um mosaico de ecossistemas florestais e outros ecossistemas associados (como campos de altitude, restingas, manguezais etc.). Possui regime jurídico próprio regulamentado pela Lei 11.428 de 22 de dezembro de 2006.

Quadro 3 - Classificação e descrição taxonômica, caracterização biológica e ecológica para EEI *H. dulcis*.

	Classificação Taxonômica
Divisão	Magnoliopyta (Angiosperma)
Classe	Magnoliopsida (Dicotiledonea)
Ordem	Rosales
Família	Rhamnaceae
Espécie	<i>Hovenia dulcis</i> Thunb.
	Descrição Taxonômica
Forma	árvore
Porte	grande (>20 metros)
Dossel	presente no dossel e extrato emergente
copa	globosa/oval e aberta
Folhas	Simples e alterna
Tipo de folha	caducifólia
Flores	esbranquiçadas, numerosas e de pequena dimensão
	Características Biológicas e Ecológicas
Desenvolvimento	rápido crescimento
Reprodução	precoce
Dispersão	zoocórica
	Habitats
Origem	florestas decíduas de carvalho
Preferenciais de invasão	ambientes florestais

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.3 PROPRIEDADES ÓPTICAS DAS FOLHAS

As primeiras medições referentes às propriedades ópticas das folhas foram realizadas no início do século 20, e basicamente eram usadas para responder questões sobre o armazenamento de energia solar em plantas verdes. O avanço científico ocorreu a partir da entrada de dados quantitativos, impulsionados pelo desenvolvimento dos instrumentos de medição. Inicialmente, as medições dos espectros de reflectância em folhas eram limitadas à faixa visível. Apenas por volta de 1940 o limite das observações foi estendido para o infravermelho próximo, a partir do uso de um filme fotográfico sensível a esta faixa espectral, o que proporcionou observar uma maior reflectância das folhas nessa faixa (JACQUEMOUD e USTIN, 2019).

Estudos das propriedades ópticas das folhas abrangem diversas aplicações e áreas do conhecimento, da fisiologia vegetal até o Sensoriamento Remoto (SR) no domínio óptico aplicado a estudos ambientais, agricultura de precisão e ecologia. Grande parte dos estudos é concentrado nas propriedades espectrais da folha em relação ao seu conteúdo bioquímico (clorofila, água, matéria seca) e sua estrutura anatômica. É conhecido que a refletância e a transmitância da folha estão intimamente relacionadas ao conteúdo bioquímico e à estrutura anatômica, e dependem das espécies de plantas e de diversos fatores ambientais associados (JACQUEMOUD e USTIN, 2019).

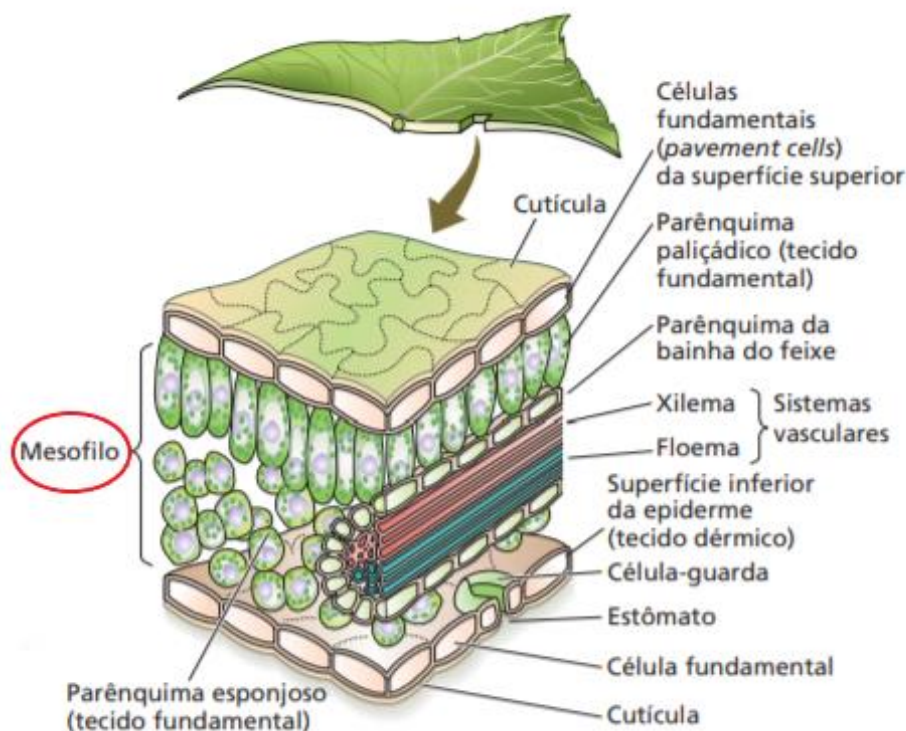
A extração de informação é baseada no registro de reflectância de folhas isoladas, controlada pelo processo de fotossíntese¹¹, que inicia quando a luz solar atinge os cloroplastos¹², onde o conteúdo interno presente de pigmentos e de água, afetam as propriedades de reflectância e transmitância das folhas. A estrutura interna e externa das plantas e suas interações com a energia eletromagnética (REM) interferem diretamente na resposta espectral registrada por instrumentos de SR (GUREVITCH et al., 2009; JENSEN, 2009; MENEZES et al., 2019).

O mesófilo é o tecido fotossinteticamente mais ativo em plantas superiores (Figura 2). As reações da fotossíntese ocorrem nos tilacóides, membranas internas especializadas encontradas nos cloroplastos. Todos os pigmentos ativos na fotossíntese são encontrados nos cloroplastos. As clorofilas a e b são abundantes nas plantas verdes, já os carotenóides são encontrados em todos os organismos fotossintetizantes e desempenham importante papel na proteção dos organismos em danos causados pelo excesso de luz (TAIZ et al., 2017).

¹¹ Conjunto de processos pelos quais as plantas adquirem energia da luz solar e fixam carbono proveniente da atmosfera.

¹² Estruturas presentes nas células do mesófilo responsáveis pela captação de energia luminosa e conversão em energia química. Formam o Fotossistema 1 e 2, onde cada sistema é formado por centenas de moléculas de pigmentos (clorofila a e b e pigmentos acessórios).

Figura 2 - Representação esquemática de uma folha.



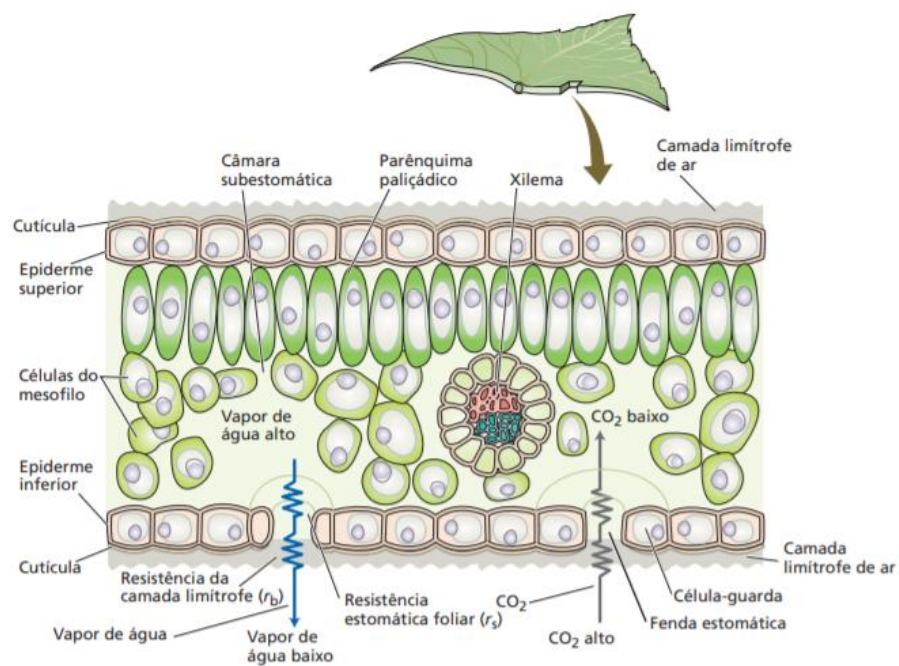
Fonte: Taiz et al. (2017).

O movimento da água da folha (Figura 3) para a atmosfera ocorre quando a água é puxada do xilema para as paredes do mesófilo, onde é evaporada pela fenda estomática. A cutícula funciona como uma barreira na perda de água, cerca de 95% da água perdida pelas folhas ocorre via fenda estomática. As folhas possuem uma grande resistência hidráulica, em média 30% da resistência total na fase líquida. A água é distribuída nas folhas pela lâmina foliar nos condutos do xilema e, antes de evaporar, passa pelas paredes do xilema e por múltiplas camadas de células vivas. A resistência hidráulica foliar é resultante das propriedades hidráulicas das células do mesófilo, por exemplo, nervuras muito próximas tendem a ter baixa resistência hidráulica e maiores taxas fotossintéticas. A resistência hidráulica também varia em resposta às condições ambientais, sendo que folhas de sombra possuem maior resistência quando comparadas a folhas de sol (TAIZ et al., 2017).

A transpiração foliar depende de dois fatores principais: a diferença na concentração de vapor de água entre os espaços intercelulares das folhas e a massa atmosférica externa; e sua resistência à difusão na rota, que é diretamente influenciada pela temperatura foliar. A saturação

de vapor de água do ar aumenta exponencialmente com a temperatura, aumentando a temperatura foliar, o que impacta nas taxas transpiratórias. A perda de água foliar também é regulada em função da resistência estomática foliar e da resistência da camada limítrofe, cuja espessura é determinada pela velocidade do vento e tamanho da folha. Esse controle estomático, que se dá pela abertura e fechamento dos estômatos, liga a transpiração foliar ao processo de fotossíntese (TAIZ et al., 2017).

Figura 3 - Trajetória da água na folha.



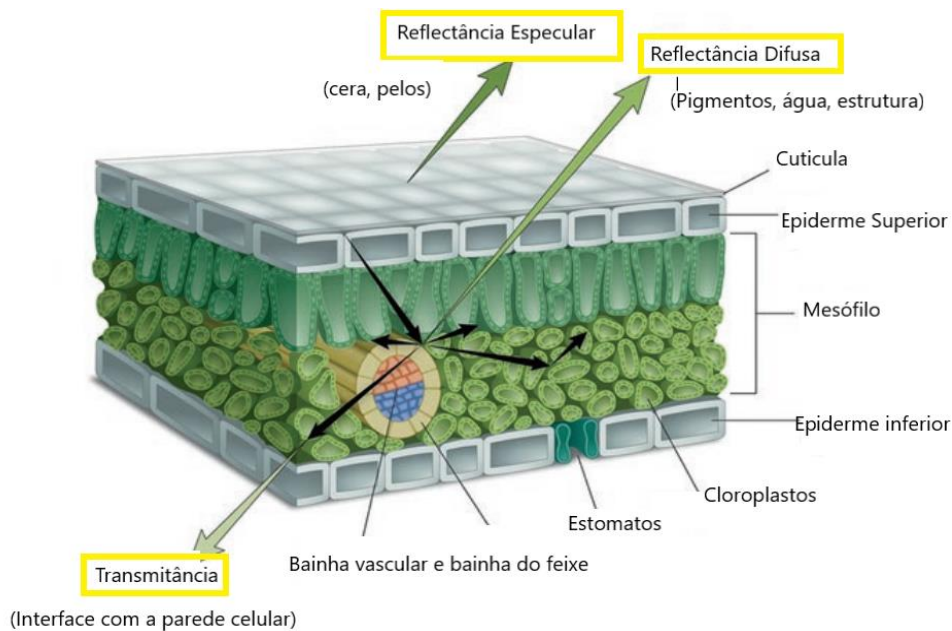
Fonte: Taiz et al. (2017).

As propriedades ópticas das folhas e, logo, suas assinaturas espectrais, são influenciadas pela sua estrutura e composição bioquímica interna, notadamente na quantidade de radiação incidente que é refletida, transmitida ou absorvida. A título de exemplo, uma camada de cutícula espessa, com presença de cera ou com uma grande quantidade de pelos, pode influenciar a quantidade de reflectância na primeira superfície¹³ e poderia diminuir a radiação solar incidente na folha. Além disso, a espessura da camada do mesófilo associada a outras propriedades, em folhas mais grossas, pode aumentar o grau de dispersão de energia no interior da folha, e

¹³ Corresponde à luz refletida diretamente da camada externa da folha e que não interage com o interior da folha.

consequentemente resultar em uma menor transmitância e maior absorptância em alguns comprimentos de onda. A reflectância difusa da folha, que é modificada pelas suas propriedades internas, pode conter características úteis para mapear as características funcionais das folhas, conforme exemplificado na Figura 4 (SERBIN e TOWNSEND, 2020).

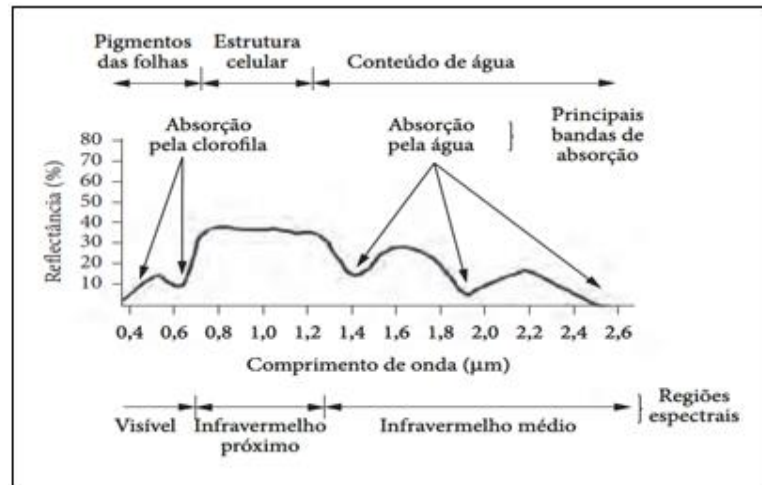
Figura 4 - Estrutura interna de uma folha e relação com suas propriedades óticas.



Fonte: Adaptado de Serbin e Townsend (2020).

O comportamento espectral da vegetação representa as propriedades e características de reflectância (Figura 5), absorptância e transmitância da REM a nível foliar e de dossel. Muitos estudos inferem sobre análise do comportamento da Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e sua interação com dados bioquímicos, como água, clorofila e demais pigmentos fotossintetizantes. A faixa espectral de 430nm a 660 nm é caracterizada por um forte pico de absorção de clorofila *a*. Já a faixa de absorção clorofila *b* é mais intensa, em 450nm e 650nm. Os carotenóides têm um pico de absorção de 450 nm. No infravermelho-próximo (NIR), a reflectância aumenta drasticamente (700 nm a 1.200nm), com um máximo de reflectância em torno de 900 nm para uma folha verde sadia (JENSEN, 2009; JENSEN, 2015; MENEZES et al., 2019).

Figura 5 - Curva da reflectância espectral de uma vegetação verde saudável.



Fonte: Adaptado de Novo (2010).

A vegetação sob condição de stress produz sintomas que resultam em alterações morfológicas (crescimento, forma) e fisiológicas (aspectos funcionais), que podem ser motivados por diversos fatores como doenças, condições ambientais adversas e deficiência de nutrientes, o que provoca alteração na resposta espectral das folhas sem modificar o padrão de forma do espectro (MENEZES et al., 2019). As faixas compreendidas entre 535nm e 640nm e 685nm e 700 nm, são sensíveis à condição de estresse da vegetação (JENSEN, 2009).

A maior parte do conteúdo de água acumulado em uma folha encontra-se no mesófilo esponjoso, regiões espectrais do infravermelho médio (SWIR) e do infravermelho termal que são sensíveis à quantidade de água. A faixa espectral do SWIR (1.300nm a 2.500nm) possui uma forte relação com a quantidade de água presente nas folhas do dossel e pode apresentar informações sobre evapotranspiração do dossel (JENSEN, 2009, 2015).

2.3.1 Extração de informação

Propriedades extraídas das folhas e seus espectros de reflectância são como parâmetros de entrada e servem para alimentar modelos de dossel. Existem uma gama de métodos de análise espectral propostos para detectar constituintes bioquímicos e biofísicos, que incluem razões de banda simples a métodos de inversão de transferência radiativa de alta complexidade. Combinações de bandas estreitas, como a proposição de índices espectrais, consistem em uma abordagem clássica no sensoriamento remoto e são amplamente utilizados para extração de

informações referentes ao conteúdo de pigmentos fotossintéticos, conteúdo de água e massa seca, principalmente devido à sua simplicidade, e porque costumam produzir bons resultados para conjuntos de dados individuais (JACQUEMOUD e USTIN, 2019).

Alguns dos principais índices espectrais desenvolvidos a partir da região espectral do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR), como indicadores de pigmentos fotossintéticos, conteúdo de água e massa seca, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Índices espectrais desenvolvidos como indicadores de pigmentos fotossintéticos, conteúdo de água e massa seca.

Índice	Abreviação	Equação	Indicador/Aplicação	Referência
Ratio Analysis of Reflectance Spectra	RARS	$R675/R700$	Clorofila	Chappelle et al. (1992), Blackburn (1999)
Chlorophyll Normalized Difference Index	CIhNDI	$(R750-R705) / R(750+R705)$	Clorofila	Sims and Gamon (2002)
Green NDVI	GNDVI	$(R750 - R_{Green}) / (R750 + R_{Green})$	Clorofila	Gitelson et al. (1996)
Pigment Specific Simple Ratio	PSSR	PSSRa = $R800/ R675$; PSSRb = $R800/ R650$	Clorofila a e b	Blackburn (1998a 1998b, 1999)
Pigment Specific Normalized Difference	PSND	PSSRa = $(R800 - R675) / (R800 + R675)$; PSSRb = $(R800 - R650) / (R800 + R650)$	Clorofila a e b	Blackburn (1998a, 1998b)
Derivative Chlorophyll Index	DCI	$D705/ D722$	Clorofila	Zarco-Tejada et al. (2002)
Double Difference	DD	$(R749 - R720) - (R701 - R672)$	Clorofila	Le Maire et al. (2004)
Red-edge Chlorophyll Index	Clred-edge	$(R780-R800/R700) - 1$	Clorofila	Gitelson et al. (2003)
Red Edge Symmetry	RES	$(R718 - R675) - (R755 - R675)$	Clorofila	Ju et al. (2010)
Ratio Analysis of Reflectance Spectra	RARS	$R760/ R500$	Carotenoide	Chappelle et al. (1992)
Structure Insensitive Pigment Index	SIPI	$(R800 - R445) / (R680 - R445)$	Carotenoide	Peñuelas et al. (1995), Sims and Gamon (2002)
Pigment Specific Simple Ratio	PSSR	$R800/ R500$	Carotenoide	Blackburn (1998a, 1998b)
Photosynthetic Reflectance Index	PRI	$(R531 - R570) / (R531 + R570)$	Carotenoide	Gamon and Surfus (1999)
CARotenoid Index	CARI	$(R720/ R521) - 1$	Carotenoide	Zhou et al. (2017)
Plant senescence reflectance index	PSRI	$(R680-R500) / R750$	Clorofila	Merzlyak et al. (1999)
Water Index	WI	$R900/ R970$	Conteúdo de água (LWC); Massa por área (LMA)	Kumar (2007); Zhang et al. (2012)
Simple Ratio	SR	$R520/ R720$	Espessura Equivalente de Água (EWT)	Aoki et al. (1988) apud Jacquemoud e Ustin, 2019
Structure Insensitive Pigment Index	SIPI	$(R800 - R445) / (R800 - R680)$	EWT	Peñuelas and Inoue (1999)
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(RNIR-RR) / (RNIR+RR)$	Múltiplos usos	Rouse et al. (1973)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

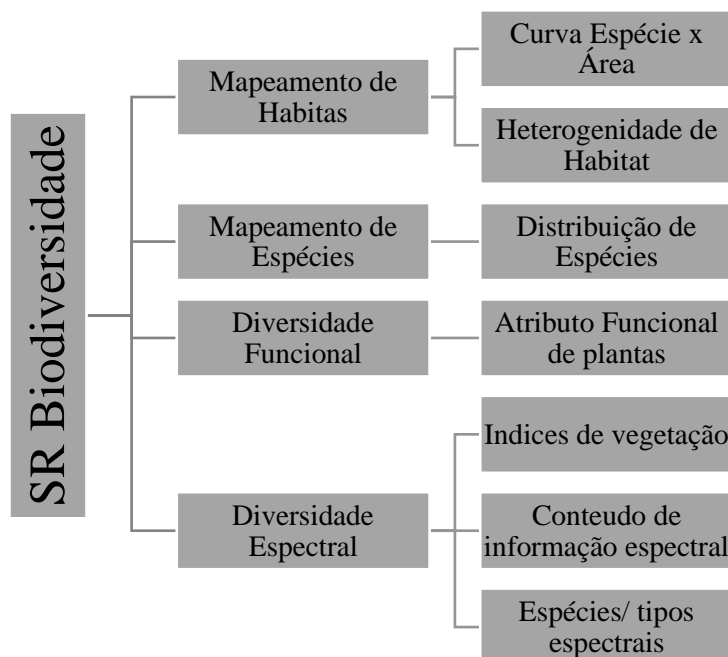
2.4 SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO APLICADO À BIODIVERSIDADE

O SR consiste em uma ferramenta valiosa no estabelecimento e gerenciamento de áreas protegidas, usada para planejar, monitorar e avaliar ações estratégicas para conservação. Para isso, devem ser considerados os aspectos quanto à resolução espacial e temporal dos sensores, e à compatibilidade das escalas necessárias para avaliar a biodiversidade. Combinar dados remotos com dados inventariados a campo é uma premissa importante para se obter uma interpretação ecológica consistente e garantir sua aplicação futura (WIENS et al., 2009).

Perturbações e alterações em ecossistemas florestais têm sido cada vez mais frequentes. O SR possui capacidade para monitorar essas mudanças a partir de métodos não destrutivos, em diferentes escalas espaço-temporais e com baixo custo. Lausch et al. (2016) afirma que técnicas de SR podem ser usadas para medir as características espectrais da vegetação e suas variações em função dos seus principais aspectos de diversidade: diversidade taxonômica, estrutural e funcional. Os autores apontam que a capacidade de monitorar esses indicadores com dados de SR depende das características florestais (forma, densidade e distribuição); das resoluções espaciais, espectrais, radiométricas, angulares e temporais dos sensores; da técnica aplicada para a classificação e/ou estimativa das variáveis biofísicas e químicas; da representação (objetos geográficos) e ajuste dos dados de SR às características das plantas.

O monitoramento tradicional da biodiversidade *in situ* é limitado ao tempo e espaço, além de possuir um alto custo envolvido no processo. Já dados obtidos por meio de técnicas de SR podem fornecer informações consistentes e representativas, com grande alcance de área. Wang e Gamon (2019) propuseram uma “Taxonomia” do sensoriamento remoto da vegetação aplicado à biodiversidade (Figura 6), com ampla revisão e descrição de técnicas utilizadas para detectar a diversidade de plantas e ecossistemas, com base nas propriedades espectrais relacionadas à distribuição de habitat, espécies ou grupos funcionais.

Figura 6 - Taxonomia do SR da biodiversidade.



Fonte: Adaptado de Wang e Gamon (2019).

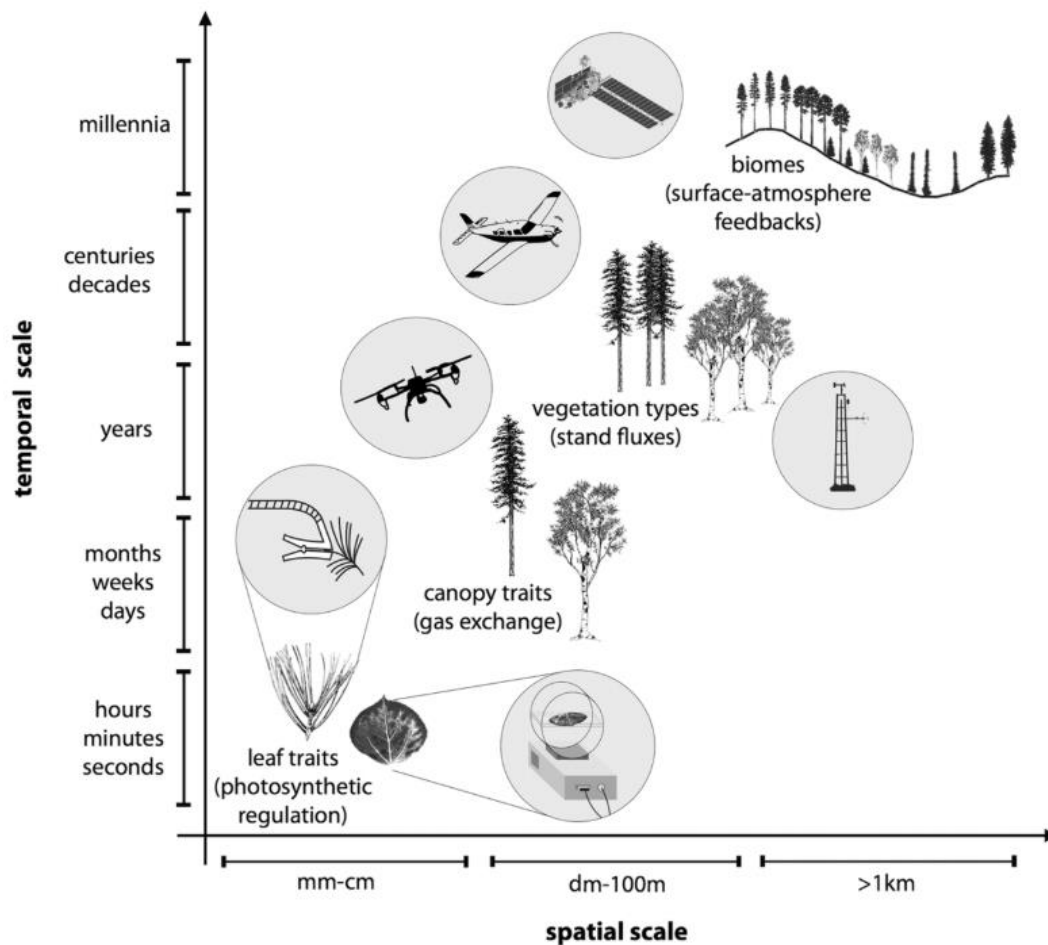
As características funcionais da vegetação, ou atributos funcionais¹⁴, possuem propriedades ópticas e fornecem informações sobre a estrutura da planta, água e conteúdo bioquímico (GAMON e SURFUS, 1999). A maioria das características em nível foliar influencia as propriedades ópticas da vegetação, direta ou indiretamente, o que permite avaliar a funcionalidade a partir de reflectância espectral, ou seja, essas características podem ser correlacionadas às suas propriedades ópticas foliares por espectros de reflectância (SERBIN et al. 2014; CAVENDER-BARES et al. 2017). Ainda, variações espaciais e taxonômicas na química foliar representam importante papel na investigação da dinâmica e funcionalidade de espécies arbóreas em ecossistemas tropicais, bem como a sua resposta a perturbações e a mudanças climáticas (TOWNSEND et al., 2007). Propriedades ópticas utilizadas para monitorar características funcionais da vegetação a partir da folha foram evidenciadas em estudos aplicados à biodiversidade por Jacquemoud et al. (1995, 1996); Roberts et al. (1998); Ustin et al. (2004); Gitelson et al. (2006) e Cavender-Bares et al. (2017).

¹⁴ São características das espécies diretamente relacionadas ao seu desempenho em comunidades, do seu estabelecimento e sobrevivência até o crescimento e reprodução;

Os “tipos ópticos”, assim denominados por Ustin e Gamon (2010), também conhecidos por tipos ou espécies espectrais (FERET e ASNER, 2014), por definição, representam uma tentativa de definir propriedades ópticas funcionalmente significativas (ou padrões espectrais) relacionadas às características das plantas. São comumente usados em muitos modelos globais para classificar propriedades físicas e podem simplificar estudos relacionados à vegetação em larga escala (BONAN et al., 2002, 2003; PAVLICK et al., 2013; VAN BODEGOM et al., 2014). Apesar do progresso na definição e aplicação, existe uma lacuna no desenvolvimento de teorias mais abrangentes sobre a compreensão da relação entre as características funcionais das plantas e os seus “tipos ópticos” (GAMON et al., 2019). O tipo óptico pode ser orientado por estratégias ecológicas, como disponibilidade ou limitação de recursos (luz, água e nutrientes) que afetam diretamente o crescimento das plantas e as características das folhas (conteúdo de nutrientes, pigmentos, água e parâmetros estruturais). Essas alterações influenciam nos aspectos do dossel e na fenologia das espécies (USTIN E GAMON, 2010; WANG E GAMON, 2019).

As dimensões espaciais, temporais, espectrais e biológicas são relevantes para qualquer estudo sobre vegetação em SR. Para Gamon et al. (2019) a detecção de informações relacionadas às características funcionais das plantas é dependente da dimensão espectral, e a escala de amostragem é quem define qual processo ou atributo será detectado. A funcionalidade da vegetação envolve a detecção de atributos funcionais ou processos em uma escala específica (folha, dossel) e deve ser combinado à resolução e extensão espaço-temporal do sensor. Para os autores, não existe uma única escala aplicável para os estudos de SR da vegetação, e, portanto, múltiplas plataformas e escalas de amostragem devem ser consideradas (Figura 7). A exemplo de métodos como “*upscaling*”, a extrapolação de pequenas a grandes escalas, a partir de modelos biofísicos ou métodos estatísticos (JUNG et al., 2011), ou “*downscaling*”, a inversão de modelos ou interpretação de padrões de larga escala (JACQUEMOUD et al., 2009). Entretanto, a melhor estratégia de amostragem depende da pergunta ou hipótese a ser testada, do conhecimento disciplinar do observador, da tecnologia disponível e do modelo de escalonamento em relação aos procedimentos fisiológicos, bioquímicos e biofísicos relevantes (GAMON et al., 2019).

Figura 7 - Características da vegetação em função das diferentes escalas espaciais e temporais.



Fonte: Gamon et.al. (2019).

A conservação de ecossistemas florestais requer abordagens com múltiplas escalas e com fontes de informação contínuas. Técnicas de espectroscopia de imagem permitem monitorar características biofísicas e bioquímicas, e dessa forma avaliar as funções de um ecossistema florestal. Já os estudos espectroscópicos no nível das folhas podem complementar ou até substituir as análises laboratoriais, ajudar a criar conjuntos de dados de referência para estudos futuros e até serem escalados para o nível do dossel (HILL et al., 2019). Embora os dados de espectroscopia de imagem sejam promissores para o mapeamento em nível de espécie, sua compreensão biofísica limitada das assinaturas detectadas remotamente possui uma alta similaridade espectral entre espécies e alta variabilidade espectral dentro das espécies. Para minimizar essas desvantagens e melhorar a eficiência do mapeamento devem ser coletados

dados de verdade de campo para caracterizar a resposta espectral das plantas de interesse, sendo a espectroscopia de campo o principal método utilizado (JIMÉNEZ et al., 2015).

Nesse sentido, a espectrometria próxima, termo utilizado por Gamon et al. (2019) para se referir à aquisição de dados a campo por meio de medições diretas, as quais permitem a extração de informações acerca dos atributos funcionais das plantas em nível foliar e de dossel, inclui: espectrômetros portáteis (PINTO et al., 2016, 2017), instrumentos montados em torres de observação (HILKER et al., 2011), plataformas móveis (GAMON et al.; 2006; SIMS et al.; 2006) e veículos aéreos não tripulados (BURKART et al., 2014; LUCIEER et al., 2014; MALENOVSKÝ et al., 2017). Essas técnicas possuem grandes vantagens quando comparadas às plataformas orbitais, como: alto grau de detalhamento e precisão, facilidade de amostragem e maior flexibilidade temporal. Todavia, sua principal desvantagem é a cobertura espacial restrita e a aquisição de conjuntos de dados limitados, o que dificulta a generalização dos modelos. Mas, não se pode desconsiderar, sua importância como experimentação para explorar novas análises em função da vegetação, além do seu uso para validar medições ópticas em escalas maiores.

Gamon et al. (2019) apontam a cobertura espacial restrita, a distribuição limitada entre biomas e tipos de vegetação, e a falta de padronização e protocolos como desvantagens inerentes ao processo, dificultando a generalização dos estudos pontuais. Contudo, essa fragilidade pode ser minimizada quando estes estudos são combinados a ferramentas de processamentos computacionais e modelagem estatística, para aumentar a escala de abrangência, integradas a dados remotos derivados de plataformas orbitais.

2.5 SENSORIAMENTO REMOTO E SUA APLICAÇÃO PARA DETECÇÃO, MAPEAMENTO E MONITORAMENTO DE ESPÉCIES EXÓTICAS INVASORAS

O SR vem sendo amplamente utilizado nos últimos anos para detecção de plantas invasoras sobre distintas abordagens, alavancadas pelo avanço e disponibilidade de novas tecnologias. Bolch et al. (2020) destacam três fatores que favorecem o mapeamento e detecção de Espécies Exóticas Invasoras: (I) forma de crescimento dominante ou formando manchas extensas; (II) fenologia única que se distingue das demais plantas nativas em determinado período do ano; (III) a invasora alvo expressa característica bioquímicas ou fisiológicas únicas. Para os autores, esses fatores são fortemente combinados a três domínios de dados do SR (espacial, temporal e espectral). Outro ponto importante é a escolha da plataforma e do sensor utilizado para detecção, que deve ser compatível com as características da(s) espécie(s) alvo

e/ou do ambiente. Abordagens multi-escala, as quais integram dados de diferentes plataformas e sensores, consistem em metodologias potenciais para a discriminação e mapeamento de espécies invasoras (KHARE et al., 2018; GROBE-STOLTENBERG et al., 2018; PIIROINENA et al., 2018).

A detecção de EEI, sobretudo plantas arbóreas, pode usar o método direto de detecção pelas copas das árvores (ASNER et al., 2008 a, b, c) ou indireto, medindo as folhas e simulando o dossel (RESASCO et al., 2007; WILFONG et al., 2009). Muitos estudos utilizam dados ópticos de SR para detectar diretamente a invasão em nível de espécie, a partir da espectrometria de campo e de imagem, nas faixas do visível e do infravermelho, que são usadas para mapear propriedades estruturais e espectrais de EEI (por exemplo, Asner et al., 2008 a c). Para os autores, o espectro de separabilidade das plantas invasoras está correlacionado às suas propriedades específicas, como a diferença no comportamento dos pigmentos em nível foliar, quando comparado às demais espécies nativas.

Abordagens mais tradicionais, baseadas na fenologia e em características estruturais, são amplamente empregadas no mapeamento de EEI. Niphadkar e Nagendra (2016) realizaram uma ampla revisão de pesquisas que combinam técnicas de SR a características funcionais de EEI, publicadas no período de 2000 a 2014. Pesquisas que abordam fenologia são apontadas no levantamento como a característica mais utilizada para mapear plantas invasoras; variações sazonais, como o pico de queda das folhas e início da floração, são pontos críticos bastante explorados (SRIDHAR et al., 2010; SOMERS e ASNER, 2013; DIAO e WANG, 2016, 2018; RAJAH et al., 2018). Já as características estruturais tendem a ser separáveis espacialmente dentro de um ecossistema nativo, com uso de técnicas de processamentos baseados em segmentação de imagem. Contudo, sua aplicação é viável quando as IAS possuem ou formam agrupamentos distintos da vegetação nativa predominante (BRENNER et al., 2012; HANTSON et al., 2012). Também, deve se considerar os traços estruturais quando estes apresentam características agressivas e dominantes (CHENG et al., 2007).

Em ecossistemas de floresta tropical e subtropical a detecção e mapeamento de EEI é mais complexo, pois normalmente as espécies possuem características morfológicas semelhantes e coabitam o mesmo local das espécies nativas, ou seja, encontram-se dispersas e misturadas em florestas nativas ou sob o dossel. Portanto, devem-se buscar métodos que não utilizem somente características estruturais, mas também características espectrais (BARBOSA et al., 2016; TESHAMICHAEL et al., 2018). Ainda, para aumentar o potencial de discriminação entre plantas nativas e invasoras, devem ser incluídas características fisiológicas ligadas aos mecanismos de funcionamento e crescimento da planta (NIPHADKAR e NAGENDRA, 2016).

Variáveis específicas em nível foliar, como o conteúdo de carotenóides, concentração de Nitrogênio e teor de umidade, foram estudados por Asner et al. (2006), Somers e Asner (2012) e Asner et al. (2008, a, b, c) respectivamente. Os autores destacam que variáveis relacionadas a processos ecológicos e/ou atributos funcionais, quando combinadas a padrões espectrais e espaciais, demonstram uso em potencial para o mapeamento e detecção de EEI.

Estudos têm avançado para possibilitar o mapeamento e monitoramento de EEI, que, somados à inovação tecnológica, vêm sendo potencializados pelo surgimento e disponibilidade de novos equipamentos, sensores e técnicas de inteligência artificial. Eugenio et al. (2020) destacam a notoriedade crescente da utilização de plataformas de Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) em estudos relacionados à detecção e monitoramento de EEI nos últimos anos (por exemplo: Baron et al., 2018; Hill et al., 2017; Mafanya et al., 2018; Wu et al., 2019; Mallmann et al., 2020, Papp et al., 2021).

3 METODOLOGIA

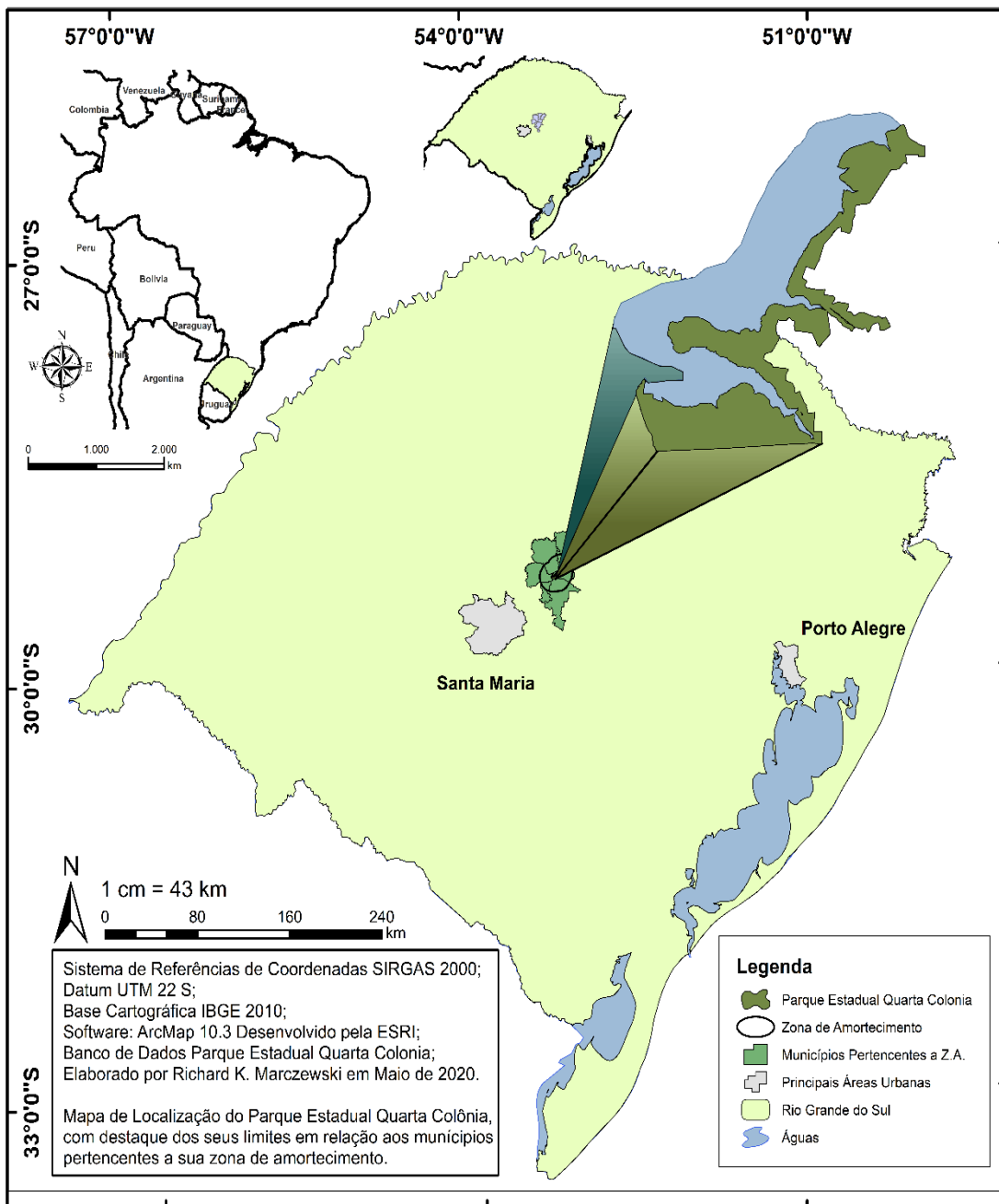
3.1 ÁREA DE ESTUDO

O Parque Estadual Quarta Colônia (PEQC) (Figura 8) está localizado no Estado do Rio Grande do Sul e abrange parte dos municípios de Agudo e Ibarama. Está situado no limítrofe entre as regiões fisiográficas do Planalto e da Depressão Central. O relevo é forte-ondulado, caracterizado por morros e escarpas, originários de derramamento basáltico que recobre as formações sedimentares de arenitos, sílticos e argilosos. Os solos nas encostas são pouco desenvolvidos (rasos) e nas áreas de várzeas aluviais são do tipo neossolos flúvicos, planossolos e gleissolos (PEDRON et al., 2009; PEDRON e DALMOLIN, 2011). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfa (subtropical), com temperatura média entre 18° e 20° C e precipitação pluviométrica anual próxima de 1800 mm (WREGGE et al., 2011).

A vegetação pertence ao tipo fitogeográfico Floresta Estacional Decidual e se insere em área do Bioma Mata Atlântica. A vegetação é caracterizada por um mosaico sucessional¹⁵ (Figura 9) e abriga importantes remanescentes de Floresta Estacional Decidual (SCHUMACHER et al., 2011; KILCA et al., 2015; MALLMANN et al., 2015). O componente arbóreo é formado por espécies típicas de Floresta Estacional Decidual, como *Nectandra megapotamica*, *Cupania vernallis*, *Trichilia claussenii*, *Crysophyllum marginatum*, *Luehea divaricata*, *Sebastiania commersoniana*, *Allophylus edulis*, *Cordia americana*, entre outras (SCIPIONI et al., 2010; ROVEDDER et al., 2014).

¹⁵ Conceitualmente, as florestas tropicais e subtropicais, são formadas por um mosaico de sucessão ecológica que compreende clareiras e áreas florestadas (fragmentos) em diferentes idades, ou fases do processo de sucessão.

Figura 8 - Localização do Parque Estadual Quarta Colônia.



Fonte: Acervo do Parque Estadual da Quarta Colônia (2020).

Figura 9 - Detalhe da vegetação florestal presente no Parque Estadual Quarta Colônia e entorno.



Fonte: Acervo Parque Estadual Quarta Colônia (2020).

3.2 ESPÉCIES ALVO

As espécies alvo, selecionadas para o estudo compreendem, duas espécies arbóreas invasoras: *Hovenia dulcis* Thunb. (uva-do-japão) (Figura 10- a, c) e *Psidium guajava* L. (goiaba) (Figura- b, d), incluídas na Portaria Sema nº 79/2013 que reconhece a lista de Espécies Exóticas Invasoras do estado do RS. As espécies foram escolhidas por apresentarem populações de plantas estabelecidas e amplamente dispersas no PEQC; ocuparem áreas significativas; transformarem habitats; e causarem impacto direto sobre a vegetação nativa da unidade.

Figura 10 - Aspectos taxonômicos e morfológicos das EEI alvo: a) detalhe das folhas da *H. dulcis*; b) detalhe das folhas para *P. guajava*; c) fisionomia de um agrupamento de *H. dulcis*; d) fisionomia de um indivíduo de *P. guajava*.



Fonte: Elaborado pela autora, acervo pessoal (2021).

Como as espécies alvo escolhidas ocorrem em meio à vegetação nativa, foram selecionadas duas espécies nativas para fins de comparação: *Luehea divaricata* Mart. & Zucc. (açoita-cavalo) (Figura 11 - a, c) e *Psidium cattleianum* Sabine (araçá) (Figura 11- b, d).

Figura 11 - Aspectos taxonômicos e morfológicos das Espécies nativas selecionadas: a) detalhe das folhas da *L. divaricata*; b) detalhe das folhas para *P. cattleianum*; c) fisionomia de um indivíduo isolado de *L. divaricata*; d) fisionomia de um indivíduo isolado de *P. cattleianum*.



O critério de seleção das espécies adotado considerou aspectos morfológicos e taxonômicos das plantas (o mais semelhante possível com a espécie invasora alvo) e a sua ocorrência local (frequência e densidade) (Quadro 4).

Quadro 4 - Comparativo entre espécies invasoras e nativas selecionadas para o estudo.

Grupo	Espécie	Descrição	Aspectos taxonômicos e morfológicos
INVASORA	<i>Hovenia dulcis</i> Thunb	Árvore caducifólia atinge até 25m de altura	Folhas simples alternas com dimensão de 10 a 15cm de comprimento e 7 a 12cm de largura
NATIVA	<i>Luehea divaricata</i> Mart. & Zucc.	Árvore caducifólia atinge até 30m de altura.	Folhas simples alternas com dimensão de 4,5 a 15cm de comprimento e 2 a 6,5cm de largura.
INVASORA	<i>Psidium guajava</i> L.	Árvore de pequeno porte com até 10 metros de altura ramificando-se a partir da base.	Folhas opostas, pecíolo com 3-10mm de comprimento; lâmina elíptica a oblonga, dimensões de 5-15cm de comprimento x 3-7cm de largura, glabra acima
NATIVA	<i>Psidium cattleianum</i> Sabine.	Árvore de pequeno porte com até 10 metros de altura ramificando-se a partir da base.	Folhas opostas, pecíolo com 3-10mm de comprimento; lâmina elíptica a oblonga, 5-15cm comprimento x 3-7cm largura, glabra acima

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

3.3.1 Atributos funcionais das folhas

Análises dos atributos funcionais das folhas de diferentes espécies contribuem para ampliar o conhecimento sobre o funcionamento dos ecossistemas (USTIN e GAMON, 2010;

WANG e GAMON, 2019). Todas as plantas contêm os mesmos componentes básicos, contudo, diferentes espécies contêm quantidades variáveis para cada um desses componentes, que são responsáveis por variações nos espectros de reflectância (KOKALY et al., 1998). A relação dos atributos funcionais das folhas e suas propriedades ópticas de espécies invasoras alvo (e nativas, para fins de comparação), pode inferir para discriminação dessas espécies e subsidiar a detecção e o mapeamento de plantas invasoras a partir do escalonamento dos dados obtidos a nível foliar para nível de dossel (JACQUEMOUD E USTIN, 2019; CAVENDER-BARES et al., 2020). O conjunto de atributos funcionais das folhas selecionados são apresentados no quadro 5, os quais foram obtidos por métodos destrutivos por meio de análises laboratoriais.

Quadro 5 - Conjunto de atributos funcionais das folhas relacionadas às suas características estruturais e ao conteúdo bioquímico.

Atributos Funcionais das Folhas	
Massa Seca	Área foliar específica (SLA)
	Massa foliar por área (LMA)
Água	Conteúdo de umidade combustível (FMC)
	Conteúdo / Teor de água (LWC)
	Espessura de água equivalente (EWT)
Pigmentos	Clorofila a (Clha)
	Clorofila b (Clhb)
	Clorofila total (Clh)
	Carotenoide (Car)
	Razão da Clha pela Clhb (Clha/Clhb)
	Razão de Carotenoide pela Clorofila total (Car/Clh)
	Soma da Clorofila a e b (Clh a+b)

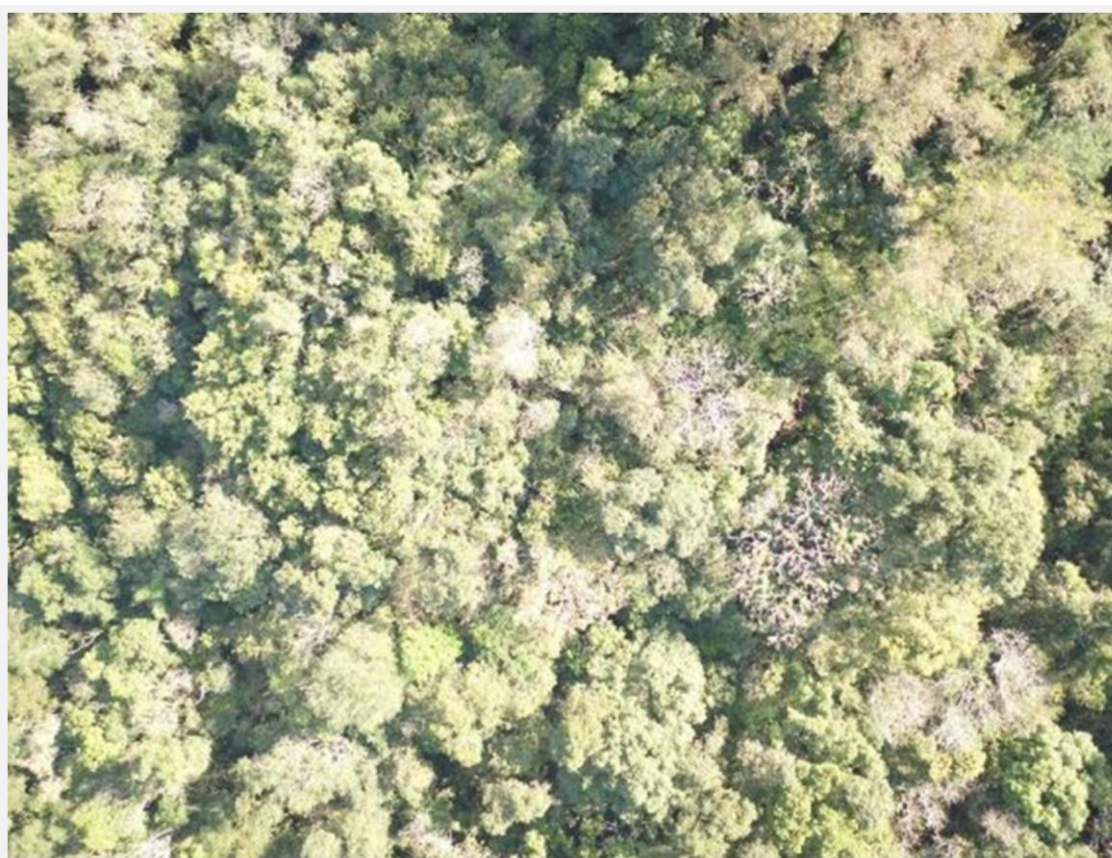
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.3.2 Área amostral

Os indivíduos amostrados encontram-se distribuídos em uma mesma área, sob mesma condição de luminosidade, caracterizada por um fragmento de floresta secundária com idade

aproximada de 20 anos (Figura 12). Todos os indivíduos amostrados são indivíduos adultos de porte arbóreo, sua posição geográfica encontra-se disposta no Quadro 6.

Figura 12 - Aspectos do dossel da área amostral em setembro de 2019. Imagem RGB obtida com o sensor *Zenmuse 5X* do Drone *Inspire - 1 Pró*.



Fonte: Obtenção da Imagem Adenilson Zanini (2019), organizado pela autora (2021).

Quadro 6 - Posição geográfica de cada indivíduo amostrado por espécie e seu respectivo código de identificação.

Espécie	Código	Coordenadas geográficas (WGS84)	
		Latitude	Longitude
<i>Hovenia dulcis</i> <i>Thunb</i>	HD01	-29°27'59''	-53°16'57,6''
	HD02	-29°27'58,8''	-53°16'57,5''
	HD03	-29°27'58''	-53°16'53,8''
	HD04	-29°27'57,3''	-53°16'53,9''
	HD05	-29°27'59,2''	-53°16'58''
	HD06	-29°27'59''	-53°16'57,7''
<i>Psidium guajava</i>	PG01	-29°27'59,3''	-53°16'57,6''
	PG02	-29°27'59,1''	-53°16'57,7''

	PG03	-29°27'59,3''	-53°16'58''
	PG04	-29°27'59,5''	-53°16'58,1''
	PG05	-29°27'59''	-53°16'57,7''
	PG06	-29°27'58,5''	-53°16'53,5''
<i>Luehea divaricata</i> Mart e Zucc	LD01	-29°27'59,2''	-53°16'57,8''
	LD02	-29°27'58,9''	-53°16'57,4''
	LD03	-29°27'59,5''	-53°16'57,3''
	LD04	-29°27'59,4''	-53°16'56,5''
	LD05	-29°27'59,3''	-53°16'55,9''
	LD06	-29°27'59,2''	-53°16'57,4''
<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	PC01	-29°27'58,9''	-53°16'53,8''
	PC02	-29°27'58,5''	-53°16'53,9''
	PC03	-29°27'58,3	-53°16'54,4''
	PC04	-29°27'58,6''	-53°16'54,4''
	PC05	-29°27'59''	-53°16'54,6''
	PC06	-29°27'58,2''	-53°16'54,4''

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.3.3 Amostragem

Na área amostral selecionada, foram identificados e marcados 6 indivíduos adultos de cada espécie dispersos na área. As coletas foram realizadas durante a primavera, selecionada por compreender o período de máxima ação fotossintética das plantas. A temperatura média no campo durante as coletas foi de 32°C e a umidade relativa de 49%. As coletas foram realizadas em dias sem vento e sem presença de nuvens. Foram realizadas 3 coletas no mesmo período, no intervalo das 10:00 às 13:30, perfazendo um total de 24 amostras por espécie, com 4 repetições (folhas) por amostra. Foram coletadas folhas do terço superior da copa.

3.3.4 Campo e laboratório

Para caracterização espectral foliar das espécies alvo do estudo, foi utilizada a técnica de espectroscopia de campo, considerando a quantidade de informações espectrais que ela fornece.

A determinação dos atributos funcionais das folhas ocorreu por emprego de métodos destrutivos na etapa de coleta e posterior determinação de conteúdo dos componentes em laboratório, para futura correlação com dados de reflectância espectral foliar.

As amostras são coletadas a partir do ramo situado no terço superior da copa com auxílio de um podão. Para cada ramo coletado são separadas 4 folhas por amostra. Foram descartadas

as folhas muito jovens, velhas ou com algum sintoma de doença visual. A distribuição das amostras é concomitante e todas são originárias do mesmo ramo. Foi adotado o seguinte procedimento sequencial: (1) Para cada indivíduo são coletados dois ramos situados no terço superior (Figura 13-a); (2) para cada ramo são extraídas 12 folhas; (3) 04 folhas destinadas à radiometria logo após a coleta, sendo que a medição foi feita com as folhas sobrepostas sobre um fundo preto (Figura 13-b); (4) 04 folhas para análise de pigmentos, embaladas em papel alumínio e armazenadas em isopor contendo nitrogênio líquido para conservação da amostra (Figura 13-c); (5) 04 folhas para análises de massa seca e conteúdo de água, armazenadas em embalagem *zip lock* contendo algodão umedecido e acondicionadas em isopor (Figura 13-d).

Figura 13 - Sequência de imagens exemplificando a amostragem realizada em campo: a) Identificação do indivíduo, anotação das coordenadas e informações auxiliares para posterior coleta das folhas; b) Radiometria para cada amostra de folhas (4 folhas sobrepostas), no detalhe calibração do equipamento; c) Armazenamento das folhas destinadas a extração de pigmentos e d) Armazenamento das folhas destinadas à obtenção do conteúdo de água e massa seca).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A radiometria foi realizada por amostra imediatamente após a coleta (tempo inferior a 10 minutos). É utilizado um espectrorradiômetro *FieldSpec® Handheld*, da ASD, na faixa de 300 a 1200nm, com resolução nominal de 3nm que pode chegar a 1nm por interpolação. Após a leitura, as folhas são descartadas. O espectrorradiômetro foi posicionado verticalmente sobre

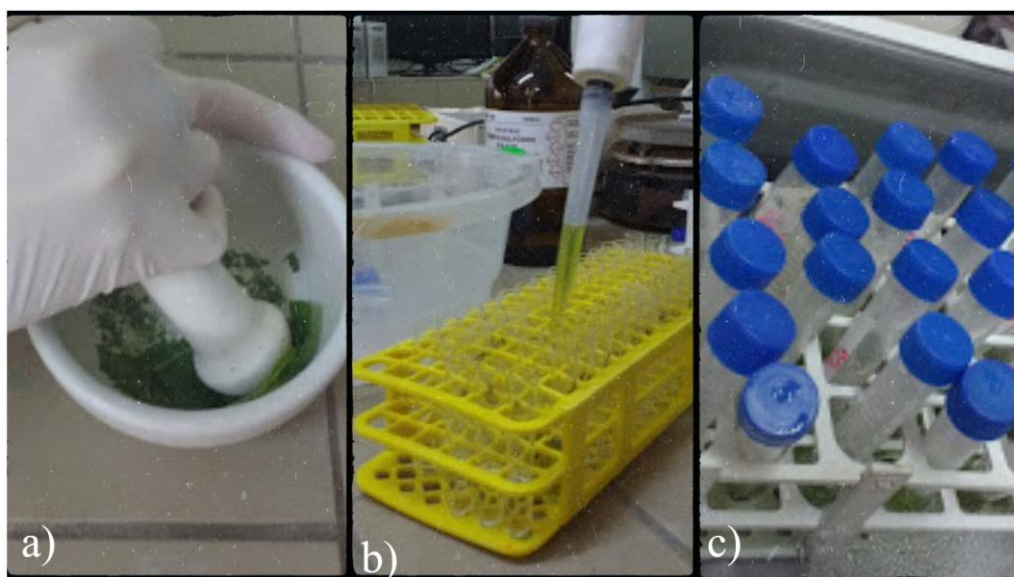
o alvo (folhas) a uma distância aproximada de 10 cm. O *Field of View* (FOV) do equipamento é de 25°, de forma a cobrir somente o alvo desejado (folhas). A posição do equipamento é movimentada de forma que o ângulo azimutal entre o Sol e o espectrorradiômetro seja mantido constante (90°). Também, foi mantido constante a distância entre o alvo e o equipamento, para que não houvesse influência de resposta espectral de objetos adjacentes. Foram evitadas as sombras no momento da medição, para não influenciar na resposta espectral das folhas.

O programa utilizado para aquisição das medidas radiométricas é o RS3, da ASD. A calibração é feita com uma placa de referência (lambertiana) antes da medição de cada amostra. Para cada alvo, placa de referência e folhas de vegetação, são coletadas dez medidas de radiância, usadas para o cálculo da média aritmética do conjunto de medidas de cada amostra, a fim de eliminar pequenas variações entre as medições para um mesmo alvo. Os dados são salvos no formato “*.asd” e o programa é *ViewSpecPro*, da ASD. Após, os dados foram convertidos em arquivo ASCII de formato “*.txt”.

No momento de aquisição dos dados a campo, para cada indivíduo amostrado foram coletadas informações meteorológicas: temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e inclinação solar. Foi usado o equipamento termo-higroanemometro (AKSO) e um clinômetro, e as informações foram anotadas em uma ficha auxiliar de campo.

Após as coletas, as amostras foram levadas diretamente para o laboratório de fisiologia vegetal da UFSM, com chegada por volta das 16h. As amostras de folhas coletadas para extração de pigmentos, transportadas em isopor contendo nitrogênio líquido, foram imediatamente armazenadas em freezer -80°C para evitar a degradação dos pigmentos clorofilados, até a realização das análises. O conteúdo de clorofilas e carotenóides é determinado em amostras frescas de folhas (0,05g) previamente maceradas com nitrogênio líquido (Figura 14 -a), as quais são incubadas a 65°C com dimetilsulfóxido (DMOS) até a remoção completa dos pigmentos (Figura 14-b, c), segundo o método de Hiscox; Israelstan (1979) e estimados usando a equação de Lichtenthaler (1987). As absorvâncias das soluções foram medidas em espectrofotômetro (Clem E-205D) a 663, 645 e 470 nm para clorofila-a, clorofila-b e carotenóides, respectivamente.

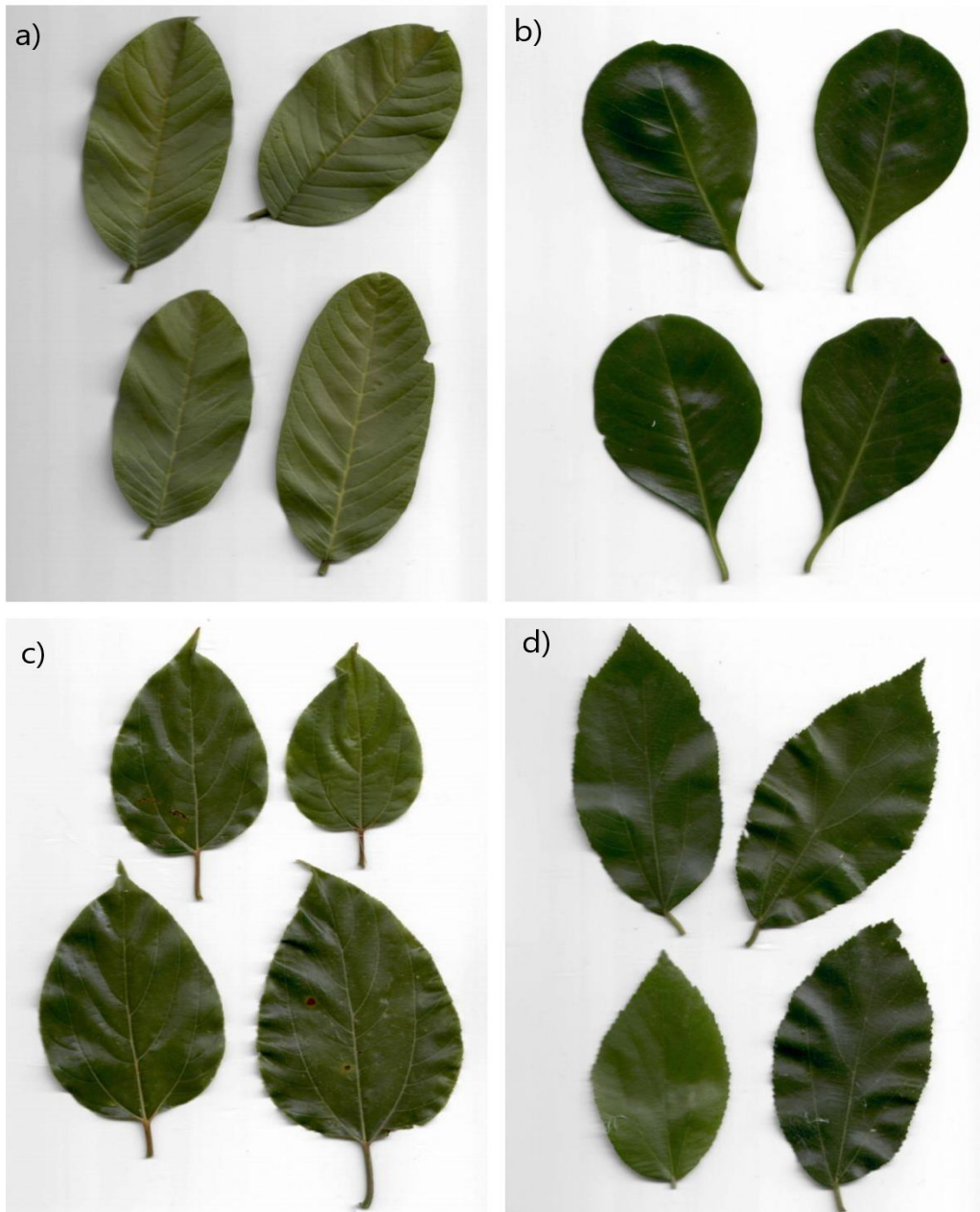
Figura 14 - Extração do conteúdo de pigmentos no laboratório.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Já o procedimento adotado para as amostras, armazenadas em embalagem *Zip lock*, imediatamente após chegada ao laboratório, ocorre na seguinte sequência: (1) escaneamento das folhas para posterior medição da Área foliar (Figura 15); (2) pesagem das folhas para obtenção da massa fresca; (3) condicionamento das amostras em estufa à temperatura de $\pm 65^{\circ}$ (Figura 16- a, b); (4) pesagem das folhas, que foi realizada após 15 a 20 dias na estufa (Figura 16-c), até atingirem um peso constante, para obtenção da massa seca. A pesagem das folhas é realizada com balança de precisão (Figura 16-d). Para medição da Área foliar foi usado o integrador Portátil AM 300 (ADC *scientific*).

Figura 15 - Folhas escaneadas em laboratório referente a uma amostra e individualizado por espécie: a) *P. guajava*; b) *P. cattleianum*; c) *H. dulcis* e d) *L. divaricata*.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 16 - Procedimentos adotados no laboratório para obtenção do conteúdo de água e massa seca: a e b) Condicionamento das folhas em estufa para obtenção do peso seco; c) Detalhe da estufa utilizada para secagem das amostras; d) Detalhe da balança de precisão utilizada para obtenção do peso fresco e seco das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises foram subdivididas em três etapas: (1) Análise dos Atributos funcionais das folhas; (2) Análise dos Espectros de Reflectância; (3) Análise integrada dos Atributos funcionais das folhas e dos Espectros de Reflectância. Para todas as análises foram utilizados os *softwares Excel* versão 2010 e suas ferramentas de análise de dados (produto licenciado *Microsoft 365*) e o *RStudio* (2020).

3.4.1 Análises dos Atributos Funcionais das Folhas

Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva dos dados para o conjunto de espécies, com um intervalo de Confiança de 95% para um nível de significância de 5%. Após, foi realizado o *Boxplot* (gráfico de caixa), utilizado para avaliar a distribuição empírica dos dados, por espécie. O *Boxplot* permitiu representar a relação entre uma variável quantitativa (atributos funcionais das folhas) e uma variável qualitativa (espécies). Ele é formado pelos valores do primeiro e terceiro quartil, e pela mediana.

3.4.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

Os atributos funcionais das folhas, os quais representam um total de 12 variáveis, foram submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA) para o conjunto total de amostras (96), com o objetivo de explicar quais as variáveis são responsáveis pela maior variabilidade dos dados originais. A PCA é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original. Associada à ideia de redução de dados, com menor perda possível da informação, dá-se a partir da transformação de um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão, denominadas de componentes principais. Cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, independentes entre si e estimados com o objetivo de reter o máximo de informação, em termos da variação total contida no conjunto de dados (HONGYU et al., 2016).

3.4.3 Análises dos Espectros de Reflectância

A análise dos espectros de reflectância baseia-se em uma técnica analítica que tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a radiação eletromagnética refletida da superfície dos objetos (folhas) e representá-la na forma de um gráfico, denominado curva de reflectância espectral (reflectância vs comprimento de onda). Foi realizada a interpretação das feições principais, com base nos valores médios do conjunto de espectros, com o objetivo de estabelecer as assinaturas espectrais para cada espécie.

3.4.4 Análise Discriminante Linear (LDA)

Sabe-se que dados espectrais são altamente correlacionados, por isso é recomendada a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas, como a Linear *Discriminant Analysis* (LDA), um método de classificação supervisionado, desenvolvido por Fisher em 1936. A LDA é amplamente utilizada em análises estatísticas para reconhecimento de padrões e tem como objetivo encontrar uma combinação linear de variáveis que caracterizam ou separam duas ou mais classes de objetos (HASTIE et al., 2001; BANDOS et al., 2009).

Portanto, usamos a LDA como método supervisionado de classificação para discriminar as espécies, com aplicação do método de validação 70/30 (70% das variáveis são usadas para

gerar o modelo e 30% para testar o modelo). Para avaliar a capacidade de generalização do modelo, foi usado o método de validação cruzada *Leave-one-out* (LOO), onde K é igual ao número total de dados (N). O método *Leave-one-out* é um caso específico do *k-fold*, nesta abordagem, são realizados N cálculos de erro, um para cada dado. Para a seleção do número de comprimentos de onda mais informativos, foi utilizado o método de seleção direta *Stepwise*. A seleção direta adiciona individualmente variáveis ao modelo de acordo com o nível de significância p - value ($p < 0,05$) para inclusão de novas variáveis, sendo que este processo se encerra quando o último comprimento de onda de entrada não apresentar diferença significativa ($p < 0,05$).

3.4.5 Análise integrada dos Atributos funcionais das folhas e dos Espectros de Reflectância

Primeiramente, correlacionamos o conteúdo dos atributos foliares com seus respectivos espectros de reflectância medidos *in situ* para todas as variáveis, para cada espécie individualmente. Foram geradas matrizes de correlação com o coeficiente de correlação de Pearson (r) e teste (t) de *Student* em níveis de significância de 5% e 1%.

As razões de banda simples e combinações de bandas estreitas são métodos de análise espectral popularmente utilizados para estimar parâmetros biofísicos e bioquímicos, em nível foliar e de dossel, e constituem uma abordagem clássica em sensoriamento remoto (JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Portanto, para a identificação dos comprimentos de onda mais significativos, utilizamos a técnica baseada no Ambiente de Correlação Interativa (ICA), recomendada por promover uma resposta rápida, de alta precisão e adaptação empírica, para uma ampla gama de variáveis associadas a sensores hiperespectrais (OGASHAWARA et al., 2014). A técnica foi aplicada para cada variável em função do conjunto de espectros agrupados para todas as espécies e posteriormente individualizado por Espécie Exótica Invasora.

Por último, foi aplicado o Modelo de Regressão Linear Simples (MRLS) para determinar as propriedades ópticas funcionalmente significativas (Tipo óptico ou Espécie Espectral), com base nos atributos funcionais foliares mais expressivos por espécie em função da melhor correlação (r) da Razão Simples obtida pelo método do ICA. Para avaliar o desempenho dos modelos com base na Razão Simples, foram utilizadas técnicas tradicionais baseadas em regressão, como o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a soma do quadrado dos resíduos (SQR).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ATRIBUTOS FUNCIONAIS DAS FOLHAS

Atributos funcionais fornecem *insights* sobre espécies e processos ecossistêmicos, conectam a composição das espécies ao funcionamento do ecossistema. Ademais, podem influenciar na aquisição e alocação de recursos (*trade-offs*¹⁶), seja para apoiar o crescimento, a sobrevivência ou a reprodução das espécies. Atributos morfológicos, anatômicos, fisiológicos, bioquímicos e características fenológicas das plantas respondem a fatores e pressões ambientais, afetam determinadas cadeias tróficas e imprimem benefícios e prejuízos quanto aos aspectos ecológicos e socioeconômicos (HE et al., 2019; JACQUEMOUD e USTIN, 2019; KATTGE et al., 2019; CAVENDER-BARES et al., 2020).

A compreensão desses atributos funcionais em nível de folha é de extrema importância, pois essas características estão relacionadas à estrutura e funcionamento ecossistêmico. As propriedades estruturais, bioquímicas, fisiológicas e fenológicas das plantas regulam, em suma, a sua capacidade de propagar ou sobreviver em diversos ambientes (CAVENDER-BARES et al., 2020). Selecionamos 12 características com base em sua forte relevância ecológica, variação entre espécies e propriedades espectrais mensuráveis. Os atributos selecionados são indicativos de fotossíntese quanto ao seu conteúdo bioquímico (pigmentos fotossintetizantes - Clorofila a, b e carotenóides) e relacionados à estrutura e fisiologia foliar com base na massa seca (SLA e LMA) e conteúdo de água (FMC, LWC e EWT).

A síntese estatística dos atributos funcionais das folhas das espécies estudadas, para o conjunto total de amostras são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Síntese estatística de 12 características foliares para 96 amostras coletadas de 4 espécies (*P. cattleianum*, *P. guajava*, *L. divaricata* e *H. dulcis*). **Vars (variável); n (número de amostras); mean (média aritmética); sd (desvio padrão); median (mediana); trimed (média truncada); mad (desvio absoluto médio); min (mínimo); max (máximo); range (amplitude total); skew (assimetria); kurtosis (curtose); se (erro padrão)**. Conteúdo de umidade do combustível (FMC) (%); Conteúdo de água (LWC)(%); Espessura equivalente de água (EWT) (g.m⁻²); Massa foliar por área (LMA) (g.m⁻²); Área foliar Específica (SLA) (cm².g⁻¹); Conteúdo de Clorofila-a (Clha) (µg.cm⁻²); Conteúdo de Clorofila-b (Clhb) (µg.cm⁻²); Conteúdo total de Clorofila (Clh) (µg.cm⁻²); Conteúdo de carotenoide (Car) (µg.cm²); Razão da Clorofila a:b

¹⁶ Pode ser traduzido como “demandas conflitantes”. O termo expressa o conflito evolutivo entre características relacionadas às atividades fundamentais de todos os organismos vivos (sobreviver, crescer e reproduzir). Em ecologia, pode ser interpretado como reflexo das diferenças de nicho entre as espécies; utilizado para explicar mecanismos de coexistência entre espécies e processos sucessionais;

(Clha/Clhb); Razão do carotenoide pela clorofila total (Car/Clh); Conteúdo de Clha+Clhb (Clha+b). Intervalo de Confiança de 95% para um nível de significância de 5%.

	vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
FMC	1	96	233,33	102,68	203,71	216,04	73,56	118,71	627	508,28	1,71	2,9	10,48
LWC	2	96	67,82	7,56	67,07	67,43	8,02	54,28	86,24	31,97	0,43	-0,46	0,77
EWT	3	96	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,54	-1	0
LMA	4	96	105,96	44,49	99,45	100,92	30,27	44,38	246,56	202,18	1,1	0,71	4,54
SLA	5	96	110,06	42,53	100,55	106,68	37,23	40,56	225,32	184,76	0,7	0,13	4,34
Clha	6	96	23,75	8,98	22,83	23,25	8,08	7,36	46,81	39,45	0,46	-0,14	0,92
Clhb	7	96	7,73	3,16	7,71	7,55	3,45	2,18	17,51	15,33	0,58	0,18	0,32
Clh	8	96	56,74	21,03	53,8	55,49	19,8	17,15	115,32	98,17	0,54	0,07	2,15
car	9	96	9,56	3,22	9,78	9,63	3,56	2,6	15,72	13,13	-0,24	-0,8	0,33
Clha/Clhb	10	96	3,22	0,87	3,11	3,19	0,72	1,41	5,19	3,79	0,38	-0,34	0,09
Car/Clh	11	96	0,17	0,03	0,17	0,17	0,02	0,12	0,28	0,16	1,33	2,6	0
Clha+b	12	96	31,48	11,67	29,88	30,79	11,03	9,54	63,83	54,29	0,54	0,05	1,19

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.1 Massa seca

A competição por luz em ambientes florestais é favorecida pela construção de área foliar que implica em maior alocação de recursos para as folhas. A eficiência na captura de luz é expressa pela Área foliar específica (SLA), a qual tende a reduzir em ambientes com maior oferta de luz. Normalmente, espécies com folhas grossas, epiderme e mesofilo grossos, possuem baixo SLA. Em contraponto, árvores em ambientes com baixa luminosidade desenvolvem maior SLA, como estratégia para capturar mais luz (YUAN et al., 2016; PINHEIRO et al., 2017).

As folhas com baixos valores de SLA normalmente resistem por períodos mais longos, quando comparadas a folhas com maior SLA, o que sugere um uso mais conservador dos recursos. Os valores baixos resultam do investimento no tecido (epiderme) e no aumento da espessura do mesofilo; proporcionam economia de água e auxiliam nos mecanismos de fotoproteção (VOGUELMANN, 1993; WILSON et al., 1999, VILE et al, 2005).

A SLA é indicada como uma das características ecologicamente mais relevantes e bem amostradas no *TRY database*, cujos valores encontrados para as espécies estudadas encontram-

se amparados pelo referido banco de dados. Contudo, apesar de contar com muitas características e observações, para mais de 100.000 espécies diferentes de plantas, 90% das espécies com melhor cobertura de dados são originárias da Europa Central ou do Norte (KATTGE et al., 2019). No presente estudo, os valores obtidos encontram-se entre 40 e 225 ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). Os maiores valores foram encontrados para a invasora *H. dulcis*, seguida pela nativa *L. divaricata*, ambas caducifólias. *P. cattleianum* obteve os menores valores para SLA e a invasora *P. guajava* possui a menor variabilidade intraespecífica (entre indivíduos da mesma espécie) para o conjunto de amostras, conforme demonstrado na Figura 17 -a.

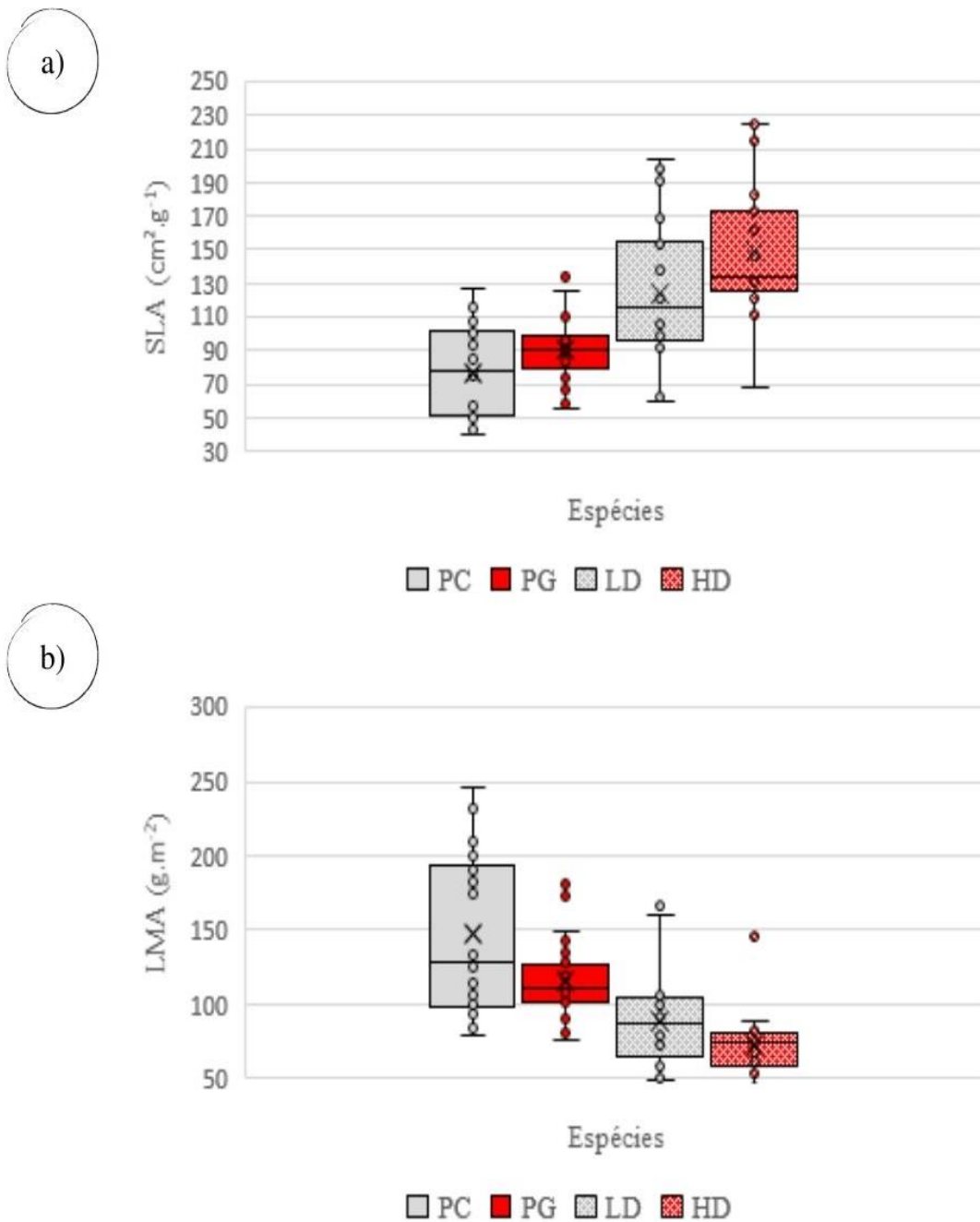
A massa foliar por área (LMA) é determinada por componentes de massa, incluindo a massa fotossintética e a massa estrutural, que afeta a longevidade e dureza da folha, ou seja, conteúdos de massa com diferentes funções biológicas. A maior parte da variação da LMA dentro das espécies está associada à variação na **massa fotossintética**, enquanto a maioria da variação da LMA na flora global (entre espécies) está associada à variação da **massa estrutural** (OSNAS et al., 2018). Contudo, os autores também sugerem que ambos os componentes podem contribuir para a variação de LMA em uma dada comunidade. Wright et al. (2004) evidenciaram um espectro de economia foliar baseado em massa, que utilizou a interpretação para baixos valores de LMA representantes de folhas de vida curta com retornos fotossintéticos rápidos e de alto custo, e valores de alta LMA para folhas de vida longa com retornos fotossintéticos lentos.

As espécies aqui estudadas apresentaram, em suma, alta variabilidade entre espécies, com valores entre 44 e 246 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (Figura 17-b), valores estes compreendidos no intervalo de 15 e 622 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, conforme descrito por Martin et al. (2020), com base nas folhas do topo do dossel coletadas de 12.012 árvores tropicais como parte do “Programa Spectranomics” (ASNER e MARTIN, 2009). Os autores obtiveram valores médios entre 113,63 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, com um Desvio Padrão (SD) de 44,44 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, similares aos valores obtidos neste estudo, no qual foi encontrado para o grupo de espécies o valor médio de 105,95 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ e SD de 44,49 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$.

As espécies perenifólias obtiveram os maiores valores de LMA com destaque para a nativa *P. cattleianum* (147,18 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), que apresentou os maiores valores e a maior variabilidade intraespecífica, seguida pela invasora *P. guajava* (110,4 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) e pela nativa *L. divaricata* (85,53 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). Os menores valores foram encontrados para a invasora *H. dulcis* (68,64 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). Também, cabe destacar que as invasoras apresentaram a menor variabilidade intraespecífica. Os valores obtidos neste estudo, apresentam valores próximos ao limite superior identificado por Ferret et al. (2011), entre 8 e 331 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, além de ratificar o descrito por Jaquemond e Ustin (2019), que

valores mais baixos são encontrados para espécies decíduas (*H. dulcis* e *L. divaricata*) quando comparadas a espécies perenes (*P. guajava* e *P. cattleianum*).

Figura 17 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) SLA ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) e (b) LMA ($\text{g}.\text{m}^{-2}$) por espécie (PC= *P. cattleianum*; PG=*P. guajava*; LD=*L. divaricata*; HD= *H. dulcis*).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.2 Água

A sobrevivência para a maioria das plantas terrestres depende da capacidade das folhas em manterem uma alta taxa fotossintética, evitando a perda de água por dessecação. A captação de CO₂ pelos estômatos é associada, inevitavelmente, à perda de água do tecido fotossintético para a atmosfera. Nesse sentido, o espectro econômico da folha (LES) e suas características hidráulicas estão simultaneamente envolvidas no processo de assimilação de CO₂, que podem depender da disponibilidade de água. Ademais, características morfológicas das espécies, como venação¹⁷ e estomáticas, podem estar relacionadas a um equilíbrio no consumo de água (FLEXAS et al., 2013; NARDINI e LUGLIO, 2014; ZWIENIECKI e BOYCE, 2014; YIN et al., 2018).

O teor de água na folha pode ser estimado em relação à massa foliar fresca (LWC), também denominado conteúdo de água gravimétrica (GWC) e é expresso em percentual (JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Foi usado por CHENG et al. (2011) para estimar o conteúdo de água em espécies de árvores e lianas, os autores obtiveram valores entre 24% e 80%, com um valor médio de aproximadamente 57%. Para as quatro espécies arbóreas analisadas nesse estudo, obtivemos valores entre 54% e 86%. A espécie nativa *L. divaricata* obteve os maiores valores para o conjunto total de dados e a maior variabilidade intraespecífica. Contudo, quando comparamos as médias, a invasora *H. dulcis* apresentou o maior valor médio entre as espécies (Figura 18-a).

O teor de umidade combustível (FMC) é uma medida relativa do conteúdo de água da vegetação obtido a partir de medições de peso fresco e seco da folha, ou seja, está relacionado ao conteúdo de água retido na folha e o seu teor de matéria seca. Portanto, ele expressa o teor de água como uma porcentagem de peso seco da folha (DANSON e BOWYER, 2004). O FMC é frequentemente aplicado ao SR para quantificar a suscetibilidade da vegetação ao fogo em nível foliar e de dossel (RIÑÑO et al., 2005; WANG et al., 2017; YEBRA et al., 2018; HILL et al., 2019).

Jacquemoud e Ustin (2019), com base em conjuntos de dados de Jacquemoud e Baret (1990), Hosgood et al. (1995), Féret et al. (2008) e Asner e Martin (2009), afirmaram que o FMC apresenta valores em torno de 250% para amostras com valores de espessura equivalente de água (EWT) em torno de 200 g.m⁻², em consonância com os valores médios encontrados para as espécies aqui estudadas, entre 190 e 260%. Em geral, para todo o conjunto de dados

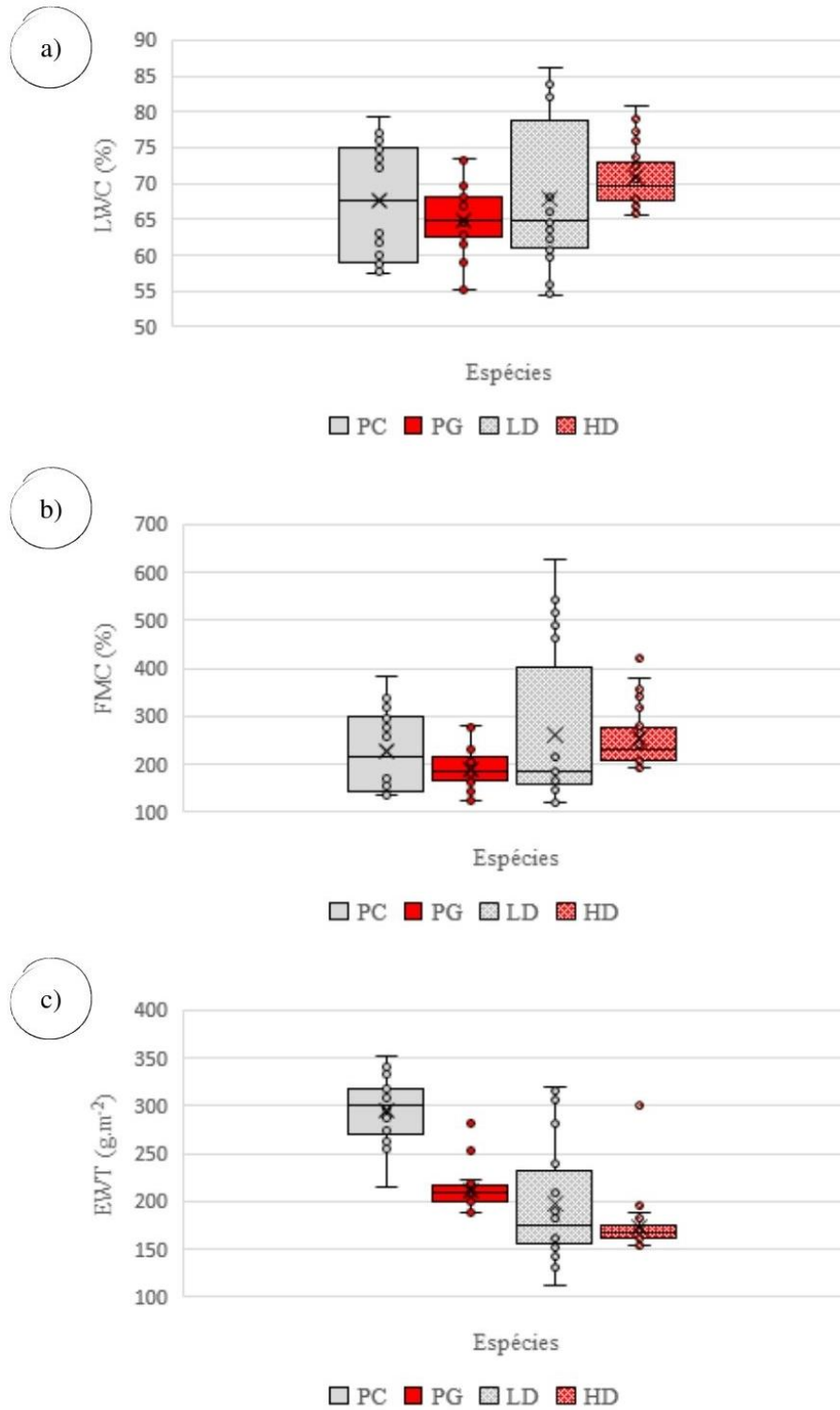
¹⁷ É a distribuição do conjunto de nervuras de uma folha.

amostrados, os valores mais altos foram obtidos para as espécies nativas, assim como a maior variabilidade intraespecífica. Em contraponto, as invasoras obtiveram valores menores para a amplitude de dados e menor variabilidade intraespecífica (Figura 18-b).

A água na vegetação é essencial para todos os processos fisiológicos e outra forma de quantificar o seu conteúdo é a partir da espessura equivalente de água na folha (EWT), que é definido como a quantidade de água líquida em uma determinada área foliar. O EWT é amplamente utilizado no SR para monitorar o estresse hídrico (YILMAZ et al., 2008; LISAR et al., 2012; MENDIGUREN et al., 2015; ELSHERIF et al., 2018) e pode ser aplicado para estimar o teor de umidade do combustível (FMC), como vimos uma métrica chave na modelagem de incêndios florestais (DANSON e BOWYER, 2004).

O EWT foi um dos atributos analisados por Féret et al. (2011) para 1.400 folhas de espécies florestais. Os autores encontraram um valor médio de 129 g.m^{-2} cm com uma amplitude entre 43 g.m^{-2} e 713 g.m^{-2} , o que contempla os dados encontrados para as espécies aqui analisadas e que apresentaram um valor médio de 219 g.m^{-2} , com uma amplitude entre 110 g.m^{-2} e 352 g.m^{-2} . Conforme apresentado na Figura 18-c, a espécie nativa *P. cattleianum* obteve os maiores valores e, no geral, as invasoras apresentaram valores menores quando comparadas às nativas correspondentes, ou seja, morfologicamente semelhantes. Também, as invasoras apresentaram menor variabilidade intraespecífica.

Figura 18 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) LWC (%), (b) FMC (%) e (c) EWT (g.m^{-2}) por espécie (PC= *P. cattleianum*; PG= *P. guajava*; LD= *L. divaricata*; HD= *H. dulcis*).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.3 Pigmentos

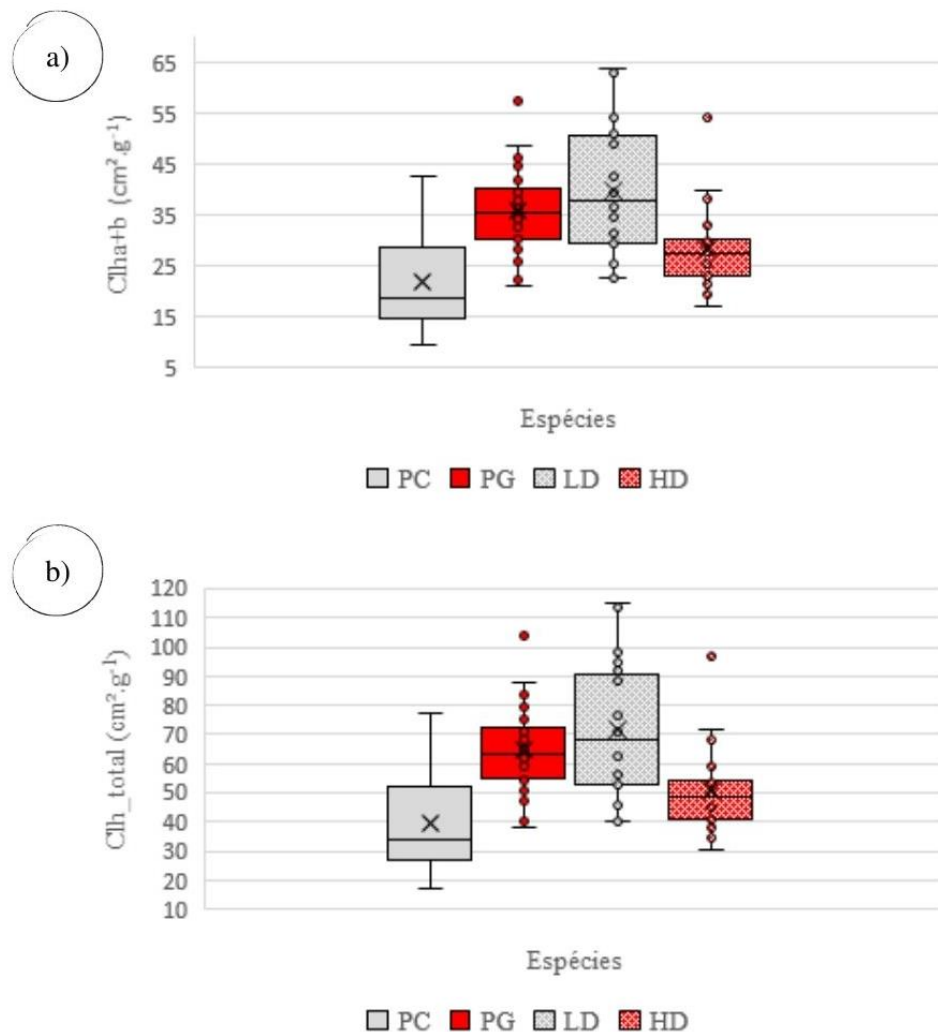
A descoberta dos pigmentos fotossintéticos conduziu o atual estado da arte sobre a cor das folhas. Sabe-se que todos os pigmentos fotossintéticos estão localizados nos cloroplastos, que são organelas ligadas à membrana e distribuídas no citoplasma das células, localizados no mesófilo das folhas. Os pigmentos em nível foliar variam dependendo da espécie, do ciclo fenológico e das condições ambientais. Eles são condicionados pela luz e pela temperatura. Eles entram em funcionamento imediatamente após a exposição à luz, intensificando o verde nas folhas maduras, característica de uma folhagem fotossinteticamente ativa. Em contraponto, na senescência foliar, a clorofila é perdida antes de outros pigmentos, o que determina as cores em tons amarelos e vermelhos, dominada por pigmentos de carotenóides e antocianinas (JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Para USTIN e JACQUEMOUD (2020) informações adquiridas sobre a composição dos pigmentos fotossintéticos (clorofilas, carotenóides e antocianina) fornecem uma base para diferenciação de espécies e suas possíveis relações filogenéticas quando aplicadas ao SR.

A clorofila, em especial, explica a coloração verde atribuída a vegetação e consiste, em quantidade e qualidade, no principal pigmento fotossintético. Nas folhas das plantas superiores, é encontrada em duas formas: clorofila-a como pigmento principal e clorofila-b como pigmento acessório. Além da clorofila-a e da clorofila-b, a antena fotossintética (associação organizada de pigmentos que capturam fótons e transfere energia para o centro de reação da clorofila-a) contém outros pigmentos acessórios, que incluem β -caroteno, luteína e os pigmentos do ciclo de xantofila. As moléculas desses pigmentos desempenham papel essencial no início da cadeia alimentar, pois permitem ampliar a faixa de comprimento de onda usada para captura de luz e, também servem a outras funções na fotossíntese (LICHTENTHALER, 1987; JACQUEMOUD e USTIN, 2019).

Féret et al (2011) encontraram valor médio de $32,81 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ clorofila a+b, com uma alta amplitude (entre $0,30$ e $106,72 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), em estudo realizado englobando 1417 folhas correspondentes a cerca de 120 espécies em diferentes condições de crescimento e estágio de desenvolvimento. Para as quatro espécies analisadas neste estudo, encontramos valores entre $9,54$ e $63,83 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ e $17,15$ e $115,32 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, com um valor médio global de $31,48 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ e $56,74 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ para clorofila a+b e para clorofila total, respectivamente. Conforme observado nas Figuras 19-a e 19-b, a espécie nativa *L. divaricata* apresentou os maiores valores, seguida pela invasora *P. guajava*. As invasoras apresentaram menor dispersão na distribuição dos dados, representada pelo intervalo interquartilico (tamanho da caixa), assim como uma

distribuição mais simétrica dos dados, sobretudo a *P. guajava*, o que resulta em uma menor variabilidade intraespecífica.

Figura 19 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) Clh a+b ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e (b) Clh_total ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) por espécie (PC= *P. cattleianum*; PG=*P. guajava*; LD=*L. divaricata*; HD= *H. dulcis*).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

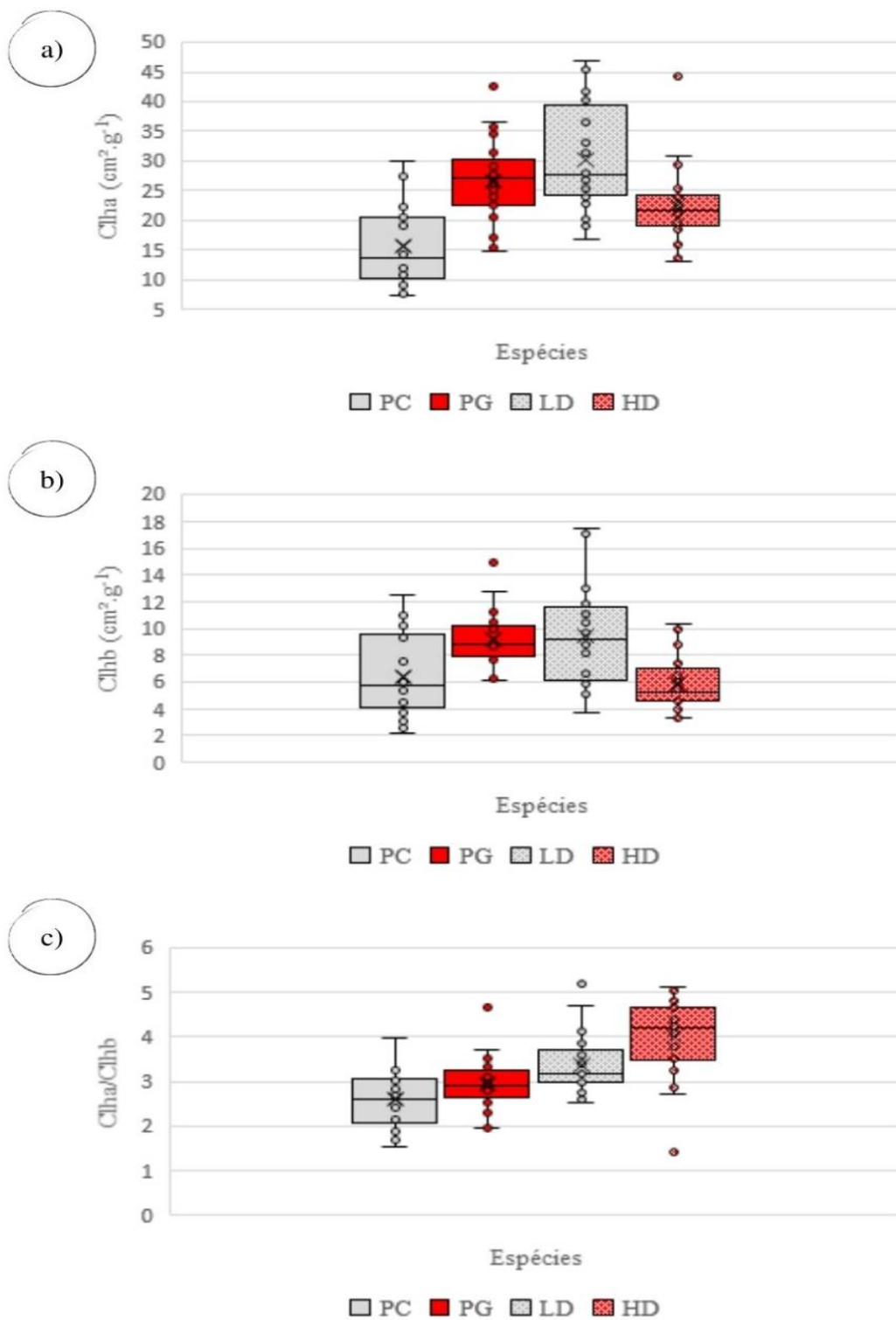
A clorofila-a é mais abundante que a clorofila-b, e é encontrada numa proporção aproximada de 3:1 (SCHEER, 2007, 2008), assim como descrito por Martin (2020), com base nos valores obtidos pelo programa “Spectranomics”, a quantidade de clorofila-a é três vezes maior que a clorofila-b, e possui um maior desvio padrão (SD) para o conjunto de dados. Do mesmo modo, neste estudo, encontramos um valor médio de $23,75 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ para Clh-a e $7,73 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ para Clh-b para o total de amostras analisadas, e um SD maior para Clh-a (8,98) em

comparação a Clh-b (3,16). Quando analisamos o conteúdo entre as espécies para Clh-a (Figura 20-a), a maior concentração de conteúdo, com base nos valores médios, é registrada respectivamente para: *L. divaricata* (30,38 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$); *P. guajava* (25,96 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$); *H. dulcis* (21,45 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e *P. cattleianum* (15,55 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Já em relação ao conteúdo de Clh-b (Figura 20-b) as maiores concentrações também foram observadas para *L. divaricata* (9,46 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e *P. guajava* (8,88 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), seguida pela nativa *P. cattleianum* (6,42 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2a}$) e pela invasora *H. dulcis* (5,9 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). De modo geral, as invasoras apresentaram menor amplitude e menor dispersão dos dados, que consiste em uma menor variabilidade intraespecífica quando comparadas as nativas.

A morfologia da planta, fisiologia, e alocação de recursos, variam com o nível de irradiância a que as plantas estão aclimatadas e/ou restritas ecologicamente. Sua resposta a esses diferentes níveis identificaria o padrão de aclimação e possível vantagem adaptativa (KITAJIMA e HOGAN, 2003). A razão da clorofila-a para a clorofila-b (Clha/Clhb) pode ser uma resposta fotossintética do processo de aclimação ao ambiente em função da luz. Para muitos autores, é um parâmetro chave para avaliar a tolerância das espécies em relação a ambientes com pouca luminosidade, ou seja, espécies tolerantes à sombra apresentam maior proporção de Clh-b em relação à Clh-a, o que resulta em menores valores da razão Clha/Clhb. A resposta sugere que essas espécies possuem uma maior eficiência na absorção de luz e, portanto, são mais tolerantes a ambientes sombreados (GIVNISH, 1988). Em geral, a razão de Clha/Clhb varia entre 2,0 e 4,0 para a maioria das plantas vasculares (CHANG e TROUGHTON, 1972; ALBERTE et al., 1976; MARTIN, 1980).

Entre as espécies estudadas, conforme demonstrado na Figura 20-c, a nativa *P. cattleianum* (2,58) seguida pela invasora *P. guajava* (2,85) apresentam a menor razão entre a Clha/Clhb e, portanto, seriam mais tolerantes a ambientes sombreados. A espécie *P. guajava* encontra-se em processo de invasão, e é fortemente observada em áreas abertas, bordas de floresta e ambientes degradados. Entretanto, esta informação acende um alerta sobre a capacidade da espécie em se adaptar a ambientes sombreados e avançar seu processo de invasão sobre o sub-bosque de florestas tropicais e subtropicais, o que acarretará um grande prejuízo a esses ecossistemas. A invasora *H. dulcis* apresentou a maior razão e a maior variabilidade intraespecífica (dentro da espécie), o que reflete uma maior necessidade quanto a disponibilidade de luz nos ambientes, característica típica de espécies pioneiras, portanto, o seu processo de invasão é favorecido pela degradação e perturbação dos ecossistemas florestais.

Figura 20 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) Clh-a ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$); (b) Clh-b ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e (c) Clha/Clhb por espécie (PC= *P. cattleianum*; PG=*P. guajava*; LD=*L. divaricata*; HD= *H. dulcis*).

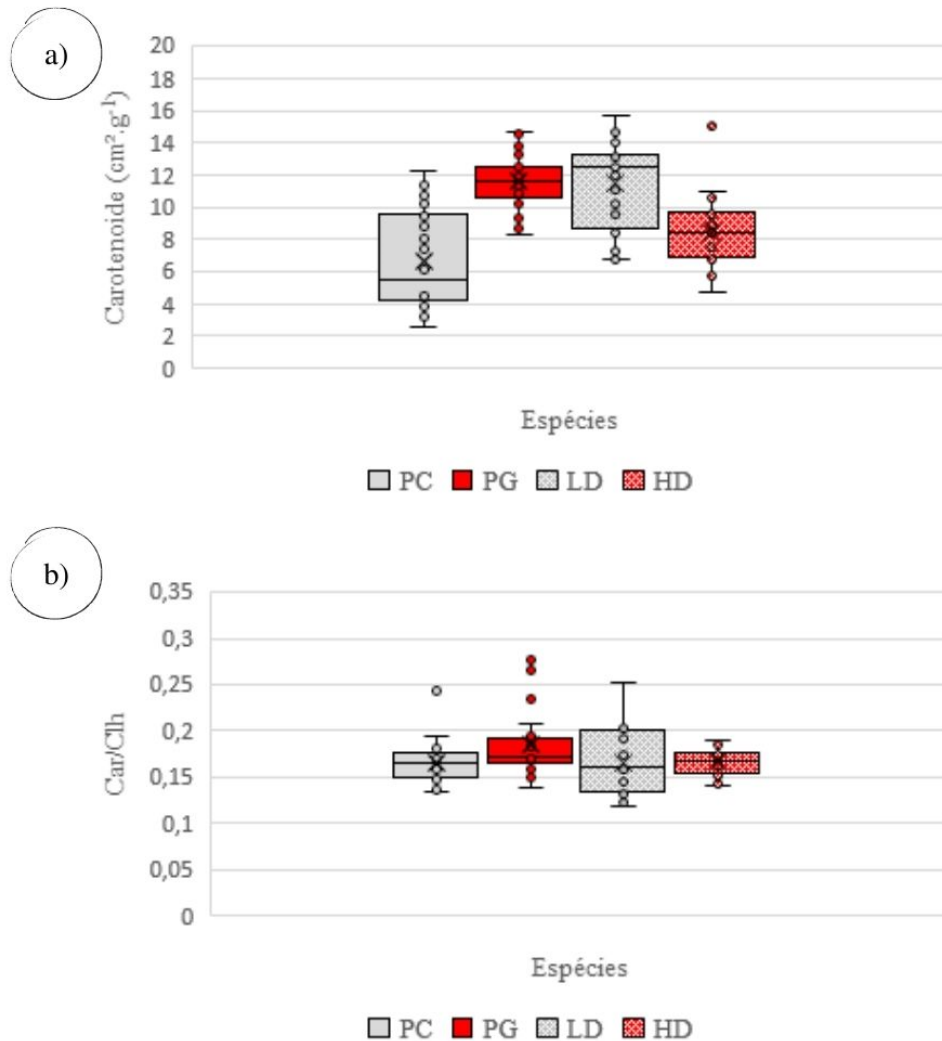


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os carotenóides são provavelmente a classe de pigmentos mais amplamente distribuída encontrada na natureza, em plantas superiores são biossintetizados e acumulados nos cloroplastos. Assim como as clorofilas, são encontradas em ambos os fotossistemas (PSI e PSII). Os carotenóides estão sob síntese e degradação constantes, embora as concentrações totais permaneçam aproximadamente iguais à concentração de clorofila-a (BEISEL et al., 2010, JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Para as espécies analisadas neste estudo, de modo geral, a concentração de carotenóides em relação a Clh-a é maior, ocorrendo na proporção 2,5:1. Conforme demonstrado na Figura 21-a, a espécie invasora *P. guajava* ($11,59 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) seguida pela nativa *L. divaricata* ($11,49 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) apresentaram os maiores valores médios para o conteúdo. Em contraponto, a nativa *P. cattleianum* ($6,69 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e a invasora *H. dulcis* ($8,15 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) apresentaram os menores valores médios.

A razão do conteúdo de carotenóides em função da clorofila (Car/Clh) consiste em um indicador sensível da atividade fotossintética, das mudanças no desenvolvimento e de respostas ao estresse da vegetação. Reflete as mudanças nos conteúdos de clorofila e carotenóides, com valores entre 0,1 e 0,8 (GITELSON, 2020). De modo geral, os valores obtidos para a gama de espécies analisadas neste estudo apresentaram baixa variação ($SD < 0,03$) com valores entre 0,11 e 0,25 (Figura 21-b). O valor mais alto para razão Car/Clh, com base nos valores médios, foi observado para invasora *P. guajava* (0,18). As invasoras apresentaram a menor variabilidade e maior simetria na distribuição para o conjunto de dados observados, quando comparada às espécies nativas.

Figura 21 - BoxPlot com a distribuição dos valores de (a) Carotenoide ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) e (b) Car/Clh por espécies (PC=*P. cattleianum*; PG=*P. guajava*; LD=*L. divaricata*; HD=*H. dulcis*).



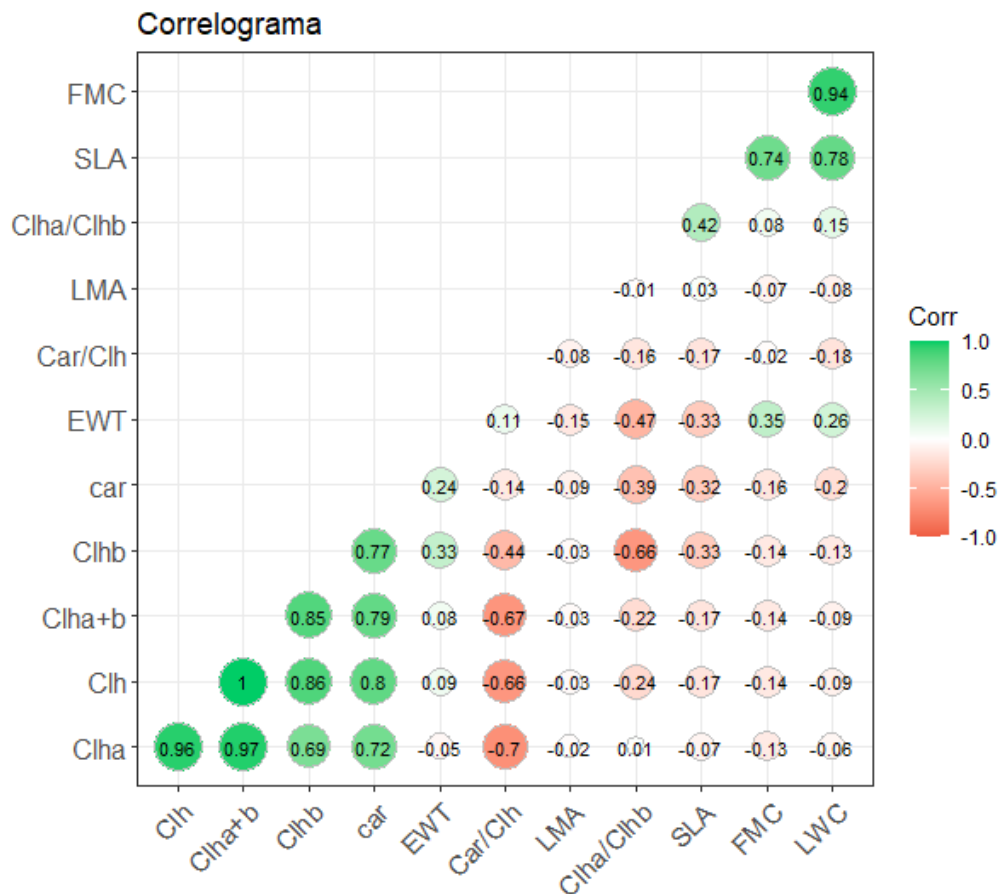
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.4 Análise de Componentes Principais (PCA)

Para extração das componentes principais utilizou-se a matriz de correlação, com a escala dos dados padronizados (Figura 22). Após, é realizada a padronização dos dados (média=0, variância =1) e aplicado o teste de esfericidade de *Bartlett*, o qual testa a hipótese de que a matriz de correlação das variáveis explicativas não é apenas uma matriz identidade, o que indicaria que seus elementos não estão correlacionados e, portanto, estariam inadequados para aplicação da PCA. Para o teste de *Bartlett*, obtivemos $p\text{-value} < 2,2 e^{-16}$, onde: H_0 indica

ausência de correlação ($p \geq 0,05$) e H1 presença de correlação para ($p < 0,05$), ou seja, o teste indicou que há presença de correlação, logo a análise é apropriada.

Figura 22 - Matriz de correlação.



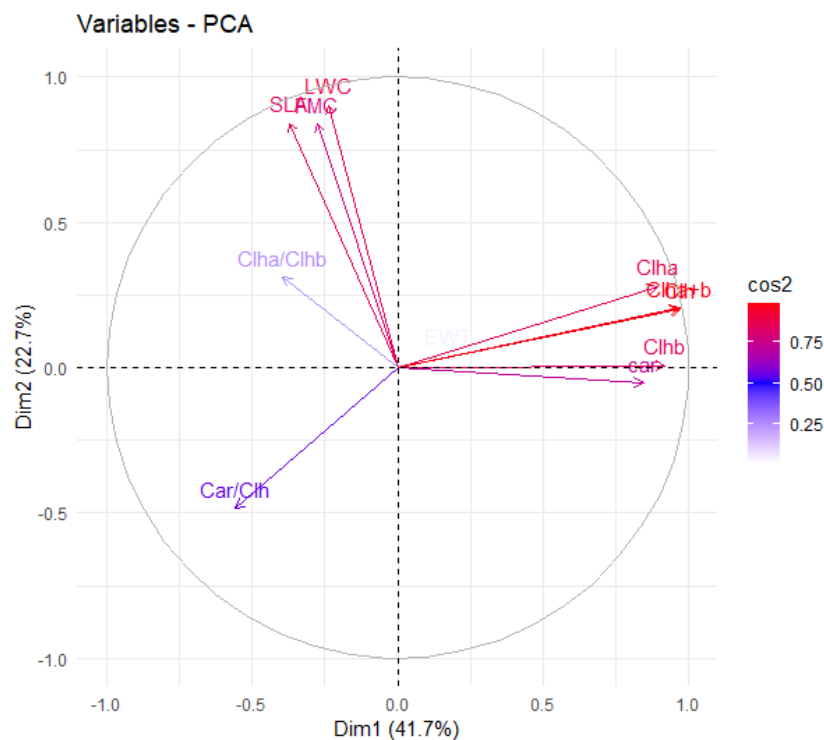
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Foi observada alta correlação entre os pigmentos fotossintetizantes, já esperada de acordo com a literatura. FMC e LWC foram altamente correlacionados (0,94) e demonstraram correlação expressiva para SLA. Para Jacquemoud e Ustin (2019), FMC e EWT são perfeitamente correlacionados quando LMA é constante, o que não foi observado para esse conjunto de dados ($r=0,35$), o que corrobora para afirmativa que existe uma alta variabilidade entre espécies para os valores de LMA.

Normalmente, os primeiros componentes capturam a maior parte da variação em todo o conjunto de dados, é uma técnica que auxilia na identificação de um pequeno conjunto de variáveis sintéticas, chamadas autovetores ou fatores, os quais explicam a maior parte da variação total (PCA). O mapa fatorial (Figura 23), permitiu realizar a visualização entre os

componentes e as variáveis. Podemos observar que a primeira componente explica 41,7% da variabilidade dos dados, enquanto a segunda componente explica 22,7%. O mapa foi adequado para explicar 64,4% da variabilidade do conjunto de dados nas duas primeiras componentes.

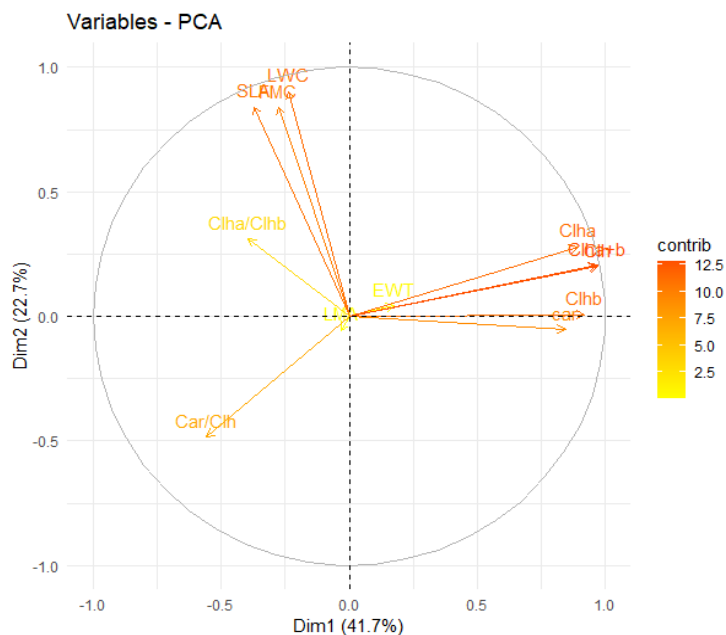
Figura 23 - Mapa Fatorial: os componentes são coloridos de acordo com o \cos^2 . As variáveis mais importantes para interpretação dos primeiros componentes encontram-se posicionadas mais próximas da borda do círculo. Já as variáveis situadas no centro do círculo possuem menor peso na composição dos primeiros componentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A contribuição das variáveis para os componentes é demonstrada na Figura 24, onde é possível verificar que a primeira componente é determinada pela contribuição dos pigmentos fotossintetizantes, em ordem decrescente de importância, respectivamente pelo conteúdo de clorofila total, clorofila a+b, clorofila b, clorofila a e carotenoide. O conteúdo relativo de água (LWC), a área foliar específica (SLA) e o teor de umidade combustível (FMC) são correlacionados positivamente e contribuem fortemente na segunda componente.

Figura 24 - Contribuição das variáveis nas duas primeiras componentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A síntese das variáveis para cada componente principal e sua respectiva contribuição para análise são apresentadas no Quadro 8.

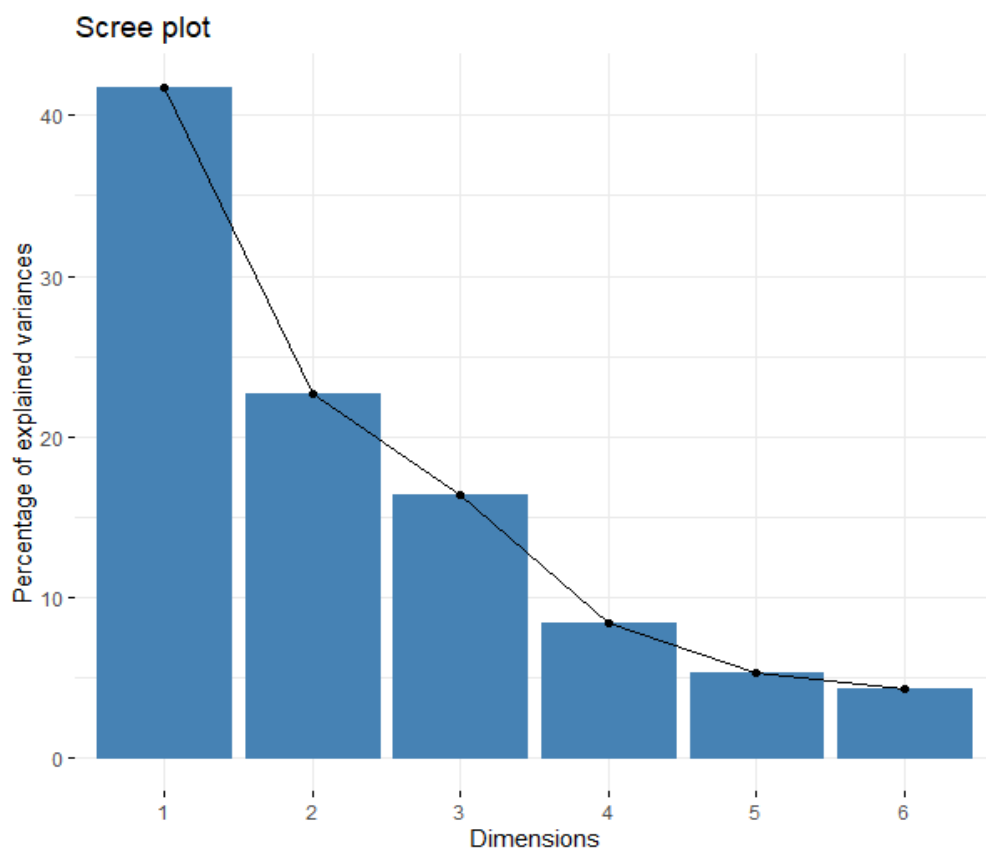
Quadro 8 - Síntese das variáveis e sua contribuição para a primeira componente principal (PC1) e segunda componente principal (PC2).

	PC1	PC2	coord	cos ²	contrib
FMC	-0,278	0,839	0,781	0,781	10,099
LWC	-0,240	0,903	0,872	0,872	11,285
EWT	0,177	0,044	0,033	0,033	0,430
LMA	-0,033	-0,055	0,004	0,004	0,053
SLA	-0,371	0,840	0,843	0,843	10,909
Clha	0,892	0,279	0,873	0,873	11,298
Clhb	0,919	0,007	0,845	0,845	10,931
Clh	0,972	0,199	0,985	0,985	12,738
car	0,844	-0,052	0,716	0,716	9,261
Clha/Clhb	-0,394	0,310	0,252	0,252	3,260
Car/Clh	-0,558	-0,484	0,545	0,545	7,054
Clha+b	0,969	0,206	0,980	0,980	12,682

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

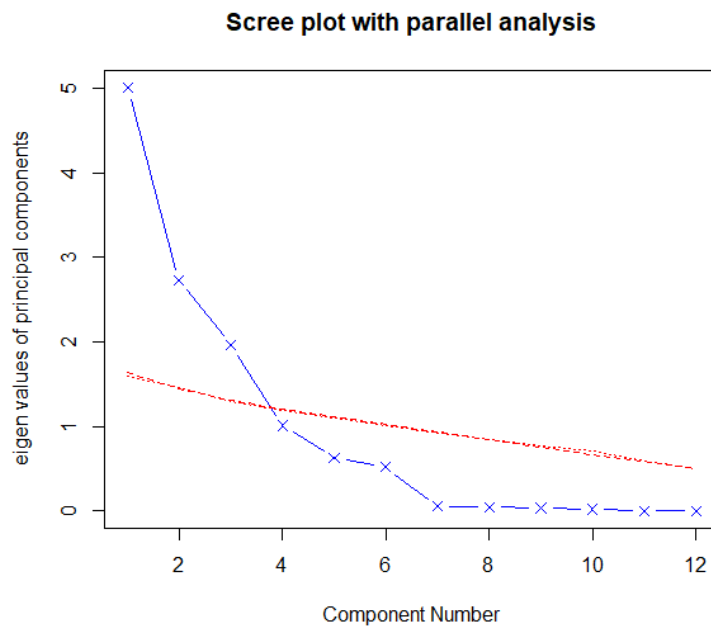
As duas primeiras componentes explicam 64,4 % da variância acumulada, se incluir as cinco primeiras componentes, mais de 94% da variância dos dados é explicada (Figura 25). As variáveis com maior contribuição nas cinco dimensões, em ordem decrescente por componente, são respectivamente: Clorofila total (0,97), clorofila a+b (0,96), clorofila b (0,91), clorofila a (0,89) e carotenoide (0,84) na primeira dimensão; teor relativo de água (0,9), área foliar específica (0,84) e conteúdo de umidade combustível (0,83) na segunda dimensão; espessura equivalente de água (0,85) na terceira dimensão; massa foliar por área (0,94) na quarta dimensão e a razão Car/Clh (0,47) na quinta dimensão. Contudo, segundo análise paralela proposta por Hayton et al. (2004), é recomendado o uso das três primeiras componentes principais (Figura 26).

Figura 25 - Contribuição das dimensões na explicação do percentual de variância acumulado.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 26 - Número de componentes principais recomendados (intersecção entre a linha vermelha e azul).

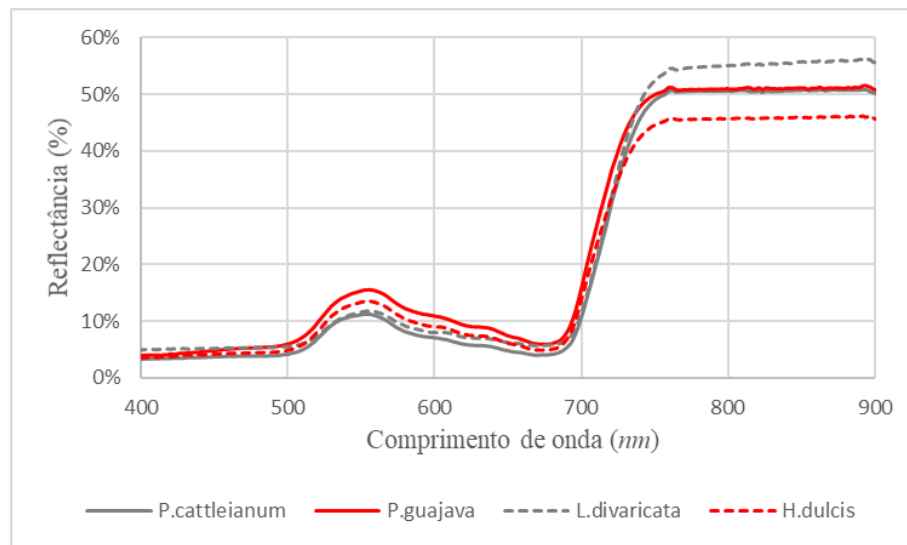


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.2 ESPECTRO DE REFLECTÂNCIA DAS FOLHAS

As propriedades espectrais das folhas estão relacionadas à sua composição e estrutura bioquímica e depende de muitos fatores, por exemplo: a espécie e a idade fenológica das folhas. O domínio espectral entre 400-2500 nm corresponde a 90% da luz solar; a região é dividida em três subdomínios, onde as folhas exibem propriedades ópticas notáveis: o visível (400-800 nm) caracterizado por forte absorção de luz pelos pigmentos fotossintéticos em uma folha verde; o infravermelho próximo (800-1100 nm), onde a absorção é limitada aos bioquímicos que compõem a matéria seca das folhas, à estrutura interna interfere diretamente na refletância e nos níveis de transmitância; no infravermelho de ondas curtas (1100-2500 nm) que também é uma zona de forte absorção, principalmente pela água nas folhas frescas (JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Para os autores, o comportamento espectral da vegetação é muito similar e, de modo geral, as curvas das folhas verdes têm formas semelhantes, estimuladas por mecanismos internos de absorção e espalhamento. As diferenças na feição espectral das espécies ocorrem principalmente em magnitude, assim como observado para as espécies aqui estudadas na Figura 27.

Figura 27 - Espectros de reflectância para as 04 espécies estudadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) localiza-se na região do visível, a qual possui uma forte absorção de luz pelos pigmentos fotossintéticos em uma folha verde (clorofilas, carotenóides e xantofilas). Os pigmentos não fotossintéticos (antocianinas) possuem dois picos principais de absorção no azul e no vermelho, e um pequeno em torno de 550 nm no verde. No azul, o espectro de reflectância exibe valores baixos, geralmente abaixo de 5% em torno de 400 nm. Há um aumento gradativo com um pico aproximado de 12 a 15% em 550 nm (verde), o qual é responsável pela cor verde das plantas percebidas pelo olho humano (JACQUEMOUD e USTIN, 2019).

Na faixa do azul (400 a 500nm), conforme demonstrado na Figura 28-a, todas as espécies exibem valores abaixo de 6%. Porém, ocorre uma diferença expressiva na magnitude entre as espécies caducifólias, o que confere um aumento no distanciamento entre elas, onde a nativa *L. divaricata* mantém uma reflectância constante em torno de 5% na faixa e a invasora *H. dulcis* com uma reflectância inicial de aproximadamente 3,5%, alcançando 5% em 500nm. A nativa *P. cattleianum* acompanha a feição da invasora *H. dulcis*, e apresentaram valores mais baixos (3,5 e 4%). As perenifólias, *P. cattleianum* e a invasora *P. guajava*, exibiram um maior distanciamento entre elas por volta de 490 a 500 nm.

Na faixa do verde (Figura 28-b), é observado aumento gradativo para todas as espécies, conforme descrito por Jacquemoud e Ustin (2019), com um pico em torno de 550 nm. Os valores mais altos são registrados para as invasoras *P. guajava* (15,5%) e *H. dulcis* (13,5%),

em contraponto as nativas apresentaram valores mais baixos entre 11,5 e 11% para *L. divaricata* e *P. cattleianum*, respectivamente. Nessa faixa espectral, é possível observar uma aproximação entre as espécies nativas (*P. cattleianum* e *L. divaricata*) e, conseqüentemente, um maior distanciamento quanto à magnitude, em comparação às espécies invasoras (*P. guajava* e *H. dulcis*). Notamos uma diferença marcante nessa região espectral, em especial próxima a 550nm, também apontado por Gitelson et al. (2001) em função do aumento do conteúdo de antocianina, mesmo para espectros de folhas com o mesmo teor de clorofila, durante estudo que levou a proposição do índice de reflectância de antocianina (ARI).

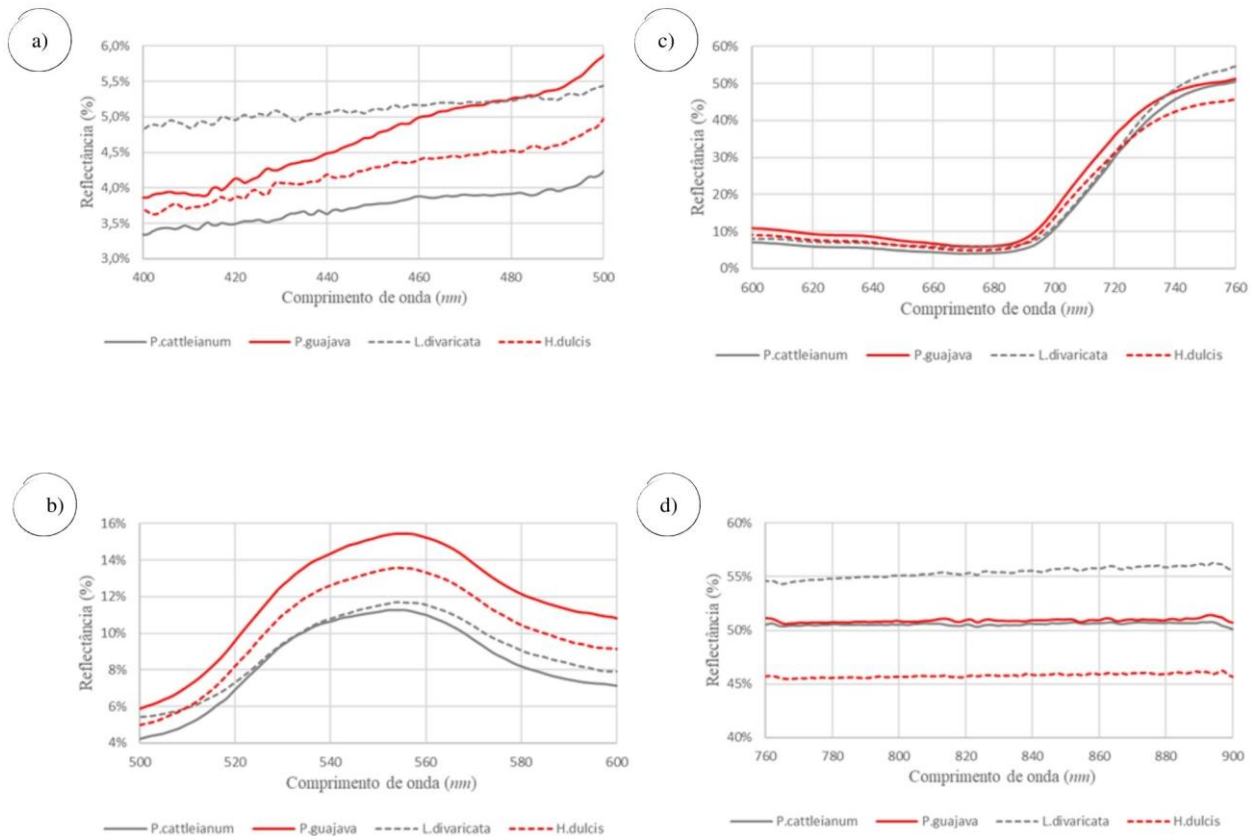
Segundo Jacquemoud e Ustin (2019), na faixa do vermelho há uma diminuição em torno de 5%, próximo a 675 nm (vermelho). Logo após, ocorreu um aumento abrupto entre o vermelho e o infravermelho (borda do vermelho) para atingir um platô assintótico entre 40 e 60% em 780nm (próximo ao infravermelho), que foi igualmente observado para as espécies aqui analisadas (Figura 28-c). Contudo, as espécies analisadas nesse estudo tiveram seu platô fixado em torno de 770 nm. Os valores mais altos são observados para nativa *L. divaricata* (55%), seguido pela invasora *P. guajava* (51%) e pela nativa *P. cattleianum* (50%). A invasora *H. dulcis* obteve o menor valor de reflectância (45%). Os autores destacam que o contorno bastante acentuado da curva de reflectância em 750 nm sinaliza o fim do comprimento de onda longo de absorção da luz visível pelas clorofilas.

As propriedades ópticas no infravermelho próximo são impulsionadas principalmente por reflexos e refrações múltiplas dentro da folha. Grant (1987) demonstrou que os componentes difusos da reflectância da folha originam-se principalmente do interior da folha (espalhamento múltiplo), e os componentes especulares da reflectância na superfície da folha. As células do mesófilo (forma, tamanho e arranjo) e os seus espaços vazios, desempenham um importante papel no espalhamento da radiação (JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Os autores relataram que a região do infravermelho próximo possui pouca ou nenhuma absorção interna, pois os pigmentos são completamente transparentes a partir de 800 nm, o que limita a região ao conteúdo bioquímico que compõem a massa seca das folhas. A região que engloba a borda do vermelho (Red-edge) e parte da faixa do NIR (780-900 nm), apresenta altos níveis de reflectância e transmitância, com valores inferiores a 1% de absorção, conforme observado por Merzlyak et al. (2002).

Nesse estudo, observamos que a região do NIR apresentou uma diferença significativa entre as espécies caducifólias, em torno de 10%, com valores de reflectância mais altos para nativa *L. divaricata* (55%) em comparação a invasora *H. dulcis* (45%). Contudo, em relação às espécies perenifólias (*P. cattleianum* e *P. guajava*), ocorreu uma aproximação entre as feições,

com uma diferença inferior a 1%, com uma reflectância em torno de 50% para ambas as espécies (Figura 28-d).

Figura 28 - Detalhe da feição espectral das espécies estudadas na faixa espectral: (a) azul, (b) verde, (c) vermelho e (d) NIR.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

As reflectâncias mais altas, assim como as maiores diferenças entre as espécies, são obtidas no platô de reflectância do infravermelho próximo (850nm), em contraposição à região da borda do vermelho, que não apresenta sensibilidade às mudanças (GAUSMAN et al., 1976, 1981 apud JACQUEMOUD e USTIN, 2019; WALTER e KOCH, 1981; HORLER et al. 1983; YAMAMOTO et al., 1995), seja em medições de folhas isoladas ou empilhadas. Para os autores, são observadas mudanças mais significativas em comprimentos de onda mais longos à medida em que as camadas de folhas aumentam, em função da forte absorção pela primeira folha em comprimentos de onda abaixo de 700 nm, e processos de espalhamento em

comprimentos de onda mais longos, ou seja, verifica-se maior penetração de luz em profundidades maiores nas folhas empilhadas.

4.2.1 Análise discriminante dos espectros de reflectância

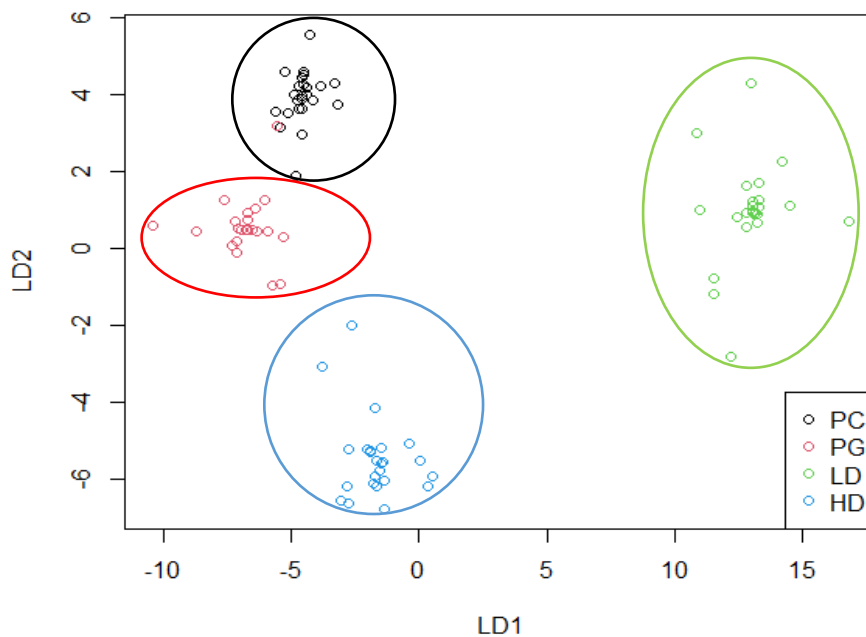
Uma variedade de algoritmos de classificação é utilizada em estudos com base em aquisição de dados hiperespectrais para classificar espécies de árvores em ambientes florestais, normalmente alcançando um bom grau de precisão (HYCZA et al., 2018). Nidamanuri (2020) empregou análise discriminante, utilizando vários classificadores, para uma variedade de plantas (arbustivas e arbóreas) de espécies populares de chás na Índia, com base em espectros de reflectância coletados a campo. Os melhores resultados foram obtidos pelo método SVM (77,3%), seguido pela LDA (72,88%). Quando espécies de chás foram comparadas às espécies nativas de ocorrência natural, a precisão geral foi substancialmente menor e não foi observada diferença estatística entre os diferentes métodos de classificação utilizados.

A LDA é uma ferramenta estatística que permite discriminar quantitativamente uma série de variáveis, que é alcançada a partir da maximização da variação relativa entre os grupos em relação à variação dentro do grupo. Foi abordada por Shang e Chisholm (2014), que empregaram o método para classificar espécies florestais nativas de eucalipto na Austrália. Os resultados obtidos foram de 69,4% e 65,4% para nível de folha e dossel, respectivamente. Os autores encontraram os melhores resultados para algoritmos *Machine Learning* (RF e SVM), alcançando precisão de 94,7% em nível foliar e 84,5% em nível de dossel quando comparados a LDA. Também, foi empregada por Harisson et al. (2018) para identificar tipos espectrais de 26 espécies arbóreas em um ecossistema dominados por árvores decíduas, com base em espectros em nível foliar na região do infravermelho de onda longa (LWIR). Os autores obtiveram bons resultados no estudo e esperam que tipos espectrais derivados de folhas suportem a classificação espectral derivada de imagem, alcançando vantagens na análise de dados hiperespectrais aerotransportados.

No presente estudo, o modelo foi aplicado para discriminar as espécies invasoras e nativas, considerando que as espécies invasoras alvo do estudo são semelhantes às espécies nativas em relação aos seus aspectos taxonômicos e, portanto, apresentam características biofísicas semelhantes. O modelo discriminante apresentou um bom resultado para separar as espécies invasoras e nativas, alcançando 97% de acerto pelo método de validação 70/30. Apenas a primeira dimensão (LD1) foi necessária para separar a espécie nativa *L. divaricata* (10 a 15) e a segunda dimensão (LD2) foi satisfatória para discriminar a invasora *H. dulcis*

localizada na faixa de -2 a -6. Já para a discriminação da invasora *P. guajava* e da nativa *P. cattleianum*, é indispensável a combinação das duas dimensões (LD1 e LD2). A invasora situa-se entre os limiares de -10 a -5 na LD1 e entre -2 e 2 na LD2, já a nativa ocorre na LD1 entre -5 e 0 e acima de 2 na LD2. (Figura 29).

Figura 29 - Análise Discriminante Linear (LDA) processada usando o recurso *plsda.fit* do Pacote *PLSDA*, *RStudio* (2020), como resposta para a discriminação das espécies. Gráfico de pontos das espécies distribuídas nos eixos LD1 e LD2.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A capacidade de generalização do modelo foi avaliada pelo método de validação cruzada *Leave-one-out* (LOO); o modelo acertou 95% das espécies para o conjunto total de amostras (Quadro 9).

Quadro 9 - Matriz de confusão para avaliação da capacidade de generalização do modelo em relação a precisão da classificação das espécies invasoras e nativas.

	<i>P. cattleianum</i>	<i>P. guajava</i>	<i>H. dulcis</i>	<i>L.divaricata</i>	N total
<i>P. cattleianum</i>	21	1	2		24
<i>P. guajava</i>	2	22			24
<i>H. dulcis</i>			24		24
<i>L.divaricata</i>	2	1		21	24

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Para seleção das variáveis mais informativas foi usado o método *Stepwise*, o qual obteve 32 comprimentos de onda, referente a 1/3 do N amostral, como mais informativos para discriminação das espécies (Tabela 2). As variáveis mais informativas concentram-se na faixa do visível e incluem comprimentos de onda próximos a feições de absorção de pigmentos, grifados no Tabela 2 (CURRAN et al., 2001; NOOMEN et al., 2006; SOLOVCHENKO, 2010).

Tabela 2 - Comprimentos de onda (nm) mais informativos para discriminação de espécies invasoras e nativas obtidos pelo método *Stepwise*; Região do VIS: B (azul); G (verde) e R (vermelho).

Faixas Espectrais		
B (nm)	G (nm)	R (nm)
403-407	503-504	614
467	516	668
484	532-534	694-696
497	545-548	705
	553	711
	561-564	
	579-580	
	585	
	589-592	

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A região do visível e do infravermelho próximo são regiões do espectro eletromagnético comumente utilizadas no sensoriamento remoto da vegetação, e fornecem informações distintas com base na interação da luz e dos componentes foliares. Contudo, Harisson et al. (2018) apontam limitações dessas regiões espectrais em relação à discriminação de espécies. A região

do visível, que interage diretamente com os pigmentos fotossintéticos, reflete essa interação, porém, muitas vezes, não representa uma unidade taxonômica. Para os autores o NIR é limitado a um sítio específico e a uma estação (sensível a mudanças fenológicas), além de apresentar saturação para muitas espécies. Contudo, demonstramos nesse estudo que a região do visível possui alta capacidade para discriminação de espécies e o comportamento dos pigmentos é taxonomicamente distinto, sobretudo quando comparamos espécies invasoras e nativas num mesmo sítio. Corroboramos com os autores quanto à limitação do NIR, que nesse estudo foi mais sensível às diferenças quanto ao comportamento fenológico das espécies analisadas (perenes e decíduas) e não demonstrou potencial para discriminar as espécies invasoras e nativas. Ademais, quando analisamos conjuntamente a feição espectral das espécies, conforme demonstrado na Figura 28, e combinamos com os espectros mais informativos acima citados, podemos aferir que a região espectral do verde em torno de 550 nm é altamente promissora para discriminar espécies invasoras de nativas.

4.3 RELAÇÃO DOS ATRIBUTOS FUNCIONAIS FOLIARES E SEUS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA

4.3.1 Matéria Seca

Propriedades ou atributos relacionados a estrutura da folha são relativamente fáceis de medir, como a massa foliar por área (LMA) e a área foliar específica (SLA), as quais consistem em características-chaves e representam o custo energético para construção da folha e a sua área de interceptação de luz (POORTER et al., 2009; JACQUEMOUD e USTIN, 2019). Dados de reflectância das folhas provaram ser bem-sucedidos para estimativas de LMA e SLA (STREHER et al., 2020). Contudo, há pouca concordância entre as bases físicas e empíricas dos métodos e sobre quais os melhores comprimentos de onda espectrais para sua estimativa (FERRET et al., 2018).

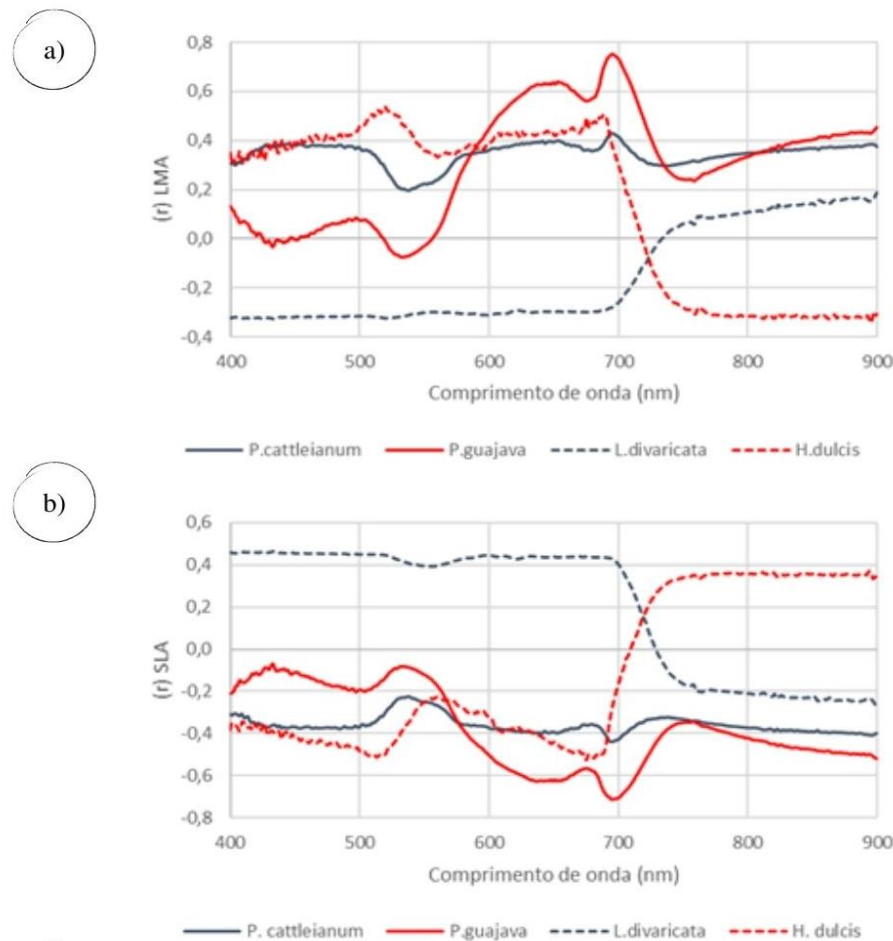
A massa foliar por área (LMA) é uma característica morfológica utilizada como um indicador do funcionamento da planta, mas também pode ser relacionada com a idade das folhas (WU et al., 2017). A LMA é comparável ao teor de matéria seca da folha e é composta por vários constituintes orgânicos, o que torna a quantificação da LMA a partir de medidas de folhas frescas um desafio devido à influência do conteúdo de água. Informações quantitativas sobre a LMA sugerem uma melhor compreensão da taxonomia de grupos funcionais, regulação de

mecanismos fisiológicos e funcionamento ecossistêmico (CHENG et al., 2014; ASNER et al., 2011 a b; POORTER et al., 2009).

A área foliar específica (SLA) consiste em uma característica funcional fundamental da folha que expressa diferenças significativas no comportamento ecológico entre espécies de plantas. A SLA possui uma alta variabilidade entre folhas na mesma planta, e entre espécies diferentes, e pode ser controlada por diferentes fatores ambientais, como disponibilidade de nutrientes, umidade e regimes de luz (JAQUEMOND e USTIN, 2019). A SLA é considerada um dos principais atributos funcionais que impulsionam a diferenciação das plantas, principalmente quando somada ao conteúdo de água, pois está diretamente relacionada à eficiência do uso de água na folha e, portanto, consiste em um potencial variável para a caracterização espectral da vegetação (WRIGHT et al., 2004, 2007; HOFFMANN et al., 2005; BUCCI et al., 2006; BALL et al., 2015).

Analisamos os espectros de reflectância brutos (sem tratamento prévio) para todas as espécies analisadas (n=96) e sua correlação com os valores obtidos por método destrutivo para LMA e para SLA. Para ambas as variáveis, observa-se um comportamento distinto entre as espécies. Em relação a LMA, a espécie invasora *P. guajava* foi a única a apresentar um pico expressivo na faixa de 691 nm a 700 nm ($r=0,75$); as demais espécies apresentaram baixos valores de correlação ($r < 0,42$) (Figura 30-a). Observa-se uma inversão do comportamento das espécies para SLA quando comparado com a LMA, conforme esperado. A invasora *P. guajava* apresenta um pico de correlação negativa entre 692nm e 701nm ($r=-0,71$) (Figura 30-b).

Figura 30 - Correlograma das espécies (nativas e invasoras) em relação ao seu espectro de reflectância para (a) LMA e (b) SLA.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.3.2 Conteúdo de Água

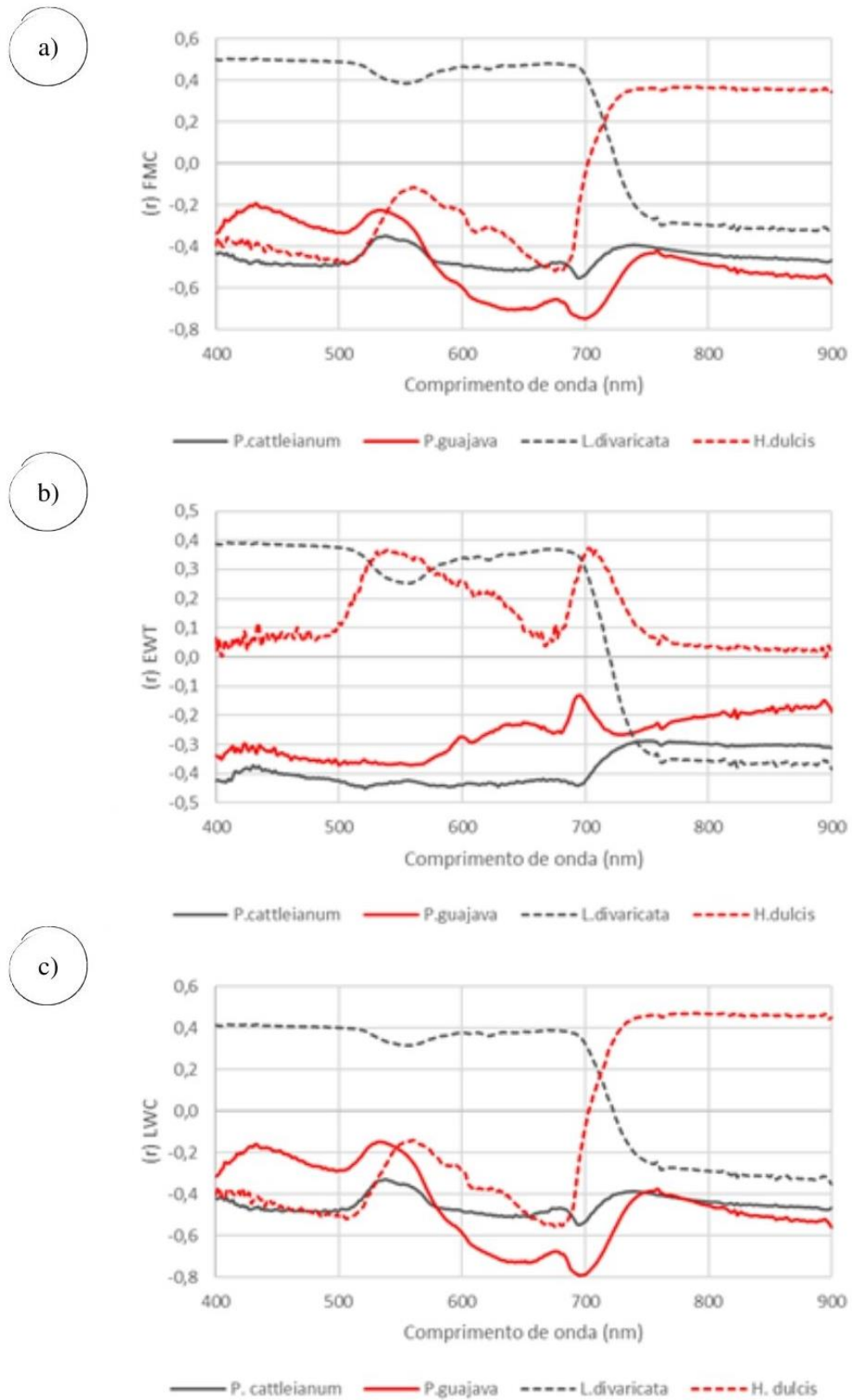
A água representa de 50% a 90% da massa de uma folha fresca, fica localizada principalmente no vacúolo e citoplasma da célula. Parte do conteúdo também está contida nos cloroplastos (Carter, 1991). A disponibilidade de água controla muitas funções da planta, onde no nível foliar, a murcha é causada pela perda do conteúdo de água e altera as propriedades ópticas relacionadas à absorção de água e a refração do espalhamento interno da luz nas folhas. Existem várias maneiras de medir o teor de água nas folhas e variáveis fisiológicas que caracterizam o status da água nas folhas. As propriedades ópticas da água são bem conhecidas. Sua absorção ocorre devido à vibração de moléculas. Como os átomos de hidrogênio são pequenos, as vibrações têm grande amplitude. O vapor de água tem três modos vibracionais

fundamentais: o primeiro modo possui um pico de absorção em 3050nm; o segundo modo vibracional causa uma forte absorção a 6080 nm; e o terceiro modo desloca a absorção para 2870 nm. Modos vibracionais para água líquida ocorrem em comprimentos de onda mais curtos (401–1900nm) e são modos de combinação (USTIN e JACQUEMOUD, 2020).

O teor de umidade do combustível (FMC), o teor de água da folha (LWC) e a espessura de água equivalente (EWT) estão entre os principais parâmetros que descrevem o estado da água das plantas (JACQUEMOUD e USTIN, 2019). A medida do teor de umidade do combustível (FMC) é expressa em porcentagem do peso seco das folhas, frequentemente usada para prever o risco de incêndio em ecossistemas naturais (WANG et al., 2017). A espessura equivalente da água (EWT) é a massa de água por unidade de área foliar. Uma vez que o conteúdo de água por área foliar está diretamente relacionado à absorção de luz na folha, o EWT é uma das formas mais comuns utilizadas na espectroscopia para descrever o conteúdo de água (HILL et al., 2019). Já o teor de água nas folhas (LWC) é expresso como uma porcentagem do peso fresco das folhas e foi utilizado com sucesso por Cheng et al. (2011) e Jay et al. (2016).

O EWT e o FMC são duas maneiras diferentes de definir o teor de água nas folhas, mas não estão diretamente relacionados. Contudo, em análise aos espectros de reflectância brutos das espécies alvo do estudo e sua correlação com os valores obtidos para EWT, também obtivemos, de modo geral, baixos valores de correlação, com valores positivos para as espécies caducifólias e negativos para as espécies perenifólias (Figura 31 a, b). Em estudo realizado por Danson e Bowyer (2004), comparando resultados para FMC, LMA e EWT de folhas de diferentes espécies, os resultados demonstraram que o FMC e o EWT estão perfeitamente correlacionados quando o LMA é constante, o que não é observado nesse estudo, visto que os valores de LMA para as espécies estudadas não apresentaram valores constantes. No entanto, observamos uma similaridade entre o comportamento do FMC e do LWC para todas as espécies (Figura 31 a c).

Figura 31 - Correlograma das espécies (nativas e invasoras) em relação ao seu espectro de reflectância para (a) FMC; (b) EWT e (c) LWC.



4.3.3 Pigmentos fotossinteticamente ativos

A absorção da luz por pigmentos fotossintéticos domina as propriedades ópticas das folhas verdes no espectro visível (400-700nm). Segundo Jacquemoud e Ustin (2019), a clorofila-a possui seu principal pico de absorção em 658nm (S1¹⁸) e um pico vibracional secundário em 612 nm. Apresenta mais dois picos em 572 nm e 426 nm, correspondentes a S2¹⁹ e a banda de Soret²⁰. Ainda, a clorofila-a é a única molécula nas folhas das plantas que emite luz na região vermelha (670nm e 725 nm).

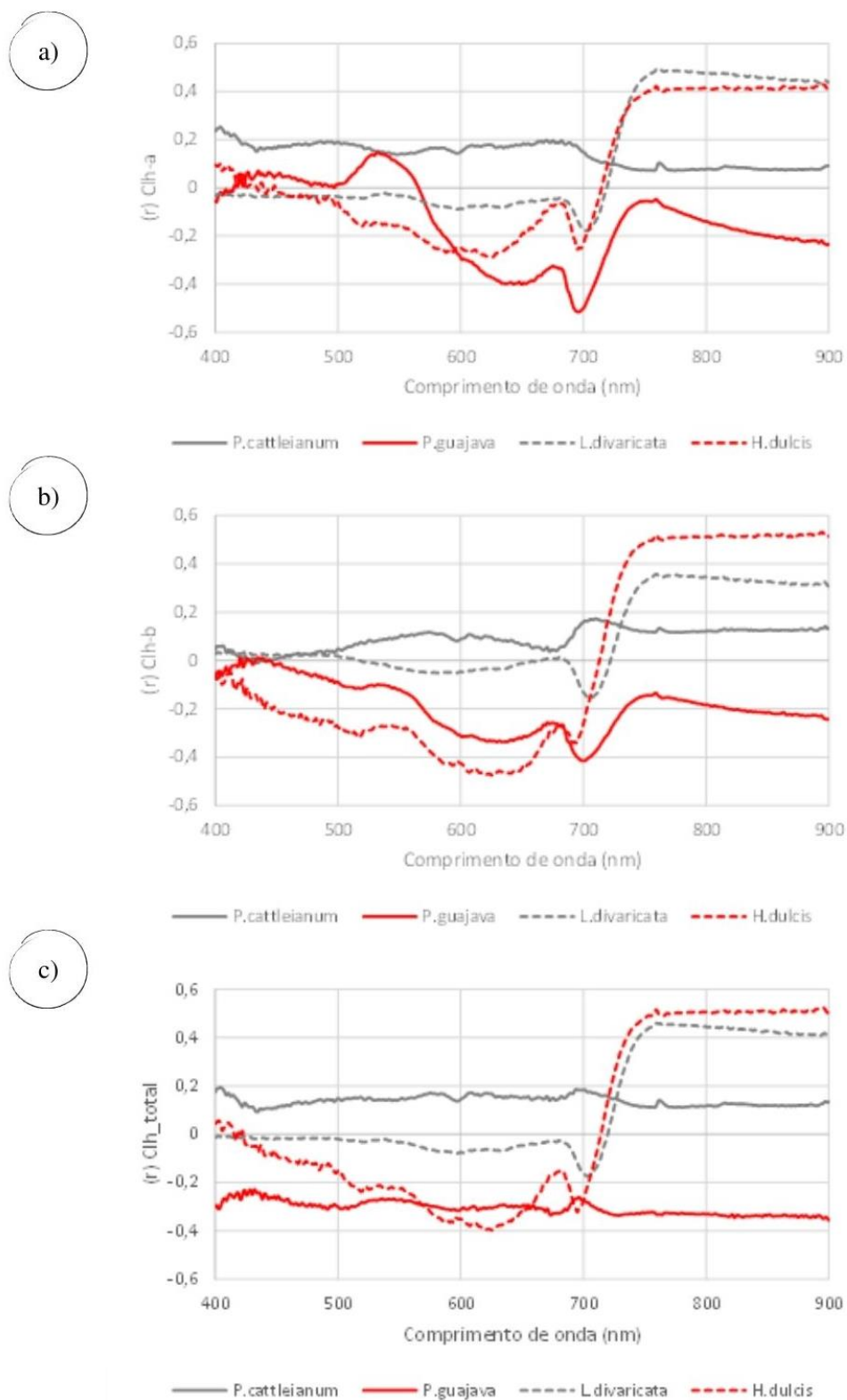
O conteúdo de pigmentos (clorofila e carotenóides) foi relacionado à reflectância em três comprimentos de onda principais (450 nm, 550 nm e 670 nm) por Thomas e Gausman (1977). Os autores evidenciaram que as medidas de reflectância no visível possuem forte variação nos dados, já a reflectância no NIR é insensível aos pigmentos e responde aos aspectos estruturais das folhas. Nesse sentido, Jacquemoud e Ustin (2019) destacam que a variação natural da anatomia das folhas torna impeditiva a utilização apenas do espectro do visível para comparar o conteúdo de pigmentos. Ainda, combinações de bandas estreitas, normalmente são modelos específicos para um determinado conjunto de dados, ou espécie, e não podem ser generalizados, pois estão diretamente relacionados à distribuição do pigmento na folha, estágio fenológico e estrutura foliar característicos. Na Figura 32, são demonstrados os correlogramas para as espécies em função da Clh-a, Clh-b e Clh-total. De modo geral, as correlações são baixas para todas as espécies ($r < 0,6$), com valores positivos para as espécies caducifólias na região da borda do vermelho e do NIR e um pico negativo para invasora *P. guajava* em torno de 700 nm ($r = -0,58$) para Clh-a.

¹⁸ S1- primeiro nível de excitação ou de transição eletrônica.

¹⁹ S2- segunda transição eletrônica.

²⁰ Banda de Soret - banda composta formada por S3 e S4.

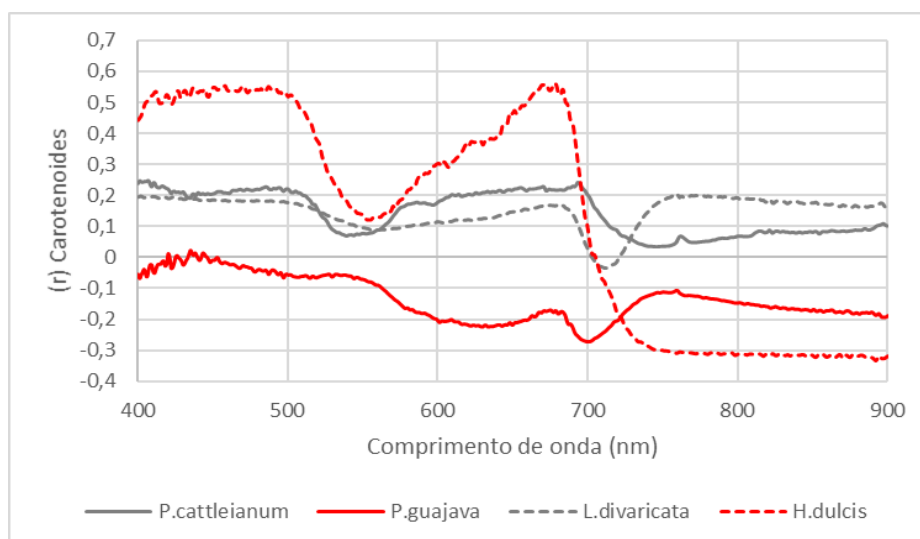
Figura 32- Correlograma das espécies (nativas e invasoras) em relação ao seu espectro de reflectância para (a) Clh-a; (b) Clh-b e (c) Clh-total.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os carotenóides, compreendem uma grande família de pigmentos acessórios repelentes de água, e sua absorção de luz ocorre principalmente nos comprimentos de onda verde azulado. Na maioria das espécies de plantas são representadas por carotenos e xantofilas com picos máximos de absorção na faixa azul do espectro, entre 400 e 480 nm. (SOLOVCHENKO, 2010; JAQUEMOND E USTIN, 2019). Eles participam diretamente da coleta de luz, além de estabilizar os complexos pigmento-proteína do aparelho fotossintético e cumprir função fotoprotetora²¹. Também, aumentam o espectro sobre o qual a luz pode ser absorvida para a fotossíntese e desempenham outras funções, como atração de polinizadores e dispersores de sementes (SOLOVCHENKO, 2010; JAQUEMOND e USTIN, 2019). Para Solovchenko (2010), o acúmulo desses pigmentos direciona e manifesta mudanças nas propriedades ópticas das plantas e, portanto, a compreensão das relações entre a magnitude e qualidade espectral dessas mudanças, assim como a extensão e o acúmulo dos pigmentos podem fornecer informações valiosas sobre o status de fotoproteção relacionado às plantas. As espécies estudadas apresentaram comportamento distinto e, no geral, baixa correlação para o conteúdo de carotenóides ($r < 0,6$), destaca-se um pico positivo para a espécie invasora *H. dulcis* em torno de 675 nm (Figura 33).

Figura 33 - Correlograma para as espécies (nativas e invasoras) do conteúdo de Carotenóides em relação ao seu espectro de reflectância.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

²¹ A fotoproteção é uma defesa contra a radiação solar potencialmente prejudicial e é eficaz para fotoaclimação de plantas a longo prazo (SOLOVCHENKO, 2010).

4.4 TIPOS ÓPTICOS OU ESPÉCIES ESPECTRAIS

Empregamos a técnica baseada no Ambiente de Correlação Interativa (ICA) conforme descrito por Ogashawara et al. (2014), para obter o índice com base na Razão Simples ou *Simple Ratio* mais significativo em função do (s) atributo (s) mais informativo. Primeiramente, utilizamos o ICA para todo o conjunto de espécies agrupadas, totalizando 96 amostras, para cada atributo em função dos espectros de reflectância (400-900 nm). Os resultados obtidos não foram significativos ($r < 0,36$), conforme exemplificado na Figura 34, o que sugere que cada espécie possui um comportamento distinto e, portanto, suas características intraespecíficas possuem grande influência na predição dos atributos analisados, o que torna necessário a parametrização por espécie.

Figura 34 - Ambiente de interação Correlativa (ICA) aplicado para todas as espécies agrupadas para razão Clha/Clhb, atributo que obteve o melhor resultado $r = 0,36$ para Razão 574/528 do espectro de reflectância.

	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580
520	-0,10263	-0,0971	-0,09142	-0,08849	-0,08358	-0,07621	-0,0678	-0,0564	-0,04254	-0,02265	0,003652	0,025744	0,048125	0,074687	0,105763	0,132721	0,140229	0,154873	0,18212	0,192394	0,202184
521	-0,08747	-0,08105	-0,07438	-0,07058	-0,06456	-0,05586	-0,04603	-0,03275	-0,0166	0,00634	0,036569	0,062225	0,08761	0,117197	0,150102	0,176863	0,184632	0,19971	0,226419	0,236542	0,245424
522	-0,07631	-0,06862	-0,06051	-0,0556	-0,0482	-0,03771	-0,02563	-0,00958	0,00972	0,037323	0,073429	0,104245	0,133871	0,166933	0,201651	0,227923	0,235457	0,250241	0,274963	0,279457	0,283087
523	-0,06503	-0,05559	-0,04548	-0,03917	-0,02996	-0,01703	-0,00195	0,017793	0,041458	0,075084	0,117982	0,155003	0,188655	0,222718	0,256282	0,279678	0,285403	0,297397	0,315359	0,312291	0,309129
524	-0,04483	-0,03321	-0,02064	-0,01257	-0,00111	0,014697	0,032972	0,056527	0,084607	0,123997	0,171105	0,212063	0,246458	0,277518	0,305544	0,323109	0,326003	0,333676	0,345001	0,337379	0,330908
525	-0,0341	-0,02044	-0,00565	0,004009	0,017529	0,035908	0,056903	0,083402	0,114396	0,155926	0,204577	0,244703	0,275313	0,300812	0,32243	0,334492	0,334045	0,337124	0,3431	0,333318	0,324925
526	-0,02314	-0,00701	0,010402	0,02206	0,038039	0,059244	0,083037	0,11206	0,144832	0,186894	0,232717	0,267328	0,291041	0,30985	0,325148	0,332671	0,329453	0,329046	0,331321	0,320566	0,311153
527	0,027424	0,047849	0,069866	0,085655	0,10559	0,13011	0,15687	0,187311	0,219274	0,257313	0,294498	0,31987	0,333666	0,343025	0,350663	0,353657	0,349157	0,346687	0,346104	0,334714	0,325321
528	0,086626	0,111539	0,1379	0,156409	0,177674	0,201967	0,227622	0,254695	0,281416	0,310027	0,334915	0,350942	0,35667	0,358802	0,362032	0,363096	0,358204	0,354508	0,352303	0,341373	0,332702
529	0,134485	0,162272	0,190478	0,209377	0,229726	0,251424	0,271838	0,292585	0,314034	0,333306	0,347791	0,357815	0,358911	0,357326	0,359	0,359615	0,354268	0,349588	0,346439	0,336287	0,328015
530	0,159048	0,189031	0,217936	0,236972	0,255577	0,274049	0,292798	0,310212	0,325971	0,341003	0,352234	0,358647	0,357595	0,354993	0,355602	0,355441	0,349581	0,344793	0,341798	0,331559	0,323412
531	0,173194	0,205105	0,234197	0,252873	0,269066	0,284278	0,303239	0,318774	0,329165	0,342118	0,352503	0,356132	0,35382	0,351089	0,351024	0,350378	0,344155	0,339466	0,336843	0,326336	0,318308
532	0,218805	0,24968	0,275668	0,288195	0,298583	0,30878	0,320195	0,329555	0,337194	0,3447	0,34935	0,34998	0,345804	0,341725	0,342136	0,342312	0,335986	0,330778	0,327733	0,317947	0,310209
533	0,24308	0,271261	0,299422	0,302899	0,311013	0,318888	0,325872	0,331754	0,337905	0,342874	0,345179	0,344782	0,340322	0,336159	0,336571	0,336827	0,330442	0,325028	0,321824	0,312298	0,304649
534	0,249984	0,277825	0,298014	0,310862	0,320474	0,327323	0,333637	0,337547	0,340863	0,344747	0,346905	0,346285	0,342291	0,338667	0,338025	0,337278	0,33073	0,3253	0,322084	0,312178	0,304347
535	0,284213	0,308219	0,323979	0,334179	0,340062	0,342803	0,34616	0,347507	0,348538	0,350091	0,350562	0,349384	0,344985	0,340756	0,339617	0,338642	0,332103	0,326689	0,323495	0,313174	0,306099
536	0,31491	0,333011	0,343168	0,348235	0,349848	0,349468	0,349872	0,349657	0,350247	0,350123	0,349044	0,347516	0,342742	0,33797	0,337004	0,336382	0,329948	0,324511	0,321314	0,311907	0,304516
537	0,317114	0,32836	0,332481	0,334425	0,335443	0,335614	0,334936	0,334947	0,337054	0,337431	0,336596	0,335469	0,331366	0,327336	0,327179	0,327174	0,320907	0,315509	0,312383	0,303324	0,296037
538	0,310545	0,322371	0,325027	0,324993	0,324274	0,323641	0,323473	0,324265	0,326902	0,328383	0,32848	0,327213	0,32343	0,320087	0,320178	0,320257	0,313985	0,308916	0,306268	0,297173	0,289972
539	0,294716	0,313872	0,319457	0,318372	0,315291	0,313322	0,314736	0,316857	0,319605	0,322473	0,323841	0,322269	0,318552	0,315636	0,315635	0,315586	0,309203	0,304556	0,302578	0,293199	0,28609
540	0,294237	0,312787	0,317071	0,314549	0,310685	0,308388	0,309567	0,311797	0,315123	0,31757	0,318535	0,317568	0,313801	0,310409	0,31094	0,311468	0,304942	0,300085	0,298029	0,288677	0,281524

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os tipos ópticos representam uma tentativa de definir as propriedades ópticas funcionalmente significativas que estão diretamente relacionadas às características da planta,

seja em nível de espécie ou de determinado grupo funcional, representando um padrão espectral (USTIN e GAMON, 2010; FERET e ASNER, 2014; GAMON et al., 2019). Aplicamos o ICA individualmente por espécie e correlacionamos aos 12 atributos relacionados ao seu conteúdo bioquímico (pigmentos fotossintetizantes - Clorofila a, b e carotenóides) e à estrutura e fisiologia foliar com base na massa seca (SLA e LMA) e conteúdo de água (FMC, LWC e EWT). Deste modo, na sequência, apresentamos as propriedades ópticas funcionalmente significativas para as espécies invasoras (*P. guajava*; e *H. dulcis*), obtidas pela Razão Simples.

4.4.1 *Psidium guajava*

As propriedades ópticas funcionalmente mais expressivas para a espécie foram encontradas, em ordem decrescente de significância, SLA ($R^2=0,95$), razão Car/Clh ($R^2=0,93$), e LWC ($R^2=0,83$), conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 - Propriedades ópticas funcionalmente significativas para espécie *P. guajava*. LWC (%), SLA ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) e razão Car/Clh; Número de amostras por variável (N); R múltiplo (R); Coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão linear; Raiz do erro quadrado médio (RMSE) correspondente; Coeficiente de variação ($\text{CV} = \text{RMSE}/\text{valor médio das amostras}$); Soma do quadrado dos resíduos (SQR); Nível de conf. De 99%; nível de significância de 99% ($p\text{-value} < 0,001$).

	N	Média	R	R^2	RMSE	CV%	SQR
LWC	22	64,125	0,91	0,83	1,76	0,027	62,55
SLA	18	85,89	0,97	0,95	3,20	0,037	172,2
Car/Clh	23	0,184	0,96	0,93	0,01	0,054	0,002

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A razão da reflectância numa faixa estreita do NIR, entre 817nm e 802nm (R817/R802), expressa forte correlação ($r=0,91$) para o teor de água nas folhas (LWC). A região do infravermelho próximo foi apontada por Peñuelas et al. (1993) e Hunt et al. (1987) como um indicador importante do estado da água da planta, por estar intimamente correlacionada ao LWC, sobretudo quando este era inferior a 80% e o estresse hídrico estava bem desenvolvido, assim como demonstrado para a espécie *P. guajava* (Figura 35-a). Altas correlações na região do NIR também foram observadas por Kumar L. (2007) para determinar as melhores bandas para prever o teor de água das folhas em espécies de *Eucalyptus sp.* No entanto, os autores

sugerem que os resultados obtidos estão relacionados às mudanças na estrutura foliar, que promovem diferenças na refletância das folhas e, portanto, não estão exclusivamente relacionadas ao conteúdo de água. Ainda que, para Hill et al. (2019) o conteúdo de água (nas fases: líquida, sólida e gasosa), em nível de dossel, pode ser derivado a partir de dados de espectroscopia de imagem durante o processo de correção atmosférica, em especial nas bandas de absorção em 980nm e 1160nm, quando estes traços ainda estão presentes no espectro (por exemplo: Green et al. 2006; Asner et al., 2016; Paz-Kagan et al., 2018; Thompson et al. 2019).

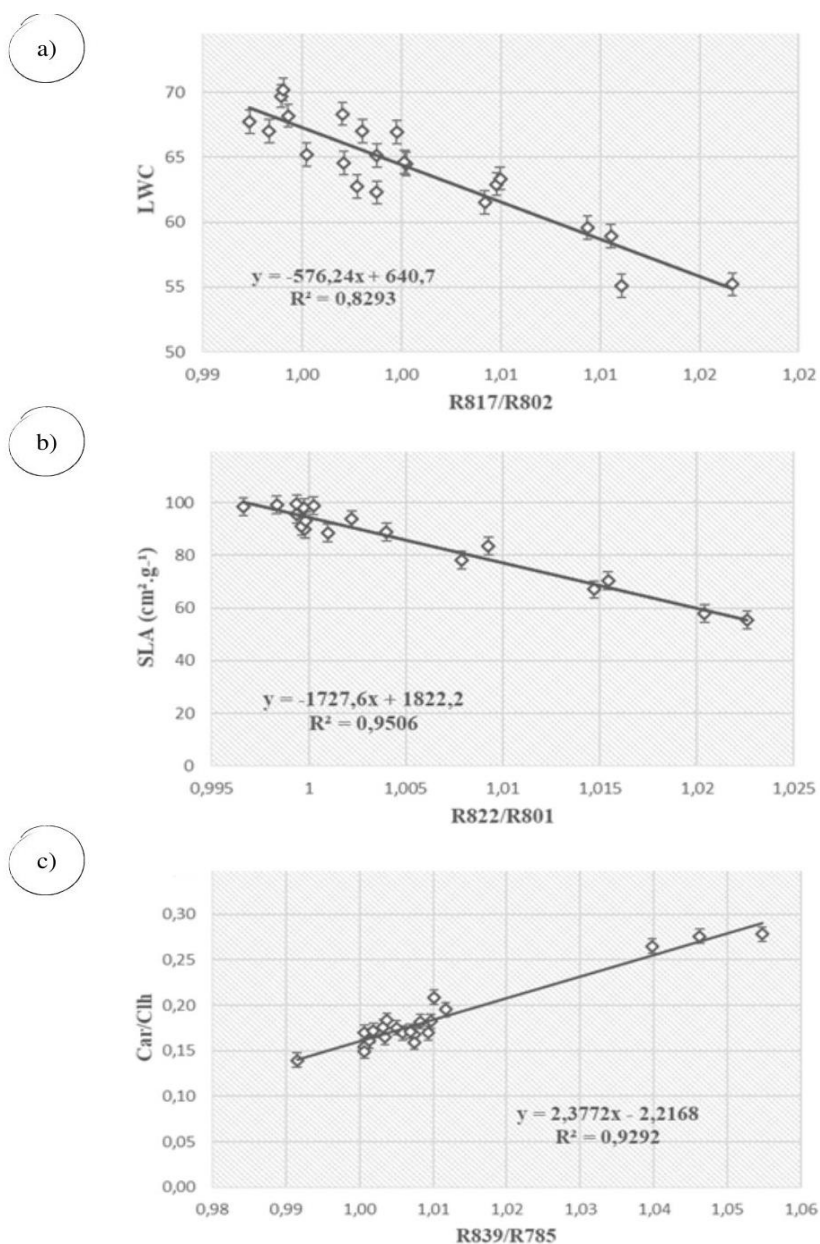
Em relação à matéria seca, existem poucas publicações de índices ou modelos utilizados para sua predição, visto que existem problemas quanto a sua sensibilidade devido à presença de água líquida em folhas verdes (JACQUEMOND e USTIN, 2019). A SLA corresponde ao inverso da LMA, e demonstrou valores mais altos para as espécies invasoras quando comparadas às espécies nativas, considerando os grupos perenifólias e caducifólias.

Para muitos autores (POORTER et al., 2009; ASNER et al., 2011b; CHENG et al., 2014), a matéria seca é composta por vários constituintes orgânicos que absorvem a radiação solar em comprimentos de onda na região do infravermelho próximo, mas sobretudo não há concordância sobre métodos e comprimentos de onda mais informativos para modelos de predição (FERRET et al., 2018). Contudo, vários estudos propuseram modelos com base em comprimentos de onda localizados na região do NIR e SWIR (por exemplo: LE MAIRE et al., 2008; WANG et al., 2011 a b; CHENG et al., 2014). Nesse estudo, a razão na faixa estreita do NIR (R822/R801) obtida para espécie *P. guajava* alcançou boa precisão ($R^2=0,95$) para área foliar específica (SLA), conforme observado na Figura 35-b.

A razão Car/Clh é um importante indicador do estado fisiológico do estado de desenvolvimento e aclimatação das espécies aos mais diversos estímulos e estresses ambientais, pois podemos aferir sobre a sua eficiência fotossintética e o envolvimento de mecanismos de fotoproteção (SOLOVCHENKO, 2010; GITELSON, 2020). Recentemente, Zhou et al. (2019) propuseram um índice sensível em relação a Car/Clh , em que combinam índices proposto por Zhou et al. (2017) e Gitelson et al. (2003), respectivamente denominados CARI e o Clred-edge. Por último, Gitelson (2020) propôs dois modelos: em um, utiliza a razão dos coeficientes de absorção em 500 e 700 nm e, em outro, a diferença entre os coeficientes de absorção em 500 e 660nm. Ambos obtiveram bons resultados e descreveram com precisão as mudanças para Car/Clh na faixa de 0,15 a 0,6, sem necessidade de parametrização por espécie, alcançando um R^2 de 0,87 para o primeiro modelo e 0,82 para o segundo, respectivamente. Nesse estudo, para a espécie *P. guajava*, obtivemos uma alta correlação ($r=0,96$) para razão entre a refletância na faixa do NIR em 839 nm e a borda do vermelho em 785 nm. Obtivemos uma boa precisão para

o modelo linear proposto ($R^2=0,93$) e um erro quadrático médio de 1% (Figura 35-c). O comportamento espectral da espécie, sugere um aumento da reflectância na faixa do NIR paralelo ao aumento da presença de carotenóides nas folhas, o que sugere a ativação de mecanismos de fotoproteção, os quais seriam utilizados como possível estratégia de aclimatação e de inibição ao fotodano.

Figura 35 - Modelo de Regressão Linear Simples (MRLS) para as propriedades ópticas funcionalmente mais significativas para espécie invasora *P. guajava*: (a) LWC (%) em função da razão 817/802; (b) SLA ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) em função da razão 822/801 e (c) Razão Car/Clh em função da razão 839/785; (Nível de conf. De 99%; Nível de significância de 99% ($p\text{-value}<0,001$)).



4.4.2 *Hovenia dulcis*

As propriedades ópticas funcionalmente mais significativas para espécie são respectivamente: LWC ($R^2= 0,85$), SLA ($R^2=0,77$) e Clha/Clhb ($R^2=0,47$) demonstradas no Quadro 11.

Quadro 11 - Propriedades ópticas funcionalmente significativas para espécie *H. dulcis*. LWC (%), SLA ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) e Clha/Clhb; Número de amostras por variável (N); R múltiplo (R); Coeficiente de determinação (R^2) do modelo de regressão linear; Raiz do erro quadrado médio (RMSE) correspondente; Coeficiente de variação ($\text{CV} = \text{RMSE}/\text{valor médio das amostras}$); Soma do quadrado dos resíduos (SQR); Nível de conf. De 99%; Nível de significância de 99% ($p\text{-value} < 0,001$).

	N	Média	R	R^2	RMSE	CV%	SQR
LWC	22	70,4	0,92	0,85	1,67	0,02	56,2
SLA	21	147	0,88	0,77	15,4	0,10	488
Clha/Clhb	23	4,0	0,7	0,47	0,66	0,16	9,6

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O teor de água nas folhas (LWC) apresentou alta correlação ($r=0,92$) para espécie *H. dulcis* na razão entre 706nm e 532nm (R_{706}/R_{531}) na região do visível (Figura 36-a). No entanto, a absorção da água é muito baixa nessa região (Danson et al., 1992) e as altas correlações podem estar associadas ao conteúdo de clorofila na folha (KUMAR L., 2007) e aos aspectos estruturais (JACQUEMOND e USTIN, 2019). Ainda assim, devemos considerar que a espécie não teve perdas excessivas quanto ao conteúdo de água, e o aumento da reflectância no visível reflete o aumento do conteúdo de água líquida que, segundo Ustin e Jacquemoud (2020), podem ocorrer modos vibracionais para água líquida em comprimentos de onda mais curtos (401-900 nm).

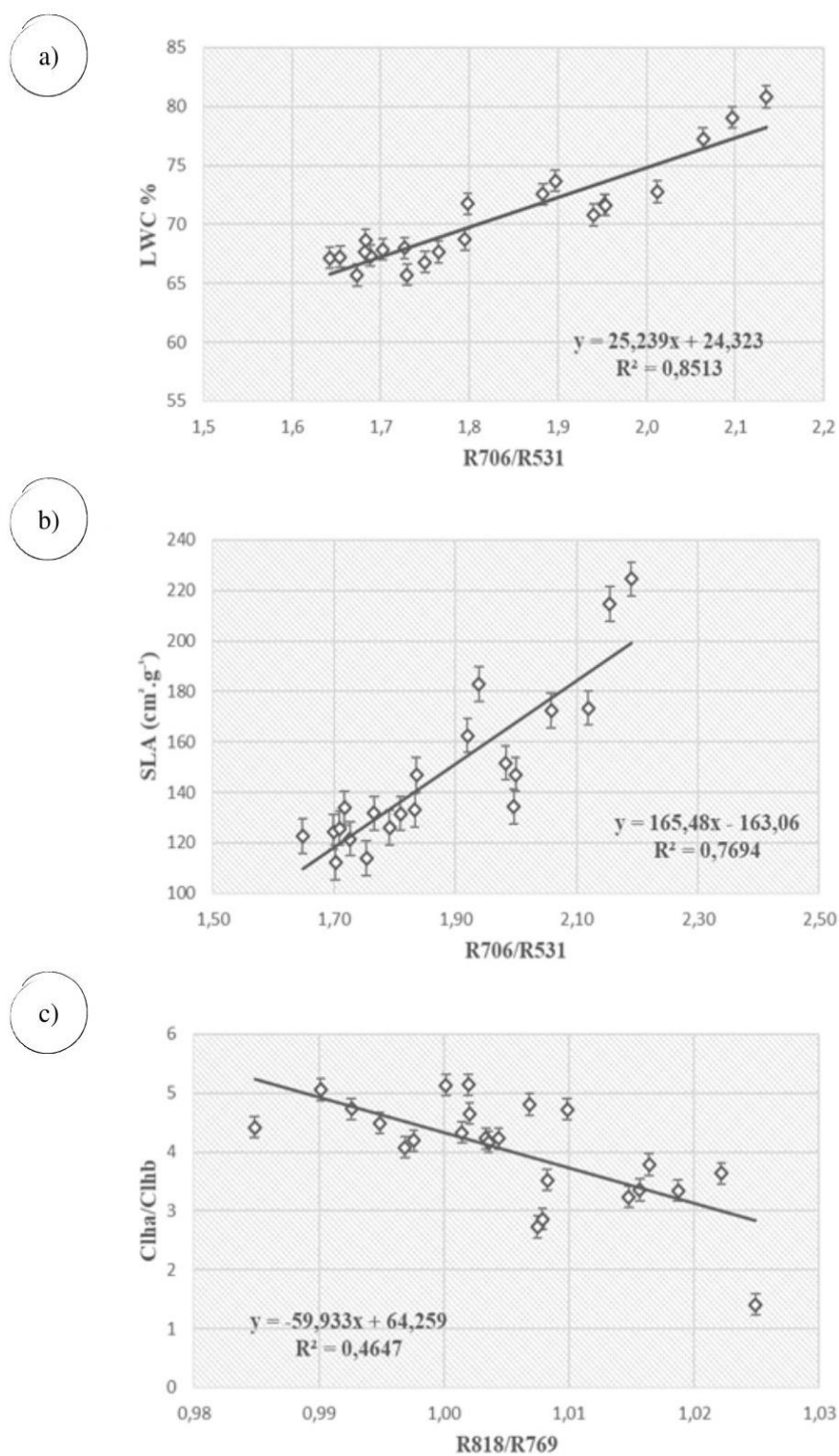
De modo geral, as espécies caducifólias apresentaram valores mais altos que as espécies perenifólias para SLA, e, quando comparamos nativas e invasoras, as invasoras apresentaram valores mais altos. A melhor correlação para o SLA ($r= 0,88$) foi obtida na razão entre 706 e 531nm (Figura 36-b) e é análoga à relação obtida para o conteúdo de água (LWC).

Quando analisamos conjuntamente o comportamento da espécie em relação ao conteúdo de água e a área foliar específica, observamos uma relação positiva entre os atributos e o aumento da razão, o que sugere que a invasora possui alta eficiência no uso da água nas folhas.

As melhores correlações, em função dos pigmentos fotossinteticamente ativos, foram encontradas na razão da Clha/Clhb ($r=0,7$) para razão simples entre o NIR (818 nm) e o vermelho (769nm) (Figura 36-c). Também, avaliamos o conteúdo de clorofila a e b separadamente para a espécie e não obtivemos resultados satisfatórios, apesar da clorofila b demonstrar maior sensibilidade quando comparada a clorofila a. Ainda que, os resultados obtidos para Clorofila-a foram superiores, em média 3,7 vezes, aos obtidos para Clorofila-b. Existem poucos exemplos na literatura em que a clorofila-a e a clorofila-b foram avaliadas isoladamente utilizando modelos empíricos (CHAPPELLE et al., 1992; BLACKBURN, 1999; JACQUEMOND e USTIN, 2019). Para Gitelson et al. (2001, 2002, 2006), uma alta correlação entre as refletâncias em 550 e 700 nm ($r=0,95$), assim com observado para espécie invasora *H.dulcis* ($r= 0,97$), é característica dos espectros de refletância de folhas livres de antocianinas para diversos tipos de plantas, independentemente do conteúdo de clorofila e estágio de maturidade (MERZLYAK et al., 2003b). As regiões espectrais, situadas próximas ao máximo de absorção de clorofila no verde (550-600 nm) e no vermelho (700-705 nm), são sensíveis a uma ampla faixa de variação do conteúdo de clorofila (de 0 a 60 $\mu\text{g.cm}^{-2}$) (SOLOVCHENKO, 2010). Também, Merzlyak et al. (2003a, b) e Gitelson e Merzlyak (1996, 1998) verificaram que as reflectâncias nas bandas (678 nm, 700 nm e 800 nm) são altamente correlacionadas ao conteúdo de clorofila.

A razão da Clha/Clhb é um parâmetro fortemente relacionado à resposta da espécie no processo de aclimação em função da disponibilidade de luz. A espécie *H. dulcis* apresentou os valores mais altos para a razão entre as espécies analisadas, o que confirma sua característica de espécie pioneira e necessidade de ambientes com alta disponibilidade de luz para o seu desenvolvimento. A sensibilidade expressa na razão do conteúdo, apesar de pouca significância ($R^2=0,47$), demonstra uma relação inversa, ou seja, o aumento da reflectância no NIR sugere uma diminuição no conteúdo de clorofila-a e conseqüentemente um aumento da clorofila-b. Para fins de compreender melhor essa relação, é necessário ampliar o estudo para outros sítios, e observar o comportamento da espécie em diferentes condições de luminosidade. Contudo, este parece um parâmetro promissor para o monitoramento da espécie com uso de ferramentas de SR.

Figura 36 - Modelo de Regressão Linear Simples (MRLS) para as propriedades ópticas mais significativas para espécie *H. dulcis*: (a) LWC (%) em função da razão R696/R531; (b) SLA ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) em função da razão R706/R531; (c) Clha/Clhb em função da razão R818/R769; Nível de conf. De 99%; Nível de significância de 99% ($p\text{-value} < 0,001$).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A detecção e mapeamento de Espécies Exóticas Invasoras (EEI) representa um grande desafio no campo do Sensoriamento Remoto em ecossistemas florestais complexos. O estudo realizado utilizou-se de um arcabouço metodológico para avaliar a discriminação entre plantas nativas e invasoras, com base em seus atributos funcionais foliares, associado ao uso da espectroscopia de campo. A metodologia consistiu em três etapas: caracterizar os atributos funcionais das folhas para as espécies invasoras e nativas e o seu comportamento espectral; discriminar as plantas invasoras em relação às espécies nativas e por último em definir as propriedades opticamente significativas em relação às EEI.

De modo geral, as espécies demonstraram comportamento distinto para todos os atributos funcionais foliares analisados. Com destaque para os pigmentos fotossintéticos que foram responsáveis pela maior variabilidade interespecífica. Também, foi possível constatar menor variabilidade intraespecífica em relação ao conteúdo de pigmentos para as plantas invasoras em comparação às nativas. Estas características refletem uma feição espectral distinta entre as espécies na região do visível, em especial na região espectral do verde em torno de 550 nm.

Para discriminar as espécies foi aplicada a Análise Discriminante Linear (LDA). O modelo demonstrou bons resultados com 97% de acerto e sua capacidade de generalização foi avaliada em 95%. Ademais, o uso integrado da primeira e segunda dimensão (LD1 e LD2) possibilitou a separação espectral de todas as espécies analisadas com boa precisão. Os espectros mais informativos concentram-se na região do visível e incluem faixas próximas a feição de absorção da clorofila (516 nm; 545-548 nm; 589-592 nm; 668 nm), incluso o comprimento de onda na faixa do vermelho (705 nm), conhecido por apresentar alta sensibilidade à variação do conteúdo. Somam-se a este resultado as principais feições de absorção dos carotenóides situados na região azul do espectro (403-487 nm; 467 nm; 484 nm). Entre os espectros mais informativos destacou-se a o comprimento de onda localizado no verde (553nm), o qual sugere diferença para o conteúdo de antocianina entre as espécies, o que poderia potencializar a discriminação.

A compreensão da relação entre as características funcionais das plantas e os seus “tipos ópticos” é apontada por Gamon et al. 2019 como uma lacuna no conhecimento. Nesse intuito, analisamos essa relação para as espécies invasoras alvos do estudo; a saber *P. guajava* e *H. dulcis*. A primeira, uma arvoreta perenifólia, e a segunda, uma árvore de grande porte caducifólia. Essas características taxonômicas inerentes às espécies promovem um

comportamento espectral distinto, apesar de expressarem propriedades funcionais semelhantes como em relação ao conteúdo de água (LWC) e área foliar específica (SLA). A espécie *P. guajava* apresenta a melhor razão espectral em torno de 820 e 800 nm no NIR e demonstra uma relação inversa entre o conteúdo e a razão, ou seja, o aumento da razão se dá em função da diminuição do conteúdo (de água e de área foliar específica). Já a *H. dulcis* apresenta uma relação positiva entre o conteúdo (de água e área foliar específica) expressa na razão entre 706 nm e 531 nm no visível. Para ambas as espécies invasoras, o LWC e o SLA possuem comportamento análogo.

Quanto ao conteúdo de pigmentos constatamos que as espécies possuem relações e respostas completamente distintas. A espécie *P. guajava* possui alta correlação para Car/Clh ($R=0,96$) na razão situada numa faixa estreita entre NIR e do Red-edge (R839/R785), o que pode indicar resposta ao estado fisiológico da planta, processo de aclimação e a ação de mecanismos de fotoproteção. Com base nas características da espécie, e por tratar-se de uma invasora altamente agressiva, acreditamos que a resposta esteja ligada a mecanismos de fotoproteção e dissipação do calor, conferindo uma grande vantagem adaptativa à espécie e um eficiente processo de aclimação à ambientes normalmente desfavoráveis para outras espécies (por exemplo como áreas degradadas). Já a espécie *H. dulcis* apresentou a melhor resposta para Clha/Clhb expressa na razão R818/R769 ($R=0,7$), a sensibilidade ao parâmetro e o seu comportamento em função da reflectância, nos leva a acreditar que a espécie mantém sua atividade fotossintética mesmo sob condições de alta luminosidade e temperatura, o que é apoiado pelo seu notório desenvolvimento e investimento em folhas, característico de espécies pioneiras.

Os atributos funcionais relacionados diretamente a estrutura e fisiologia foliar, como o conteúdo de água e a área foliar específica, confirmaram sua importância na diferenciação entre espécies e sua alta relevância para caracterização espectral da vegetação. A sensibilidade das espécies invasoras investigadas correlacionadas à parâmetros ligados ao processo de aclimação e ao estado fisiológico das plantas, como a razão Car/Clh e Clha/Clhb, são promissores, pois podem ter a sua aplicabilidade ampliada a partir do desenvolvimento de índices espectrais usando a combinação de bandas estreitas.

As informações obtidas nesse estudo possibilitam o desenvolvimento de modelos de transferência radiativa para simulação do dossel ou mesmo podem ser combinadas a outros fatores para o mapeamento das espécies: como forma (manchas extensas) para a invasora *P. guajava* e fenológicas (*Leaf flushing*) para invasora *H. dulcis*. Com o objetivo de ampliar a resolução espaço-temporal, com base em dados derivados de plataformas orbitais e suborbitais.

Portanto, embora requerer parametrização por espécie alvo, a metodologia é apropriada para discriminação e detecção de EEI e pode ser estendida a outras espécies invasoras e sítios. Destacamos que um acréscimo ao banco de dados espectral e de atributos funcionais das folhas, é pertinente, uma vez que amplia a expansão dos dados e o conhecimento no campo.

Por fim, certificou-se como uma valiosa ferramenta para o monitoramento de plantas invasoras, pois permite detectar com boa precisão as espécies e, portanto, é potencial para avaliar o avanço temporal das espécies e o seu impacto sobre áreas de vegetação nativa, bem como para auxiliar diretamente nas práticas de manejo e controle.

REFERÊNCIAS

- ALBERTE, R. S.; MCCLURE, P. R.; THORNBUR, J. P. Photosynthesis in trees. Organization of chlorophyll and photosynthetic unit size in isolated gymnosperm chloroplasts. **Plant Physiol**, v. 58, p. 341-344, 1976.
- ALLEN, J. A.; BROWN, C. S.; STOHLGREN, T.J. Non-native plant invasions of United States National Parks. **Biol Invasions**, v. 11, p. 21-95, 2009.
- ARRUDA, R.C.O.; FONTENELLE, G. B. Contribuição ao estudo da anatomia foliar de *Psidium cattleianum* Sabine (Myrtaceae). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 17, n. 1, p. 25-35, 1994.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. K.; CARLSON, M.; RASCHER, U.; VITOUSEK, P. M. Vegetation-Climate Interactions among Native and Invasive Species in Hawaiian Rainforest. **Ecosystems**, v. 9, n. 7, p. 1106-1117, 2006.
- ASNER, G. P.; JONES, M. O.; MARTIN, R. E.; KNAPP, D. E.; HUGHES, R. F. Remote Sensing of Native and Invasive Species in Hawaiian Forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 1912-1926, 2008a.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sens. Environ**, v. 112, p. 3958-3970, 2008b.
- ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; KENNEDY-BOWDOIN, T.; JONES, M.O.; MARTIN, R. E.; BOARDMAN, J.; HUGHES, R. F. Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LIDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1942-1955, 2008c.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Airborne spectranomics: Mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests, *Frontiers. Ecology and the Environment*, v. 7, n. 5, p. 269-276, 2009.
- ASNER, G. P. et al. Spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests. **Remote Sens Environ**, v. 115, p. 3587-3598, 2011a.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Canopy phylogenetic, chemical and spectral assembly in a lowland Amazonian forest. **New Phytologist**, v. 189, n. 4, p. 999-1012. 2011b.
- ASNER, G. P.; BRODRICK, P. G.; ANDERSON, C. B.; VAUGHN, N.; KNAPP, D. E.; MARTIN, R.E. Progressive forest canopy water loss during the 2012-2015 California drought. **Proc Natl Acad Sci**, v. 113, p. 249-255, 2016.
- BALL, A.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A.; PORTILLO QUINTERO, C.; RIVARD, B.; CASTRO-CONTRERAS, S.; FERNANDES, G. Patterns of Leaf Biochemical and Structural Properties of Cerrado Life Forms: Implications for Remote Sensing. **PLoS ONE**, v. 10, n. 2, 2015.
- BANDOS, T. V. Classification of hyperspectral images with regularized linear discriminant analysis. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 47, p. 862-873, 2009.

- BARBOSA, J. M.; ASNER, G. P.; MARTIN, R. E.; BALDECK, C. A.; HUGHES, F.; JOHNSON, T. Determining Subcanopy Psidium cattleianum Invasion in Hawaiian Forests Using Imaging Spectroscopy. **Remote Sens.**, p. 8-33, 2016.
- BARON, J.; HILL, D. J.; ELMILIGIB, H. Combining image processing and machine learning to identify invasive plants in high-resolution images. **International Journal of remote sensing**, 2018.
- BEISEL, K. G.; JAHNKE, S.; HOFMANN, D.; KÖPPCHEN, S.; SCHURR, U.; MATSUBARA, S. Continuous turnover of carotenoids and chlorophyll a in mature leaves of Arabidopsis revealed by 14 CO₂ pulse chase labeling [OA]. **Plant Physiol**, v. 152, p. 2188-2199, 2010.
- BLACKBURN, G. A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 3, p. 273-285, 1998a.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 657-675, 1998b.
- BLACKBURN, G. A. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 2, p. 224-237, 1999.
- BOENI, B. O. **Riqueza, estrutura e composição de espécies arbóreas em florestas secundárias invadidas por *Hovenia dulcis* Thunb, caracterização do seu nicho de regeneração e efeitos alelopáticos.** Dissertação (Mestrado em Biologia) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.
- BOLCH, E. A. et al. Remote Detection of Invasive Alien Species. In: CAVENDER-BARES, J.; GAMON, J.; TOWNSEND, P. (Eds.). **Remote Sensing of Plant Biodiversity**. Springer: Cham, 2020.
- BONAN, G. B.; LEVIS, S.; KERGOAT, L.; OLESON, K.W. Landscapes as patches of plant functional types: an integrating concept for climate and ecosystem models. **Glob Bio Geochem Cycles**, 2002.
- BONAN, G.B.; LEVIS, S.; SITCH, S.; VERTENSTEIN, M.; OLESON, K.W. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. **Glob Change Biol**, v. 9, p. 1543-1566, 2003.
- BONIFACIO, E.; PETRILLO, M.; PETRELLA, F. et al. Alien red oak affects soil organic matter cycling and nutrient availability in low-fertility well-developed soils. **Plant Soil**, v. 395, p. 215-229, 2015.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Unidades de Conservação: o que são.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/areas-protetidas/unidades-de-conservacao/o-que-sao.html>>. Acesso em: 06 mai. 2020.

BRENNER, J. C.; CHRISTMAN, Z.; ROGAN, J. Segmentation of Landsat Thematic Mapper Imagery Improves Buffelgrass (*Pennisetum Ciliare*) Pasture Mapping in the Sonoran Desert of Mexico. **Applied Geography**, v. 34, p. 569-575, 2012.

BUCCI, S. J.; SCHOLZ, F. G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C. et al. Nutrient availability constrains the hydraulic architecture and water relations of savannah trees. **Plant Cell Environ**, v. 29, p. 2153-2167, 2006.

BURKART, A.; COGLIATI, S.; SCHICKLING, A.; RASCHER, U. A novel UAV-based ultra-light weight spectrometer for field spectroscopy. **IEEE Sens J**, v. 14, n. 62-67, 2014.

CABI. *Psidium guajava*. In: **Invasive Species Compendium**. Wallingford, UK: CAB International. Disponível em: <www.cabi.org/isc>. Acesso em: 26 nov. de 2020.

CABI. *Hovenia dulcis*. In: **Invasive Species Compendium**. Wallingford, UK: CAB International. Disponível em: <www.cabi.org/isc>. Acesso em: 26 nov. de 2020.

CARTER, G. A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **Am J Bot**, v. 78, p. 916-924, 1991.

CARVALHO, P. E. R. **Ecologia, silvicultura e usos da uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunberg)**. Circular Técnica nº 23, Embrapa: CNP-Florestas, 1994.

CARVALHO, P. E. R. **Açoita-Cavalo (*Luehea divaricata*)**. Circular Técnica nº 147, Embrapa: CNP Florestas, 2008.

CAVENDER-BARES, J.; GAMON, J. A.; HOBBIE, S. E.; MADRITCH, M. D.; MEIRELES, J. E.; SCHWEIGER, A. K.; TOWNSEND, P. A. Harnessing plant spectra to integrate the biodiversity sciences across biological and spatial scales. **Am J Bot**, v. 104, p. 966-969, 2017.

CAVENDER-BARES, J.; GAMON, J. A.; TOWNSEND, P. A. **Remote Sensing of Plant Biodiversity**. Springer Nature: Berlin/Heidelberg, 2020.

CAVENDER-BARES, J.; SCHWEIGER, A. K.; PINTO-LEDEZMA, J. N.; MEIRELES, J. E. Applying Remote Sensing to Biodiversity Science. In: **Remote Sensing of Plant Biodiversity**, 2020.

CHANG, F. H.; TROUGHTON, J. H. **Chlorophyll a/b ratios in C3- and C4-plants**. *Photosyn- thetica*, v. 6, p. 57-65, 1972.

CHAPPELLE, E.W.; KIM, M.S.; MCMURTREY, J. E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, n. 3, p. 239-247, 1992.

CHENG, Y. B.; TOM, E.; USTIN, S. L. Mapping an invasive species, kudzu (*Pueraria montana*), using hyperspectral imagery in western Georgia. **J. Appl. Remote Sens.**, v. 1, 2007. 013514

CHENG, T.; RIVARD, B.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. **Remote Sens Environ**, v. 115, p. 659-670, 2011.

CHENG, T.; RIVARD, B.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; FÉRET, J. B.; JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. L. Deriving leaf mass per area (LMA) from foliar reflectance across a variety of plant species using continuous wavelet analysis. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 87, p. 28-38, 2014.

CRONK, Q. C. B.; FULLER, J. L. **Plant invaders: the threat to natural ecosystems**. London, UK: Chapman & Hall, 1995.

CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L.; PETERSON, D. L. Estimating the biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry. Testing the Kokaly and Clark methodologies. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 3, p. 349-359, 2001.

JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. **Leaf Optical Properties**. Cambridge: University Press, 2019.

DANSON, F. M.; STEVEN, M. D.; MALTHUS, T. J.; CLARK, J. A. High-spectral resolution data for determining leaf water content. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, p. 461-470, 1992.

DANSON, F. M.; BOWYER, P. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. **Remote Sens. Environ**, v. 92, p. 309-321, 2004.

DECHOUM, M. S.; SAMPAIO, A.B.; ZILLER, S.R.; ZENNI, R.D. Invasive species and the Global Strategy for Plant Conservation: how close has Brazil come to achieving Target 10?. **Rodriguésia**, v. 69, n. 4, p.1567-1576, 2018.

DIAO, C.; WANG, L. Incorporating plant phenological trajectory in exotic saltcedar detection with monthly time series of Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 60-71, 2016.

DIAO, C.; WANG, L. Landsat time series-based multiyear spectral angle clustering (MSAC) model to monitor the inter-annual leaf senescence of exotic saltcedar. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, p. 581-593, 2018.

DIDHAM, R. K.; TYLIANAKIS, J. M.; HUTCHISON, M. A.; EWERS, R. M.; GEMMELL, N. J. Are invasive species the drivers of ecological change? **TRENDS. Ecology and Evolution**, v. 20, n.9, 2005.

ELSHERIF, A.; GAULTON, R.; MILLS, J. Estimation of vegetation water content at leaf and canopy level using dual-wavelength commercial terrestrial laser scanners. **Interface Focus**, v. 8, 2018.

EUGENIO, F. C.; SCHONS, C. T; MALLMANN, C. L.; SCHUH, M. S.; FERNANDES, P.; BADIN, T. L. Remotely piloted aircraft systems and forests: a global state of the art and future challenges. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 8, p. 705-716, 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Towards an EU Strategy on Invasive Species.** Communication 789 Final, Commission of the European Communities, Brussels, 2008.

FERET, J. B.; FRANÇOIS, C.; ASNER, G.P.; GITELSON, A. A.; MARTIN, R. E.; BIDEL, L. P. R. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 3030-3043, 2008.

FERET, J. B.; ASNER, G. P. Spectroscopic classification of tropical forest species using radiative transfer modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2415-2422, 2011.

FERET, J. B.; ASNER, G. P. Mapping tropical forest canopy diversity using high-fidelity imaging spectroscopy. **Ecol Appl**, v. 24, p. 1289-1296, 2014.

FÉRET, J. B.; LE MAIRE, G.; JAY, S.; BERVEILLER, D.; BENDOULA, R.; HMIMINA, G.; CHERAIET, A.; OLIVEIRA, J. C.; PONZONI, F. J.; SOLANKI, T.; DE BOISSIEU, F.; CHAVE, J.; NOUVELLON, Y.; PORCAR-CASTELL, A.; PROISY, C.; SOUDANI, K., GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P.; LEFÈVRE FONOLLOSA, M. J. Estimating leaf mass per area and equivalent water thickness based on leaf optical properties: potential and limitations of physical modeling and machine learning. **Remote Sens. Environ**, p. 1-14, 2018.

FLEXAS, J.; SCOFFONI, C.; GAGO, J.; SACK, L. Leaf mesophyll conductance and leaf hydraulic conductance: an introduction to their measurement and coordination. *J. Exp. Bot.*, v. 64, p. 3965-3981, 2013.

FOXCROFT, L. C.; RICHARDSON, D. M.; ROUGET, M.; MACFADYEN, S. Patterns of alien plant distribution at multiple spatial scales in a large national park: implications for ecology, management and monitoring. **Diversity and Distributions**, v. 15, p. 367-378, 2009.

FOXCROFT, L. C.; JAROSICK, P. P.; RICHARDSON, D. M.; ROUGET, M. Protected-Area Boundaries as Filters of Plant Invasions. **Conservation Biology**, v. 25, n. 2, 2011.

FRAZON, C. R.; CAMPOS, L. Z. O.; PROENÇA, C. E. B.; SOUZA-SILVA, J. C. **Araçás do gênero *Psidium*: principais espécies, ocorrência, descrição e usos.** Documentos, 266. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009.

FUREY, C.; TECCO, P. A.; HARGUINDEGUY, N. P.; GIORGIS, M. A.; GROSSI, M. The importance of native and exotic plant identity and dominance on decomposition patterns in mountain woodlands of central Argentina. **Acta Oecologica**, v. 54, p. 13-20, 2014.

GAMON, J. A.; CHENG, Y. F.; CLAUDIO, H.; MACKINNEY, L.; SIMS, D. A. A mobile tram system for systematic sampling of ecosystem optical properties. **Remote Sens Environ**, v. 103, p. 246-254, 2006.

GAMON, J. A.; SOMERS, B.; MALENOVSKÝ, Z.; MIDDLETON, E. M.; RASCHER, U.; SCHAEPMAN, M. E. Assessing Vegetation Function with Imaging Spectroscopy. **Surveys in Geophysics**, v. 40, p. 489-513, 2019.

GAUSMAN, H.W.; RODRIGUEZ, R. R.; RICHARDSON, A. J. Infinite reflectance of dead compared with live vegetation. **Agronomy Journal**, v. 68, n. 2, p. 295-296, 1976.

GAUSMAN, H. W.; MENGES, R. M.; RICHARDSON, A. J.; WALTER, H.; RODRIGUEZ, R. R.; TAMEZ, S. Optical parameters of leaves of seven weed species. **Weed Science**, v. 29, n. 1, p. 24-26, 1981.

GBIF. **GBIF Home Page**. Disponível em: <<https://www.gbif.org>> Acesso em: 1 mar. de 2021

GISD. **Global Invasive Species Database**. Disponível em: <<http://www.iucngisd.org/gisd/search.php> on 26-11-2020>. Acesso em: 26 nov. de 2020.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. **J Plant Physiol**, v. 148, p. 494-500, 1996.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **Int J Remote Sens**, v. 18, p. 2691-2697, 1998.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; CHIVKUNOVA, O. B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. **Photochem Photobiol**, v. 74, p. 38-45, 2001.

GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochem Photobiol**, v. 75, p. 272-281, 2002.

GITELSON, A. A.; GRITZ, U.; Merzlyak, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **J. Plant Physiol.**, v. 160, p. 271-282, 2003.

GITELSON, A. A.; KEYDAN, G. P.; MERZLYAK, M. N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. **Geophysical Research Letter**, v .33, n. 11, 2006.

GITELSON, A. A. Towards a generic approach to remote non-invasive estimation of foliar carotenoid-to-chlorophyll ratio. **Journal of Plant Physiology**, v. 252, p. 251-260, 2020.

GRANT, L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 22, n. 2, p. 309-322, 1987.

GRAY, E. R.; VAN HEEZIK, Y. Exotic trees can sustain native birds in urban woodlands. **Urban Ecosyst**, v. 19, p. 315-329, 2016.

GREEN, R. O., PAINTER, T. H., ROBERTS, D. A., DOZIER, J. Measuring the expressed abundance of the three phases of water with an imaging spectrometer over melting snow, **Water Resour. Res.**, 42, p. 10402, 2006.

GROBE-STOLTENBERG, A.; HELLMANN, C.; THIELE, J., WERNER, C., OLDELAND, J. Early detection of GPP-related regime shifts after plant invasion by integrating imaging spectroscopy with airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, v. 209, p. 780-792, 2018.

GUREVITCH, J.; SCHEINER, S. M.; FOX, G. A. **Ecologia vegetal**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 592p.

HANTSON, W.; KOOISTRA, L.; SLIM, P. A. Mapping Invasive Woody Species in Coastal Dunes in the Netherlands: A Remote Sensing Approach Using LIDAR and High-Resolution Aerial Photographs. **Applied Vegetation Science**, v. 15, n. 4, p. 536-547, 2012.

HARRISON, D.; RIVARD, B.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A. Classification of tree species based on longwave hyperspectral data from leaves, a case study for a tropical dry forest. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, v. 66, p. 93-105, 2018.

HASTIE, T. et al. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction**. New York: Springer, 2001.

HAYTON, J. C.; ALLEN, D. G.; SCARPELLO V. Factor Retention Decisions in Exploratory Factor Analysis: a Tutorial on Parallel Analysis. **Organizational Research Methods**, v. 7, n. 2, p. 191-205, 2004.

HE, N.; LIU, N.; PIAO, S.; SACK, L.; XU, L.; LUO, Y.; HE, J.; HAN, X.; ZHOU, G.; ZHOU, X.; LIN, Y.; YU, Q.; LIU, S.; SUN, W.; NIU, S.; LI, S.; ZHANG, J.; YU, G. Ecosystem Traits Linking Functional Traits to Macroecology. **Trends in Ecology & Evolution** . v. 34, p. 200-210, 2019.

HENDERSON, L. **Alien Weeds and Invasive Plants**. **Plant Protection Research Institute**. Handbook, n 12. Cape Town, South Africa: Paarl Printers, 2001.

HILL, D. J.; TARASOFF, C.; WHITWORTH, G. E.; BARON, J.; BRADSHAW, J. L.; CHURCH, J. S. Utility of unmanned aerial vehicles for mapping invasive plant species: a case study on yellow flag iris (*Iris pseudacorus* L.). **Int. J. Remote Sens**, v. 38, n. 8, p. 2083-2105, 2017.

HILL, J.; BUDDENBAUM, H.; TOWNSEND, P. A. Imaging Spectroscopy of Forest Ecosystems: Perspectives for the Use of Space-borne Hyperspectral Earth Observation Systems. **Surveys in Geophysics**, v. 40, p. 553-588, 2019.

HILKER, T.; GITELSON, A.; COOPS, N. C.; HALL, F. G.; BLACK, T. A. Tracking plant physiological properties from multi-angular tower-based remote sensing. **Oecologia**, v. 165, p. 865-876, 2011.

HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C.; MOREIRA, M. Z.; HARIDASAN, M. Specific leaf area explains differences in leaf traits between congeneric savanna and forest trees. **Func Ecol**, v. 19, n. 39, p. 932-940, 2005.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 5, n. 1, 2016.

- HORLER, D. N. H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J.; BARRINGER, A. R. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. **Advances in Space Research**, v. 3, n. 2, p. 273-277, 1983.
- HOSGOOD, B.; JACQUEMOUD, S.; ANDREOLI, G.; VERDEBOUT, J.; PEDRINI, G.; SCHMUCK, G. **Leaf Optical Properties Experiment 93 (LOPEX93)**. Ispra: European Commission, Joint Research Centre, 1995. 20p
- HULME, P. E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. **Journal of Applied Ecology**, v. 46, p. 10-18, 2009.
- HULME, P. E. Beyond control: wider implications for the management of biological invasions. **Journal of Applied Ecology**, v. 43, p. 835-847, 2006.
- HUNT, E. R.; ROCK, B. N.; NOBEL, P. S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 22, p. 429-435, 1987.
- HYCZA, T.; STERENĆZAK, K.; BAŁAZY, R. Potential use of hyperspectral data to classify forest tree species. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 48, n. 18, 2018.
- INSTITUTO HÓRUS DE DESENVOLVIMENTO E CONSERVAÇÃO AMBIENTAL. **Base de dados de espécies exóticas invasoras do Brasil**. Disponível em: <<http://bd.institutohorus.org.br/www>>. Acesso em: 26 nov. de 2020.
- INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. IUCN guidelines for the prevention of biodiversity loss due to biological invasion. **Species**, v. 31-32, p. 28-42, 2000. Disponível em: <<https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/Rep-2000-052.pdf>>. Acesso em: 27 abr. de 2020.
- JACQUEMOUD, S.; BARET, F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 34, n. 2, p. 75-91, 1990.
- JACQUEMOUD, S.; VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G.; ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Investigation of leaf biochemistry by statistics. **Remote Sensing of Environment**, v. 54, n. 3, p. 180-188, 1995.
- JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. L.; VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G., ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, n. 3, p. 194-202, 1996.
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P., Asner, G.P., François, C., Ustin, S.L., (2009). **PROSPECT plus SAIL models: a review of use for vegetation characterization**. *Remote Sens Environ* 113:S56–S66.
- JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. **Leaf Optical Properties**. Cambridge University Press: Edição do Kindle, 2019. 500p.
- JANICK, J.; PAULL, R. E. **The encyclopedia of fruit & nuts**. 2008. 954p. Disponível em: <<https://www.cabi.org/isc/abstract/20113366221>>. Acesso em: 19 mai. de 2020.

JAY, S.; BENDOULA, R.; HADOUX, X.; FÉRET, J. B.; GORRETTA, N. A physically-based model for retrieving foliar biochemistry and leaf orientation using close-range imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 177, p. 220-236, 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2 ed. São José dos Campos: Parentese, 2009. 598p.

JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**. 4 ed. University of South Carolina, 2015. 659p.

JIMÉNEZ, M.; DÍAZ-DELGADO, R. Towards a Standard Plant Species Spectral Library Protocol for Vegetation Mapping: A Case Study in the Shrubland of Doñana National Park. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, v. 4, p. 2472-2495, 2015.

JU, C. H.; TIAN, Y. C.; YAO, X.; CAO, W. X.; ZHU, Y.; HANNAWAY, D. Estimating leaf chlorophyll content using red edge parameters. **Pedosphere**, v. 20, n. 5, p. 633- 644, 2010.

JUNG, M. et al. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. **J. Geophys Res Biogeosciences.**, v. 116, n.G3, 2011.

KATTGE, J. et al. TRY plant trait database – enhanced coverage and open access. **Glob Change Biol.**, v. 26, p. 119-188, 2019.

KILCA, R. V.; PEDRON, F. A.; SCHWARTZ, G.; LONGHI, S. J.; DEOBALD, G. A. Soil changes in a subtropical seasonal forest chronosequences in the south of Brazil. **Ciência Rural**, v. 45, n. 12, p. 2174-2180, 2015.

KITAJIMA, K.; HOGAN, K. P. Increases of chlorophyll *a/b* ratios during acclimation of tropical woody seedlings to nitrogen limitation and high light. **Plant Cell Environ**, v. 26, p. 857-865, 2003.

KHARE, S.; LATIFI, H.; GHOSH, S. K. Multi-scale assessment of invasive plant species diversity using Pléiades 1A, RapidEye and Landsat-8 data. **Geocarto International**, v. 33, n. 7, p. 681-698, 2018.

KOENIG, R. Unleashing an army to repair alien-ravaged ecosystems. **Science**, v. 325, p. 562-563, 2009.

KOKALY, R.; CLARK, R. N.; LIVO, K. E. Mapping the biology and mineralogy of Yellowstone National Park using imaging spectroscopy. **JPL Publication**, v. 97, n. 21, p. 235-244, 1998.

LAUSCH, A.; ERASMI, S.; KING, D. J.; MAGDON, P.; HEURICH, M. Understanding Forest Health with Remote Sensing - Part I - A Review of Spectral Traits, Processes and Remote-Sensing Characteristics. **Remote Sens.**, v. 8, p. 10-29, 2016.

LE MAIRE, G., FRANÇOIS, C.; DUFRENE, E. Towards universal broadleaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 1, p. 1-28, 2004.

- LE MAIRE, G.; FRANÇOIS, C.; SOUDANI, K.; BERVEILLER, D.; PONTAILLER, J. Y.; BRÉDA, N. et al. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3846-3864, 2008.
- KUMAR, L. High-spectral resolution data for determining leaf water content in Eucalyptus species: leaf level experiments. **Geocarto International**, v. 22, n. 1, p. 3-16, 2007.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and Carotenoids - pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.
- LISAR, S. Y. S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M. M.; RAHMAN, I. M. M. Water stress in plants: causes, effects and responses. In: RAHMAN, I. M. M.; HASEGAWA, H. (Eds.). **Water stress**. Rijeka, Croatia: InTech, 2009. p. 1-14
- LUCIEER, A.; MALENOVSKY, Z.; VENESS, T., WALLACE, L. Hyper UAS-Imaging spectroscopy from a multi-rotor unmanned aircraft system. **J Field Robot**, v. 31, p. 571-590, 2014.
- MACDOUGALL, A. S.; TURKINGTON, R. Are invasive species the drivers or passengers of change in degraded ecosystems? **Ecology**, v. 86, p. 42-55, 2005.
- MALENOVSKÝ, Z.; LUCIEER, A.; KING, D. H.; TURNBULL, J. D.; ROBINSON, S. A. Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation. **Methods Ecol Evol**, v. 8, p. 1842-1857, 2017.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia de orientação para o manejo de espécies exóticas invasoras em unidades de conservação federais**. Versão 2, Ministério do Meio Ambiente, 2019.
- MAFANYA, M.; TSELE, P.; BOTAI, J. O.; MANYAMA, P.; CHIRIMA, G. J.; MONATE, T. Radiometric calibration framework for ultra-high-resolution UAV-derived orthomosaics for large-scale mapping of invasive alien plants in semi-arid woodlands: *Harrisia pomanensis* as a case study. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15-16, p. 5119-5140, 2018.
- MALLMANN, C. L.; PRADO, D. A.; PEREIRA FILHO, W. Índice de vegetação por diferença normalizada para caracterização da dinâmica florestal no parque estadual Quarta Colônia, estado do Rio Grande do Sul – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1-15, 2015.
- MALLMANN, C. L., ZANINNI, A. F.; pereira filho, W. Vegetation Index Based In Unmanned Aerial Vehicle (Uav) To Improve The Management Of Invasive Plants In Protected Areas, Southern Brazil. **IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)**, p. 66-69, 2020.
- MARTIN, C. E. Chlorophyll a/b Ratios of Eleven North Carolina Mosses. **The Bryologist**, v. 83, n. 1, p. 84-87, 1980.

MARTIN, R. E. Lessons Learned from Spectranomics: Wet Tropical Forests. In: CAVENDER-BARES, J.; GAMON, J.; TOWNSEND, P. (Eds.). **Remote Sensing of Plant Biodiversity**. Springer: Cham, 2020.

MASTERS, G.; NORGROVE, L. (2010). **Climate change and invasive alien species**. UK CABI Work Pap 1, 2010. Disponível em: <<https://www.cabi.org/Uploads/CABI/expertise/invasive-alien-species-working-paper.pdf>> Acesso em: 14 dez. de 2020.

MCGEOCH, M. A.; BUTCHART, S. H. M.; SPEAR, D.; MARAIS, E.; KLEYNHANS, E. J.; Symes, A.; CHANSON, J.; HOFFMANN, M. Global indicators of biological invasion: species numbers, biodiversity impact and policy responses. **Diversity and Distributions**, v. 16, p. 95-108, 2010.

MCNEELY, J. A.; MOONEY, H. A.; NEVILLE, L. E.; SCHEI, P. J.; WAAGE, J. K. A global strategy on invasive alien species: synthesis and ten strategic elements. In: MOONEY, H. A.; MACK, R. N.; MCNEELY, J. A.; NEVILLE, L. E.; SCHEI, P. J.; WAAGE, J. K. (Eds.). **Invasive alien species: a new synthesis**. Washington: Island Press, 2005. p. 332-345

MEDVECKÁ, J.; JAROLÍMEK, I.; HEGEDŮŠOVÁ, K.; ŠKODOVÁ, I.; BAZALOVÁ, D.; BOTKOVÁ, K.; ŠIBÍKOVÁ, M. Forest habitat invasions – Who with whom, where and why. **Forest Ecology and Management**, v. 409, p. 468-478, 2018.

MENDIGUREN, G.; PILAR MARTÍN, M.; NIETO, H.; PACHECO-LABRADOR, J.; JURDAO, S. Seasonal variation in grass water content estimated from proximal sensing and MODIS time series in a Mediterranean Fluxnet site. **Biogeosciences**, v. 12, p. 5523-5535, 2015.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 334p

MERZLYAK, M. N.; CHIVKUNOVA, O. B.; RAZI NAQVI, K. Does a leaf absorb radiation in the near infrared (780– 900 nm) region? A new approach to quantifying optical reflection, absorption and transmission of leaves. **Photosynthesis Research**, v. 72, n. 3, p. 263-270, 2002.

MERZLYAK, M.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O.; SOLOVCHENKO, A.; POGOSYAN, S. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. **Russ J Plant Physiol**, v. 50, p. 704-710, 2003.

MERZLYAK, M.; SOLOVCHENKO, A.; GITELSON, A. A. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. **Postharvest Biol Technol**, v. 27, p. 197-212, 2003.

MILTON, E. J.; SCHAEPMAN, M. E.; ANDERSON, K.; KNEUBÜHLER, M.; FOX, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 92-109, 2009.

MUCHONEY, D. M. Earth observations for terrestrial biodiversity and ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1909-1911, 2008.

NARDINI, A.; LUGLIO, J. Leaf hydraulic capacity and drought vulnerability: possible trade-offs and correlations with climate across three major biomes. **Funct. Ecol.**, v. 28, 810–818, 2014.

NIDAMANURI, R. R. Hyperspectral discrimination of tea plant varieties using machine learning, and spectral matching methods. **Remote Sensing Applications**, v.19, 2020.

NIPHADKAR, M.; NAGENDRA, H. Remote sensing of invasive plants: incorporating functional traits into the picture. **International journal of remote sensing**, v. 37, n. 13, p. 3074-3085, 2016.

NOOMEN, M. F.; SKIDMORE, A. K.; VAN DER MEER, F. D.; PRINS, H. H. T. Continuum removed band depth analysis for detecting the effects of natural gas, methane and ethane on maize reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 3, p. 262-270, 2006.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 388p.

OGASHAWARA, I.; CURTARELLI, M. P.; SOUZA, A. F.; AUGUSTO-SILVA, P. B.; ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L. Interactive Correlation Environment (ICE) - A Statistical Web Tool for Data Collinearity Analysis. **Remote Sens**, v. 6, p. 3059-3074, 2014.

OSNAS, J. L. D.; KATABUCHI, M.; KITAJIIMA, S.; WRIGHT, J.; REICH, P. B.; VAN BAEL, S. A.; KRAFT, N. J. B.; SAMANIEGO, M. J.; PACALA, S. W.; LICHSTEIN, J. W. Divergent drivers of leaf trait variation within species, among species, and among functional groups. **Proceedings of the National Academy of Sciences May**, v. 115, n. 21, p. 5480-5485, 2018.

PADILHA, L. D.; LOREGIAN, A. C.; BUDCK, J. C. Forest fragmentation does not matter to invasions by *Hovenia dulcis*. **Biodivers Conserv**, v. 24, p. 2293-2304, 2015.

PAPP, L.; LEEUWEN, B. V.; SZILASSI, P.; TOBAK, Z.; SZATMÁRI, J.; ÁRVAI, M.; MÉSZÁROS, J.; PÁSZTOR, L. Monitoring Invasive Plant Species Using Hyperspectral Remote Sensing Data. **Land**, v. 20-21, p. 10-29, 2019.

PAULL, R. E.; DUARTE, O. **Tropical fruits**. 2 ed, 2012. 371p. Disponível em: <<http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20123357661>>. Acesso em: 19 mai. de 2020.

PAVLICK, R.; DREWRY, D.T.; BOHN, K.; REU, B.; KLEIDON, A. The Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (JeDi-DGVM): a diverse approach to representing terrestrial biogeography and biogeochemistry based on plant functional trade-offs. **Biogeosciences**, v. 10, p. 4137-4177, 2013.

PAZ-KAGAN, T. et al. Landscape-scale variation in canopy water content of giant sequoias during drought. **For Ecol Manag**, v. 419, n. 420, p. 291-304, 2018.

PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; STÜRMER, S. L. K.; MENEZES, F. P. Morfologia e Classificação Taxonômica de Neossolos e Saprólitos

derivados de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p.119-128, 2009.

PEDRON, F. A.; DALMOLIN, R. S. D. Solos da região do rebordo do Planalto Meridional no Rio Grande do Sul. In: SCHUMACHER, M. V.; LONGHI S. J.; BRUN, E. J.; KILCA, V. R. (Eds.) **A Floresta Estacional Subtropical - caracterização e ecologia no Rebordo do Planalto Meridional**. Santa Maria: Editora Palloti, 2011. p. 33-51

PENUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL, C.; SERRANO, L.; SAVE, R. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 1887-1905, 1993.

PENUELAS, 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.

PEÑUELAS, J.; INOUE, Y. Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. **Photosynthetica**, v. 36, n. 3, p. 355-360, 1999.

PIIROINENA, R.; FASSNACHT, F. E.; HEISKANEN, J.; MAEDA, E.; MACK, B.; PELLIKKA, P. Invasive tree species detection in the Eastern Arc Mountains biodiversity hotspot using one class classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 218, p. 119-131, 2018.

PIMENTEL, D.; ZUNIGA, R.; MORRISON, D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. **Ecological Economics**, v. 52, p. 273-288, 2005.

PINHEIRO, L. F. S.; KOLB, R. M.; ROSSATTO, D. R. Changes in irradiance and soil properties explain why typical non-arboreal savanna species disappear under tree encroachment. **Australian Journal of Botany**, v. 64, p. 333-341, 2016.

PINTO, F.; DAMM, A.; SCHICKLING, A.; PANIGADA, C.; COGLIATI, S.; LINOW, M. M.; BALVORA, A.; RASCHER, U. Sun-induced chlorophyll fluorescence from high-resolution imaging spectroscopy data to quantify spatio-temporal patterns of photosynthetic function in crop canopies. **Plant, Cell Environ**, v. 39, p. 1500-1512, 2016.

PINTO, F.; MÜLLER-LINOW, M.; SCHICKLING, A.; CENDRERO-MATEO, M. P.; BALLVORA, A.; RASCHER, U. Multiangular observation of canopy sun-induced chlorophyll fluorescence combining imaging spectroscopy and stereoscopy. **Remote Sens**, v. 9, n. 415, 2017.

POORTER, H.; NINEMETS, U.; POORTER, L.; WRIGHT, I. J.; VILLAR, R. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. **New Phytol.**, v. 182, p. 565-588, 2009.

RAFFERTY, J. P. **Invasive species**. Website Encyclopædia Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/invasive-species>>. Acesso em: 29 abr. de 2020.

- RAJAH, P., ODINDI, J., MUTANGA, O. Evaluating the potential of freely available multispectral remotely sensed imagery in mapping American bramble (*Rubus cuneifolius*), **South African Geographical Journal**, v. 100, n. 3, p. 291-307, 2018.
- REJEMÁNEK, M.; RICHARDSON, D. M. Trees and shrubs as invasive alien species – 2013 update of the global database. **Diversity Distrib**, v. 19, p. 1093-1094, 2013.
- RESASCO, J.; HALE, A. N.; HENRY, M. C.; GORCHOV, D. L. Detecting an invasive shrub in a deciduous forest understory using late-fall Landsat sensor imagery. **Int J Remote Sens**, v. 28, p. 3739-3745, 2007.
- RIAÑO, D.; VAUGHAN, P.; CHUVIECO, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; USTIN, S. L. Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content: analysis at leaf and canopy level. **IEEE Trans Geosci Remote Sens**, v. 43, p. 819-826, 2005.
- RICHARDSON, D. M.; PYSEK, P.; RJEMANEK, M.; BARBOUR, M. G.; PANETTA, F. D.; WEST, C. J. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. **Diversity and Distributions**, v. 6, p. 93-107, 2000.
- RICHARDSON, D. M.; REJMA'NEK, M. Trees and shrubs as invasive alien species – a global review. **Diversity and Distributions**, p. 788-809, 2011.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020.
- Roberts, D.A., Nelson, B.W., Adams, J.B. and Palmer, F., (1998), **Spectral changes with leaf aging in Amazon caatinga**. *Trees – Structure and Function*, 12(6): 315– 325.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Third ERTS Symposium NASA**, v. 351, n. 1, p. 309-317, 1973.
- ROVEDDER, A. P. M.; ALMEIDA, C. M.; ARAUJO, M. M.; TONETTO, T. S.; SCOTTI, M. S. V. Relação solo-vegetação em remanescente da floresta estacional decidual na Região Central do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 44, n. 12, p. 2178-2185, 2014.
- SALA, O. E.; CHAPIN, F. S.; ARMESTO, J. J.; BERLOW, E.; BLOOMFIELD, J.; DIRZO, R.; HUBER-SANWALD, E.; HUENNEK, L. F.; JACKSON, R. B.; KINZIG, A.; LEEMANS, R.; LODGE, D. M.; MOONEY, H. A.; OESTERHELD, M.; POFF, N. L.; SYKES, M. T.; WALKER, B. H.; WALKER, M.; WALL, D. H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**, v. 287, n. 5459, p.1770-1774, 2000.
- SCHAFF, L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; GALVÃO, F.; SANQUETTA, C.; LONGHI, S. Modificações florístico-estruturais de um remanescente de Floresta Ombrofila Mista Montana no período de 1979 e 2000. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, 2006.
- SCHERER, H. **Chlorophylls and Carotenoids**. Chemistry of. Wiley Encyclopedia of Chemical Biology, 2008.

SCHERER, H. Chlorophylls. In: RENGER, G. **Primary Processes of Photosynthesis**. Royal Society of Chemistry, 2007. p.101-149.

SCHUMACHER, M. V.; LONGHI, S. J.; BRUN, E. J.; KILCA, V. R. (Eds.). **A Floresta Estacional Subtropical - Caracterização e Ecologia no Rebordo do Planalto Meridional**. Santa Maria: Editora Pallotti, 2011. 320p.

SCIPIONI, M. C.; LONGHI, S. J.; REINERT, D. J.; ARAUJO, M. M.; PEDRON, F. de A. Distribuição do compartimento arbóreo em gradiente de relevo e solos na encosta Meridional da Serra Geral, RS. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1295-1301, 2010.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL **Anais do Seminário Regional de Espécies Exóticas Invasoras, PR, SC, RS**. Organização: Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul, Instituto do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina, Instituto Ambiental do Paraná, Porto Alegre, 2019.

Serbin, S.P., Singh, A., McNeil, B.E., Kingdon, C.C., Townsend, P.A., (2014). **Spectroscopic determination of leaf morphological and biochemical traits for northern temperate and boreal tree species**. *Ecol Appl* 24:1651–1669

SERBIN, S. P.; TOWNSEND, P. A. Scaling Functional Traits from Leaves to Canopies. In: CAVENDER-BARES, J.; GAMON, J.; TOWNSEND, P. (Eds.). **Remote Sensing of Plant Biodiversity**. Springer: Cham, 2020.

SHANG, X.; CHISHOLM, L. A. Classification of Australian Native Forest Species Using Hyperspectral Remote Sensing and Machine-Learning Classification Algorithms. **IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**, v. 7, p. 2481-2489, 2014.

SHINE, C.; KETTUNEN, M.; TEN BRINK, P.; GENOVESI, P.; GOLLASCH, S. **Technical support to EU strategy on invasive alien species (IAS) – Recommendations on policy options to minimize the negative impacts of invasive alien species on biodiversity in Europe and the EU**. Final report for the European Commission. Brussels: Institute for European Environmental Policy, 2009. 35p.

SIMBERLOFF, D.; VON HOLLE, B. Positive interactions of nonindigenous species: invasional meltdown? **Biol. Inv.**, v. 1, n. 21-32, 1999.

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. 2-3, p. 337-354, 2002.

SIMS, D. A.; LUO, H.Y.; HASTINGS, S.; OECHEL, W. C.; RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. **Remote Sens Environ**, v. 103, p. 289-303, 2006.

SMITH, C. W. Impact of alien plants on Hawaii's native biota. In: STONE, C. P.; SCOTT, J. M. (Eds.). **Hawaii's Terrestrial Ecosystems: Preservation and Management**. Honolulu: University of Hawaii Press, 1985. p. 180-250

SMITH, C. W. **Pest Plants of Hawaiian Native Ecosystems**. University of Hawaii/USA: Department of Botany, 1998. Disponível em: <http://www.botany.hawaii.edu/faculty/cw_smith/aliens.htm>. Acesso em: 19 mai. de 2020.

SOBRAL, M. et al. **Flora arbórea e arborecente do Rio Grande do Sul, Brasil**. São Carlos: RiMA/Novo Ambiente, 2006. 350 p.

SOLOVCHENKO, A. **Photoprotection in Plants Optical Screening-based Mechanisms**. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2010. 168p.

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. Invasive Species Mapping in Hawaiian Rainforests Using Multi-Temporal Hyperion Spaceborne Imaging Spectroscopy. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 2, p. 351-359, 2013.

SPEAR, D.; MCGEOCH, M. A.; FOXCROFT, L.C.; BEZUIDENHOUT, H. Alien species in South Africa's national parks. **Koedoe**, v. 53, n. 1, 2011.

SRIDHAR, B. B. M.; VINCENT, R. K.; CLAPHAM, W. B.; SRITHARAN, S. I.; OSTERBERG, J.; NEALE, C. M. U.; WATTS, D. R. Mapping Saltcedar (*Tamarix Ramosissima*) and Other Riparian and Agricultural Vegetation in the Lower Colorado River Region Using Multi-Spectral Landsat TM Imagery. **Geocarto International**, v. 25, n. 8, p. 649-662, 2010.

STADLER, J.; TREFFLICH, A.; KLOTZ, S.; BRANDL, R. Exotic plant species invade diversity hot spots: the alien flora of northwestern Kenya. **Ecography**, v. 23, p. 169-176, 2000.

STOHLGREN, T. J. Beyond theories of plant invasions: lessons from natural landscapes. **Comments Theor Biol**, v. 7, p. 355-379, 2002.

STOHLGREN, T. J.; PYŠEK, P.; KARTESZ, J. et al. Widespread plant species: natives versus aliens in our changing world. **Biol Invasions**, v.13, p. 1931-1944, 2011.

STREHER, A. S.; TORRES, R. S.; MORELLATO, L. P. C.; SILVA, T. S. F. Accuracy and limitations for spectroscopic prediction of leaf traits in seasonally dry tropical environments. **Remote Sensing of Environment**, v. 244, p. 1118-1128, 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 574p.

TESFAMICHAEL, S. G.; NEWETE, S. W.; ADAM, E.; DUBULA, B. Field spectroradiometer and simulated multispectral bands for discriminating invasive species from

morphologically similar cohabitant plants. **GIScience & Remote Sensing**, v. 55, n. 3, p. 417-436, 2018.

THOMAS, J. R.; GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agronomy Journal**, v. 69, n. 5, p. 799-802, 1977.

THOMPSON, D.R., GUANTER, L., BERK, A., GAO, B.C., RICHTER, R., SCHALÄPFER, D., THOME, K.J. Retrieval of Atmospheric Parameters and Surface Reflectance from Visible and Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy Data. **Surv Geophys**, v. 40, p. 333-360, 2019.
TOWNSEND, A. R.; CLEVELAND, C. C.; ASNER, G.; BUSTAMANTE, M. M. C. Controls of foliar N:P ratios in tropical rain forests. *Ecology*, v. 88, p. 107-118, 2007.

USGS. **Science for a changing world. Discover ecosystems**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/media/images/discover-ecosystems>> Acesso em: 20 abr. de 2020.

USTIN S. L.; JACQUEMOUD, S.; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P. Remote sensing of the environment: state of the science and new directions. In: **Manual of Remote Sensing: Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring**. v. 4, Ustin: John Wiley & Sons, 2004. p. 679-729.

USTIN, S. L.; GAMON, J. A. Remote sensing of plant functional types. **New Phytol**, v. 186, p. 795-816, 2010.

USTIN, S. L.; JACQUEMOUD, S. How the Optical Properties of Leaves Modify the Absorption and Scattering of Energy and Enhance Leaf Functionality. In: CAVENDER-BARES, J.; GAMON, J.; TOWNSEND, P. (Eds.). **Remote Sensing of Plant Biodiversity**. Springer: Cham, 2020.

VAN BODEGOM, P. M.; DOUMA, J. C.; VERHEIJEN, L. M. A fully traits-based approach to modeling global vegetation distribution. **Proc Natl Acad Sci**, v. 111, p. 13733-13738, 2014.

VAN WILGEN, B. W.; RICHARDSON, D. M. Challenges and trade-offs in the management of invasive alien trees. **Biol Invasions**, v. 16, p. 721-734, 2014.

VAN DER WINDT, H. J.; SWART, J. A. A. Ecological corridors, connecting science and politics: the case of the Green River in the Netherlands. **Journal of Applied Ecology**, v. 45, p. 124-132, 2008.

VILE, D.; GARNIER, E.; SHIPLEY B. et al. Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves. **Annals of Botany**, v. 96, p. 1129-1136, 2005.

VÍTKOVÁ, M.; MÜLLEROVÁ, J.; SÁDLO, J.; PERGL, J.; PYSEK, P. Black locust (*Robinia pseudoacacia*) beloved and despised: A story of an invasive tree in Central Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 384, n. 15, 287-302, 2017.

VOGELMANN, T. C. Plant tissue optics. **Annual Review of Plant Biology**, v. 44, p. 231-251, 1993.

WALTER, H.; KOCH, W. Optical parameters of leaves of crops and weeds. **Avignon**, v. 8, n. 11, p. 225-232, 1981.

WANG, L.; HUNT, E. R., QU, J. J.; HAO, X.; DAUGHTRY, C. S. T. Estimating dry matter content of fresh leaves from the residuals between leaf and water reflectance. **Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 2, p. 137-145, 2011.

WANG, L.; QU, J. J.; HAO, X.; HUNT, E. R. Estimating dry matter content from spectral reflectance for green leaves of different species. **International Journal of Remote Sensing**, 32, n. 22, p. 7097-7109, 2011.

WANG, X.; WOTTON, B. M.; CANTIN, A. S.; PARISIEN, M. A.; ANDERSON, K.; MOORE, B.; FLANNIGAN, M. D. CFFDRS: an R package for the Canadian forest fire danger rating system. **Ecological Processes**, v. 6, n. 1, p. 5-16, 2017.

WANG, R.; GAMON, J. A. Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. **Remote Sensing of Environment**, v. 231, p. 111-218, 2019.

WEBER, E. **Invasive plant species of the world: A reference guide to environmental weeds**. Wallingford, UK: CAB International, 2003. 548p.

WIENS, J.; SUTTER, R.; ANDERSON, M.; BLANCHARD, J.; BARNETT, A.; AGUILAR-AMUCHASTEGUI, N.; AVERY, C.; LAINE, S. Selecting and conserving lands for biodiversity: The role of remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1370-1381, 2009.

WILCOVE, D.; ROTHSTEIN, D.; DUBOW, J.; PHILLIPS, A.; LOSOS, E. Quantifying Threats to Imperiled Species in the United States. **BioScience**, v. 48, n. 8, p. 607-615, 1998.

WILFONG, B. N.; GORCHOV, D. L.; HENRY, M. C. Detecting an invasive shrub in deciduous forest understories using remote sensing. **Weed Sci**, v. 57, p. 512-520, 2009.

WILSON, P.J.; THOMPSON, K.; HODGSON, J. G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. **New Phytologist**, v. 143, p. 155-162, 1999.

WITT, A.; LUKE, Q. **Guide to the naturalized and invasive plants of Eastern Africa**. Wallingford, UK: CABI, 2017. 601p.

WRIGHT, I. J.; REICH, P. B.; WESTOBY, M.; ACKERLY, D. D.; BARUCH, Z. et al. The worldwide leaf economics spectrum. **Nature**, v. 428, p. 821-827, 2004.

WRIGHT, I. J.; ACKERLY, D. D.; BONGERS, F.; HARMS, K. E.; IBARRA-MANRIQUEZ, G. et al. Relationships among ecologically important dimensions of plant trait variation in seven neotropical forests. **Ann Bot**, v. 99, p. 1003-1015, 2007.

WOZIWODA, B.; KOPEĆ, D.; WITKOWSKI, J. The negative impact of intentionally introduced *Quercus rubra* L. on a forest Community. **Act. Soc. Bot. Pol.** v. 83, p. 39-49, 2014.

WU, J.; CHAVANA-BRYANT, C.; PROHASKA, N.; SERBIN, S. P.; GUAN, K.; ALBERT, L. P.; YANG, X.; VAN LEEUWEN, W. J. D.; GARNELLO, A. J.; MARTINS, G.; MALHI, Y.; GERARD, F.; OLIVEIRA, R. C.; SALESKA, S. R. Convergence in relationships between leaf traits, spectra and age across diverse canopy environments and two contrasting tropical forests. In: Tropical plants and ecosystem function. **New Phytologist**, v. 214, p. 1033-1048, 2017.

WU, X.; SHEN, X.; CAO, L.; WANG, G.; CAO, F. Assessment of individual tree detection and canopy cover estimation using unmanned aerial vehicle based light detection and ranging (UAV-LiDAR) data in planted forests. **Remote Sens**, v. 11, n. 908, 2019.

YAMAMOTO, H.; SUZUKI, Y.; HAYAKAWA, S. The effects of overlapping, thickness and water content of plant leaves in spectral reflectance. **Journal of the Remote Sensing Society of Japan**, v. 15, n. 5, p. 463-470, 1995.

YEBRA, M.; QUANC, X.; RIAÑOD, D.; LARRAONDO, P. R.; VAN DIJKA, A. I. J. M.; CARYA, G. J. A fuel moisture content and flammability monitoring methodology for continental Australia based on optical remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 260-272, 2018.

YILMAZ, M. T.; HUNT, E. R.; GOINS, L. D.; USTIN, S. L.; VANDERBILT, V. C.; JACKSON, T. J. Vegetation water content during SMEX04 from ground data and Landsat 5 Thematic Mapper imagery. **Remote Sens. Environ.** v. 112, p. 350-362, 2008.

YIN, Q.; WANG, L.; LEI, M.; DANG, H.; QUAN, J.; TIAN, T.; CHAI, Y.; YUE, M. The relationships between leaf economics and hydraulic traits of woody plants depend on water availability. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 245-252, 2018.

YUAN, C. et al. Phenotypic plasticity of lianas in response to altered light environment. **Ecological research**, v. 31, n. 3, p. 375-384, 2016.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMED, G. H.; NOLAND, T. L.; SAMPSON, P. H. Vegetation stress detection through chlorophyll a + b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. **Journal of Environmental Quality**, v. 31, n. 5, p. 1433-1441, 2002.

ZENNI, R. D.; ZILLER, S. R. Visão geral das plantas exóticas invasoras no Brasil. **Rev. Bras. Bot.**, v. 34, n. 3, p.431-446, 2011.

ZHOU, X. et al. Assessment of leaf carotenoids content with a new carotenoid index: Development and validation on experimental and model data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 57, p. 24-35, 2017.

ZHOU, X.; HUANG, W.; JINGCHENG ZHANG, K. W.; CASA, R.; HUANG, Y. A novel combined spectral index for estimating the ratio of carotenoid to chlorophyll content to monitor crop physiological and phenological status. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.**, v. 76, p. 128-142, 2019.

ZILLER, S. R. Espécies exóticas da flora invasora em unidades de conservação. In: CAMPOS, J. B.; TOSSULINO, M. de G. P.; MULLER, C. R. C. (Orgs.). **Unidades de**

conservação: ações para valorização da biodiversidade. Curitiba: Instituto Ambiental do Paraná, 2006. p. 34-52.

ZWIENIECKI, M. A.; BOYCE, C. K. Evolution of a unique anatomical precision in angiosperm leaf venation lifts constraints on vascular plant ecology. **Proc. R. Soc. B Biol. Sci.**, v. 281, p. 2013-2829, 2014.