

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação MCTI

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA

Programa de Pós Graduação em Ciências de Florestas Tropicais- CFT

Antonia Débora Lima Plácido

**Padrões espectrais de reflectância foliar e sua relação com o *status*
hídrico em uma floresta de terra firme na Amazônia Central**

Manaus

2023

Antonia Débora Lima Plácido

Padrões espectrais de reflectância foliar e sua relação com o *status* hídrico em uma floresta de terra firme na Amazônia Central

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

Orientador: Dr. Bruno Oliva Gimenez

Manaus

2023



P698p Plácido, Antonia Débora Lima
Padrões espectrais de reflectância foliar e sua relação com o status hídrico em uma floresta de terra firme na Amazônia Central / Antonia Débora Lima Plácido; orientador Bruno Oliva Gimenez. - Manaus: [s.l.], 2023.

6,44 MB
55p. : il. color.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2023.

1. Espectroscopia. 2. Ecofisiologia vegetal. 3. Sensoriamento remoto. I. Gimenez, Bruno Oliva. II. Título

CDD 571.45



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO - MESTRADO

Ata da Defesa remota de **ANTONIA DÉBORA LIMA PLÁCIDO**, ocorrida no dia 13/11/2023, via plataforma de videoconferência Zoom.

Aos 13 de novembro de 2023, às 14h00 (horário de Manaus/AM), realizou-se a Defesa Pública de Dissertação de **ANTONIA DÉBORA LIMA PLÁCIDO**, aluna do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências de Florestas Tropicais, intitulada "**Padrões espectrais de reflectância foliar e sua relação com o status hídrico em uma floresta de terra firme na Amazônia Central**", sob a orientação do Dr. Bruno Oliva Gimenez (INPA), em conformidade com o Art. 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI/INPA) e Art. 67 do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, como parte das atividades para conclusão e obtenção do Título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais. A **Banca Examinadora** foi constituída pelos seguintes membros: Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi (UNB), Cynthia Wright (ORNL), Jeffrey Quintin Chambers (UC Berkeley), e tendo como suplentes os seguintes membros: Robinson Isaac Negrón Juárez (Berkeley Lab), Cristiano Souza do Nascimento (INPA). O Presidente da Banca Examinadora deu início à sessão e informou os procedimentos do exame. A aluna fez uma exposição do seu estudo e ao término foi arguida oralmente pelos membros da Comissão. Após as arguições os membros da banca se reuniram para avaliação e chegaram ao seguinte parecer:

Nome	Parecer	Assinaturas
Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Cynthia Wright	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Jeffrey Quintin Chambers	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	

Menção: () "Com Distinção" () "Com Louvor" () "Com Distinção e Louvor"

Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente Ata que, após lida e aprovada, foi assinada pela Coordenação

Bruno Oliva Gimenez
Presidente da Banca / Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br ADRIANO JOSE NOGUEIRA LIMA
Data: 28/11/2023 10:47:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Adriano José Nogueira Lima
Coordenador do PPG-CFT
PO. N° 163/2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser minha força nos momentos de dificuldades e por guiar-me pelos melhores caminhos.

À minha mãe, Ana Roza, por todo amor incondicional, carinho e apoio durante toda minha vida. Obrigada por nunca medir esforços em prol da minha educação e por todos os incentivos para que eu alcance tudo aquilo que desejo.

Às minhas irmãs, Josiane, Rosiane e Izabel, por todo carinho e cuidado. Obrigada por serem meus exemplos de luta e determinação.

Ao meu orientador, Dr. Bruno Gimenez, pela parceria, ensinamentos e oportunidades. Agradeço por toda orientação durante a condução do trabalho.

Ao Dr. Niro Higuchi e toda equipe do laboratório de Manejo Florestal, agradeço pelas oportunidades e suporte ao longo do período do mestrado.

Ao projeto NGEE-Tropics, por todo o suporte técnico-científico.

Ao INPA e PPG-CFT, pela oportunidade e apoio.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa.

À CAPES, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À FAPEAM, pelo financiamento e apoio

Aos amigos, em especial aqueles que fiz em Manaus. Obrigada pelos momentos de descontração e por tornarem o caminho mais leve.

A todos os professores e mestres que tive durante minha jornada. Obrigada por acreditarem na educação como ferramenta de transformação.

A todas as pessoas, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

As florestas tropicais possuem um importante papel na regulação dos ciclos da água, do carbono e fluxos de energia. Assim, estudos que abordam tanto aspectos ecológicos como fisiológicos (ecofisiologia) são necessários para se compreender como a disponibilidade hídrica atua na manutenção desses ecossistemas. Neste cenário, a espectroscopia na região do visível (VIS) e do infravermelho (VIS-NIR) surge como uma ferramenta rápida e não destrutiva para se obter informações sobre o status hídrico de órgãos e tecidos das plantas. Estudos anteriores demonstraram que, na Amazônia Central, espécies de platô são mais adaptadas às condições de seca e, portanto, investem em um sistema hidráulico mais resistente, com menor diâmetro médio dos vasos e menor área de alburno quando comparadas com espécies presentes em áreas de baixo. Além da influência da topografia e do tipo de solo nas características hidráulicas das espécies, a posição no dossel e a densidade da madeira também podem influenciar esses traços funcionais hidráulicos. Sabe-se, por exemplo, que espécies de baixa densidade da madeira possuem uma maior vulnerabilidade hidráulica quando comparadas a espécies de alta densidade, devido aos *trade-offs* diferentes que esses dois grupos funcionais possuem. Espécies de baixa densidade (comumente associadas às plantas pioneiras) investem o carbono assimilado em crescimento, enquanto as espécies de alta densidade (comumente associadas às clímax) investem o carbono em reservas. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi investigar a relação entre o status hídrico e a reflectância espectral foliar de espécies arbóreas com diferentes densidades da madeira e com ocorrência exclusiva em uma área de platô na Amazônia Central. Para isso, o critério principal para a seleção das espécies foi o espectro de densidade da madeira. Foram realizadas leituras espectrais em folhas maduras de diferentes espécies utilizando o espectroradiômetro modelo ASD FieldSpec 3, concomitantemente à aquisição de dados de curvas de pressão-volume e traços funcionais foliares, tais como o conteúdo de água da folha, a massa foliar específica e os teores de nitrogênio. Para as coletas foliares foi utilizada uma plataforma de elevação (grua) modelo Genie Z80/60 com cerca de 26 metros de alcance vertical. Os resultados iniciais não apontaram diferenças significativas nos traços foliares para os grupos de alta e baixa densidade. No entanto, a espectroscopia mostrou

que existem diferenças nas estratégias ecológicas para os grupos funcionais (baixa e alta densidade). Os dados de reflectância ao longo da curva de pressão-volume sugeriram que espécies de alta densidade da madeira são mais tolerantes ao estresse hídrico, com menor ponto de perda de turgor e maior conteúdo de água da folha. Em relação aos traços foliares, foi observada fortes correlações entre o teor de água das folhas e a faixa de infravermelho de ondas curtas (1350-2400 nm). A massa foliar específica demonstrou fortes correlações com a região do infravermelho de ondas curtas (1300-2400 nm), enquanto o conteúdo de nitrogênio apresentou correlações mais expressivas com a região do espectro visível (700-1300 nm). Os índices espectrais avaliados foram sensíveis para os traços funcionais foliares e ao ponto de perda de turgor. A partir deste trabalho, espera-se a melhor compreensão sobre o comportamento espectral vegetação e sua relação com as características funcionais das plantas.

Palavras chaves: espectroscopia, ecofisiologia vegetal, traços funcionais foliares, mudança climática.

ABSTRACT

Tropical forests play an important role in regulating water cycles, carbon and energy flows. Thus, studies that address both ecological and physiological aspects (ecophysiology) are necessary to understand how water availability affects the maintenance of these ecosystems. In this scenario, spectroscopy in the visible (VIS) and infrared (VIS-NIR) regions has emerged as a fast and non-destructive tool for obtaining information on the water status of plant organs and tissues. Previous studies have shown that, in the Central Amazon, plateau species are more adapted to drought conditions and therefore invest in a more resistant hydraulic system, with a smaller average vessel diameter and smaller sapwood area when compared to species found in lowland areas. In addition to the influence of topography and soil type on the hydraulic characteristics of species, canopy position and wood density can also influence these hydraulic functional traits. It is known, for example, that species with low wood density have greater hydraulic vulnerability when compared to species with high density, due to the different trade-offs that these two functional groups have. Low-density species (commonly associated with pioneer plants) invest the assimilated carbon in growth, while high-density species (commonly associated with climax plants) invest the carbon in reserves. In this context, the main objective of this work was to investigate the relationship between water status and leaf spectral reflectance of tree species with different wood densities and with exclusive occurrence in a plateau area in Central Amazonia. The main criterion for selecting species was the wood density spectrum. Spectral readings were taken on mature leaves of different species using an ASD FieldSpec 3 spectroradiometer, together with the acquisition of pressure-volume curve data and leaf functional traits such as leaf water content, specific leaf mass and nitrogen content. A Genie Z80/60 lifting platform (crane) with a vertical reach of around 26 meters was used to collect the leaves. The initial results showed no significant differences in leaf traits between the high and low density groups. However, spectroscopy showed that there are differences in ecological strategies for the functional groups (low and high density). The reflectance data along the pressure-volume curve suggested that high-density wood species are more tolerant of water stress, with a lower turgor loss point and higher leaf water content. With regard to leaf traits, leaf water content had significant correlations with short-wave infrared (1300-2400 nm). Specific leaf mass was most sensitive to the short-wave infrared region (1300-2400 nm). The

spectral indices evaluated were sensitive to leaf functional traits and the point of turgor loss. From this work, we hope to gain a better understanding of vegetation spectral behavior and its relationship with plant functional characteristics.

Keywords: spectroscopy, plant ecophysiology, leaf functional traits , climate change.

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	4
Geral.....	4
Específicos	4
3 Referencial Teórico	5
3.1 A Floresta Amazônica.....	5
3.2 A dinâmica da água nas plantas	6
3.4 Espectroscopia.....	7
3.5 Espectroscopia aplicada à vegetação.....	9
4. Material e Métodos	12
4.1 Descrição da área de estudo	12
4.2 Descrição do experimento.....	14
4.2.1 Espécies estudadas	14
4.2.2 Coleta de dados espectrais utilizando o espectroradiômetro (ASD FieldSpec 3)	16
4.2.3 Curvas de Pressão-Volume	17
4.3 Traços foliares funcionais	19
4.3.1 Conteúdo de água da folha.....	19
4.3.2 Massa foliar específica.....	20
4.3.3 Teor de Nitrogênio	20
4.4 Densidade da madeira	21
5. Índices de vegetação.....	21
6. Análise de dados	23
7. Resultados	24
7.1 Influência da densidade da madeira nos traços funcionais foliares.....	24
7.3 Correlações espectrais	26
7.4 Índices de vegetação.....	30
8. Discussão.....	35
8.1 A densidade da madeira e o espectro de economia foliar	35
8.2 A água e o comportamento espectral das plantas.....	36
8.3 Influência dos traços funcionais foliares na resposta espectral das plantas	38
8.4 Índices de vegetação e traços funcionais foliares.....	41
9. Conclusão.....	43
10. Referências Bibliográficas	44

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Espectro eletromagnético e suas principais regiões 8
- Figura 2. Seção transversal de uma folha com as possíveis trajetórias da radiação eletromagnética incidente 9
- Figura 3. Exemplo de uma curva de reflectância típica de uma folha verde 10
- Figura 4. Mapa de localização da área de estudo (projeto Bionte) na E.E.S.T. – ZF-2 12
- Figura 5. Figura ilustrativa detalhando a metodologia do presente estudo. (A) Coleta de material botânico em campo (BIONTE) utilizando a grua; (B) Leituras espectrais das folhas das espécies selecionadas utilizando o equipamento ASD Fieldspec 3; (C) Medidas dos traços funcionais foliares; (D) Medidas de potencial hídrico foliar e curvas pressão-volume.....14
- Figura 6. Fotografia do equipamento ASD FieldSpec 3 utilizado por este estudo.....15
- Figura 7. Medidas da curva de pressão-volume. (A) Medida de potencial hídrico foliar utilizando a Bomba de Scholander; (B) Secagem das folhas pela técnica de secagem em bancada.17
- Figura 8. Pesagem de dos discos foliares para obtenção dos traços funcionais foliares18
- Figura 9. Amostras de folhas moídas para análise do teor de nitrogênio.....19
- Figura 10. Box plot dos traços funcionais foliares analisados para cada grupo de densidade da madeira, sendo estes: massa foliar específica (LMA), conteúdo de água da folha (LWC), ponto de perda de turgor (TLP) e teor nitrogênio na folha (N). A linha horizontal dentro de cada caixa indica a mediana dos dados, a barra representa a variação de 50% dos dados, as linhas de erros são os percentis e os pontos redondos são outliers. (n alta densidade = 8 ; n baixa densidade = 623
- Figura 11- Assinatura espectral média das espécies agrupadas em classes de densidade da madeira nos diferentes estágios de desidratação ao longo da curva de pressão-volume. A curva na cor preta representa a assinatura espectral de todas as espécies, a curva em azul representa o grupo de alta densidade da madeira, enquanto a curva vermelha representa o grupo com baixa densidade da madeira.25
- Figura 12. Correlações espectrais entre a reflectância e os traços funcionais foliares. (A) Conteúdo de água da folha (LWC, %), (B) Massa foliar específica (LMA, g cm^{-2}) e (C) Teor de nitrogênio (N, g cm^{-2}). A linha preta é referente ao padrão de correlação para todas as espécies, em azul para o grupo de alta densidade da madeira e vermelho baixa densidade da madeira27
- Figura 13. Correlações espectrais entre o ponto de perda de turgor (TLP) e a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha ao longo da curva de pressão-volume. (A) Todas as espécies avaliadas neste trabalho, (B) grupo de baixa densidade da madeira e (C) baixa densidade da madeira. Em vermelho verde a reflectância da folha túrgida, azul a folha úmida e vermelho folha seca23

Figura 14. Matriz de correlação entre os traços funcionais foliares e os índices espectrais para o grupo de espécies de alta densidade da madeira. Os valores com * representam correlações significativas ($p < 0.05$) e ** ($p < 0.01$) 31

Figura 15. Matriz de correlação entre os traços funcionais foliares e os índices espectrais para o grupo de espécies de alta densidade da madeira. Os valores com * representam correlações significativas ($p < 0.05$) e ** ($p < 0.01$)32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espécies selecionadas por este estudo com os seus respectivos nomes científico, família botânica, densidade da madeira, diâmetro a altura do peito, classe de densidade e incremento médio anual	13
Tabela 2. Índices de vegetação utilizados por este estudo para relacionar com traços funcionais foliares de cada grupo. λ = comprimento de onda selecionado	21
Tabela 3. Valores de correlação entre o ponto de perda de turgor e os índices de vegetação para grupo de espécies de baixa densidade da madeira, considerando a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha. Os valores em negrito indicam correlação significativa ($p < 0.05$).	34
Tabela 4. Valores de correlação entre o ponto de perda de turgor e os índices de vegetação para grupo de espécies de alta densidade da madeira, considerando a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha. Os valores em negrito indicam correlação significativa ($p < 0.05$).	35

1. Introdução

A floresta amazônica desempenha um papel significativo nos ciclos biogeoquímicos globais, em especial nos ciclos da água e do carbono, e exerce influência na regulação do clima em diferentes escalas, desde local até global (Malhi et al., 2012). Devido a sua vasta reserva de carbono retido na biomassa, este ecossistema contribui com cerca de 33% da produção primária líquida terrestre anual (Field et al., 1998). Além dessa importante contribuição no ciclo do carbono, a umidade gerada pela floresta amazônica através do processo de evapotranspiração, contribui com cerca de 50% da precipitação local (Salati e Vose, 1984; Kunert et al., 2017), tendo também destaque no ciclo hidrológico da América do Sul. Desse modo, entender o funcionamento desse ecossistema é essencial para prever possíveis respostas ao aumento de temperatura e intensificação de eventos climáticos extremos, além de reduzir as incertezas dos modelos climáticos atuais (McDowell et al., 2019).

O desenvolvimento de uma planta é condicionado por diversos recursos ambientais, sendo a água um dos mais essenciais em todas as etapas. Nos locais do globo onde as temperaturas são adequadas para o crescimento e desenvolvimento de plantas, a ocorrência de árvores é controlada principalmente pela disponibilidade de água (Pallardy, 2010). A disponibilidade hídrica regula processos como transporte e a translocação de solutos, a turgescência celular, a abertura e fechamento dos estômatos e a penetração do sistema radicular no solo (Martínez-Vilalta et al., 2017; Wu et al., 2019; Cordeiro et al., 2020). As diferenças entre a perda e absorção de água formam um gradiente de pressão das raízes até as folhas, sendo a transpiração a força motriz deste movimento (Kunert et al., 2017). Devido a essas características, o teor de água na biomassa de tecidos não lenhosos, como folhas e raízes, é cerca de 70-95% (Lambers et al., 2008). Nesse sentido, a floresta atua tanto como um estoque de água como também um agente de troca com a atmosfera através da evapotranspiração, mecanismo no qual já foi batizado por estudos anteriores como “bomba biótica” (Makarieva e Gorshkov, 2007). Atualmente, estima-se que na Amazônia uma única árvore é capaz de trocar com a atmosfera até 180 L de água por dia (Spanner et al., 2022).

As condições ambientais nas quais as plantas estão inseridas condicionam seu estado fisiológico (Osakabe et al., 2014). Na Amazônia Central, por exemplo, a posição topográfica (platô e baixio) é um fator que modula as estratégias hidráulicas ao nível de comunidade no qual as espécies de platô são mais adaptadas às condições de seca pois apresentam vasos do

xilema com menores diâmetros médios, menor área média de vasos e uma menor área de alburno da seção transversal do caule quando comparado com as espécies de baixo (Cosme et al., 2017; Costa et al., 2022; Fontes et al., 2020; Garcia et al., 2021). Além da posição topográfica, as variações diárias nas condições atmosféricas e ambientais também condicionam as estratégias hídricas das plantas, sendo um importante campo de pesquisa para a ecofisiologia e o sensoriamento remoto. Nas primeiras horas da manhã, por exemplo, quando o gradiente de potencial entre o solo e atmosfera estão em equilíbrio, o potencial hídrico foliar tende a ser mais próximo a zero. Isso ocorre de modo contrário em horários mais quentes, onde há maior demanda evaporativa e intensidade de luz, sendo o potencial hídrico foliar mais negativo (Fontes et al., 2018; Gimenez et al., 2019).

Além das condições ambientais, as características funcionais são importantes indicadores das estratégias de reprodução, sobrevivência e crescimento das plantas (Violle et al., 2007). No contexto das folhas, esses traços compõem o *espectro* de economia foliar que ser descrito como o balanço entre o custo de construção das folhas e o potencial de crescimento da planta (Díaz et al., 2016). Os principais traços do espectro de economia foliar são: massa foliar específica, área foliar específica, teores de nitrogênio (N) e fósforo (P) e taxas fotossintéticas (Wright et al., 2004; Thomson et al. 2018). As variações na massa foliar específica, por exemplo, pode estar associada a gradientes de estresse hídricos, onde a diminuição do potencial hídrico foliar impõe uma redução da turgescência celular, resultando em folhas com células mais compactadas e conseqüentemente com maior massa (Garcia et al., 2021). Esta variabilidade de traços foliares também pode estar associada a outra característica funcional importante: a densidade da madeira, apesar desta não estar associada à eficiência no uso da água ao nível foliar (Lamour et al, 2023). A densidade da madeira é uma propriedade biofísica, refletindo os trade-offs de aquisição e conservação dos recursos da planta como um todo (Chave et al., 2009). Portanto, na Amazônia, é essencial considerar alguns traços funcionais chave, incluindo a densidade da madeira, em estudos de ecofisiologia vegetal.

Apesar da importância dos traços funcionais para os estudos de ecofisiologia, esses estudos demandam um grande número de amostras e/ou características avaliadas, por vezes demorados, além disso, na maioria das vezes destroem as amostras que impedem uma releitura dos dados. Nesse contexto, é interessante o uso de métodos não destrutivos que proporcionam uma leitura rápida e de qualidade, como a espectroscopia. A espectroscopia do visível ao infravermelho (VIS-NIR) é uma das tecnologias que apresenta alto potencial para obtenção de

informações sobre a vegetação (Asner et al., 2014; Serbin et al., 2012). As medidas usando a tecnologia VIS-NIR podem ser realizadas de modo remoto (utilizando sensores acoplados a drones e satélites em órbita, por exemplo) (Wang et al., 2022), ou por meio de câmeras instaladas em torres de fluxo (Wu et al., 2016; Moura et al., 2017; Wang et al., 2020), além de outras abordagens tais como a utilização de um analisador de espectroscopia, em laboratório, usando a técnica *Fourier Transform Near-Infrared (FT-NIR)* (Durgante et al., 2013) ou com medidas diretas feitas em campo utilizando equipamentos portáteis como o ASD fieldspec (Hadlich et al., 2018), sendo o mesmo equipamento usado por este estudo.

Estudos recentes demonstram o potencial desta abordagem de medidas diretas nas folhas a fim de se compreender uma ampla gama de atributos fisiológicos (Lamour et al., 2021; Wu et al., 2019; Doughty et al., 2020) e morfológicos (Serbin et al., 2019; Ely et al., 2019; Silva-Perez et al., 2018; Chavana-Bryant et al., 2019). Além disso, a integração dos dados de espectroscopia foliar com outras técnicas de sensoriamento remoto, como os índices de vegetação, podem explorar com mais detalhes a resposta espectral das plantas (Cao et al., 2015). Logo, a espectroscopia de folhas se torna uma ferramenta valiosa para compreensão dos processos biológicos que afetam as plantas.

Nesse sentido, considerando a importância da água para manutenção das florestas tropicais, é de fundamental importância entender como a resposta espectral da vegetação pode fornecer informações sobre seu status hídrico e como isso pode variar entre as espécies. Dessa forma, o presente trabalho tem como base as seguintes perguntas: i) Qual influência da densidade da madeira nos traços funcionais foliares ii) Como a variação no espectro de densidade da madeira pode influenciar no status hídrico e nos padrões de reflectância espectral foliar? iii) Quais comprimentos de ondas estão mais relacionados aos traços funcionais foliares de espécies com diferente densidade da madeira? iv) Quais índices de vegetação estão mais associados com os traços funcionais foliares de espécies com diferentes densidade da madeira?

2. Objetivos

Geral

Investigar a relação entre o status hídrico e a reflectância espectral foliar de espécies arbóreas com diferentes traços funcionais (tendo como foco principal o espectro de densidade da madeira) em uma área de platô na Amazônia Central.

Específicos

- Testar o efeito da densidade da madeira nas características funcionais foliares das espécies.
- Descrever o efeito da densidade da madeira e do status hídrico na reflectância espectral foliar de diferentes espécies.
- Identificar quais comprimentos de onda estão mais relacionados com os traços funcionais foliares de espécies com diferentes densidades da madeira.
- Relacionar índices de vegetação com os traços funcionais foliares de espécies com diferentes densidades da madeira.

3 Referencial Teórico

3.1 A Floresta Amazônica

A Bacia Amazônica abrange nove países da América do Sul sendo estes: Peru, Colômbia, Venezuela, Equador, Bolívia, Guiana, Suriname, Guiana Francesa e o Brasil. O território brasileiro concentra a maior proporção, abrangendo os estados Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Roraima, Rondônia e partes dos Estados do Maranhão, Mato Grosso e Tocantins (Ribeiro et al., 1999) Estima-se que originalmente a Amazônia brasileira recobria uma área de 4 milhões de km², porém nas últimas décadas perdeu cerca de 16 % desse valor pelo desmatamento (Almeida et al., 2004).

Na faixa tropical do globo terrestre a Amazônia representa um terço das florestas tropicais, o que a torna um bioma importante para o balanço energético da Terra (Thompson et al., 1996; Chambers et al., 2002). Entre os principais serviços ecossistêmicos fornecidos pelas florestas tropicais, estão a regulação dos ciclos da água, carbono e fluxo de energia. Na Amazônia Central, por exemplo, estima-se que em média a biomassa de uma árvore é composta por 40% de água e 50% de carbono (Silva, 2007). Neste contexto, são essenciais estudos busquem entender estes mecanismos e processos, e principalmente suas implicações no manejo e conservação destes ecossistemas.

Dado as suas proporções continentais, a Amazônia representa um importante papel na interação entre a atmosfera e a biosfera. No entanto, estudos apontam que estas florestas são sensíveis ao aumento de temperatura, mudanças nos regimes de precipitação e alterações na disponibilidade da água (Malhi et al., 2008; Phillips et al., 2008). Com a intensificação de eventos climáticos extremos, como por exemplo o El Niño, somados a ações antrópicas, o processo de captura de CO₂ pelas florestas tropicais pode ser alterado, passando da função de dreno para fonte emissora de carbono (Brien et al., 2015; Chambers et al., 2004; Gatti et al., 2021). Esse declínio na captura de CO₂ pode aumentar a taxa de mortalidade de árvores devido à mecanismos de “morte pela fome” e falha hidráulica (McDowell et al., 2008; Rowland et al., 2015), contribuindo com mais emissões de gases do efeito estufa (Fearnside, 2008). Esse

processo provoca uma retroalimentação positiva, onde há cada vez mais aquecimento e mais mortalidade de árvores (Fearnside, 2008). Em vista disso, ainda existem grandes desafios para se desvendar os complexos mecanismos que regulam os ecossistemas tropicais, além de compreender o papel das florestas nos ciclos do carbono e da água. Portanto, compreender as respostas fisiológicas das espécies vegetais a diferentes condições ambientais é fundamental para melhorar as previsões climáticas globais e reduzir as incertezas dos modelos climáticos.

3.2 A dinâmica da água nas plantas

A água desempenha papel crucial na vida das plantas, sendo um recurso primordial para o crescimento e formação de novos tecidos (Meinzer et al., 2004). Os principais processos fisiológicos das plantas necessitam de água para ocorrer, o que provoca alta demanda por este recurso. Além disso, a disponibilidade hídrica é responsável por controlar a produtividade dos ecossistemas naturais, promovendo diferenças na vegetação ao longo de gradientes de precipitação na superfície terrestre (Taiz e Zeiger., 2009). Assim, é fundamental compreender como as diferentes condições ambientais afetam o status hídrico da planta, além das variações diárias e sazonais em termos do regime de precipitação e temperatura.

As plantas possuem um sistema eficiente de condução de água, no qual é absorvida pelo sistema radicular, e conduzida pelo xilema da raiz até as folhas. Essa movimentação ocorre por um gradiente de potencial, onde a água flui de regiões de alto potencial para uma com baixo potencial, num processo conhecido como Teoria da Coesão-Tensão-Adesão (Dixon e Joly, 1895). As propriedades físico-químicas da água como a polaridade e a capacidade formar pontes de hidrogênio, juntamente com a tensão e adesão gerada pelo efeito capilar dos elementos de vasos, formam o *continuum solo-planta-atmosfera*, sendo a transpiração o fenômeno responsável por controlar este processo (Lambers et al., 2008). Assim, a dinâmica da água na planta reflete as condições ambientais nas quais estas estão inseridas (Damm et al., 2018). Em situações de déficit hídrico, por exemplo, as plantas fecham seus estômatos para evitar a perda excessiva de água, o que implica na redução da captura de CO₂, forçando a utilização do O₂ como substrato em um processo conhecido como fotorrespiração (Alberts et al., 2010). No contexto de mudança do clima, conhecer todos os componentes que regulam as relações hídricas das plantas, é essencial para melhorar a representação da água nos modelos climáticos.

A determinação dos status hídrico de uma planta está relacionado a um conjunto de parâmetros, incluindo o potencial hídrico foliar. O potencial hídrico é uma medida da energia livre na planta, estando relacionado a processos como as reações bioquímicas, acúmulo de solutos e o transporte por longa distância que são movidos por um aporte de energia livre (Taiz e Zeiger., 2009). Este potencial pode ser medido por meio de experimentos, como por exemplo, a bomba de Scholander. Esta técnica mede o potencial pela aplicação da pressão externa de um gás em folha excisada até que a água seja forçada a sair das células vivas (Scholander et al., 1965). Os valores de potencial hídrico podem fornecer diversas informações no quais: potenciais próximos a zero significam pouca perda de água (baixo gradiente de potencial entre o solo e as folhas) e valores mais negativos significam muita perda de água (alto gradiente de potencial entre o solo e as folhas) (Jarvis, 1976).

Além do potencial hídrico foliar, uma outra medida importante como indicador do estado fisiológico de uma planta é o conteúdo de água foliar. Este parâmetro é utilizado para representar a proporção entre a matéria seca e a água na folha, além de ser um indicador da tolerância das plantas a condições de déficit hídrico (Wang et al., 2021; ARNDT et al, 2015). Valores altos de conteúdo de água foliar estão associados a situações de equilíbrio entre o gradiente de pressão da folha e a atmosfera, ou seja, com as células completamente hidratadas, enquanto valores mais baixos representam um alto gradiente de troca entre planta e a atmosfera (Damm et al., 2018).

3.4 Espectroscopia

A espectroscopia é uma técnica que se baseia na detecção de radiação eletromagnética refletida, emitida ou espalhada por um material em comprimentos de ondas específicos (Pasquine, 2003). O registro da interação da luz com o material é realizado pelo espectrômetro, que é um equipamento que mede a intensidade de luz refletida e produz um espectro de reflectância ou absorvância. Este fenômeno está relacionado com a natureza das ligações químicas que formam os grupos funcionais, especialmente C-H, O-H, N-H, S-H e C=O (Pavia et al., 2014). Assim, ao entrar em contato com qualquer amostra orgânica a radiação provoca vibração das ligações químicas, causando alongamento e flexão das moléculas (Pasquine, 2003). As frequências de vibrações moleculares são expressas em termos de comprimento de onda (nm) ou número de ondas, dependendo da região do espectro eletromagnético (Figura 1) (Novo et al., 2001). As regiões do espectro mais utilizadas nas técnicas de sensoriamento

remoto são: visível (350-220 nm), infravermelho próximo (720-1.100 nm) e infravermelho médio (1.100-3.200 nm) (Ponzoni et al., 2012)

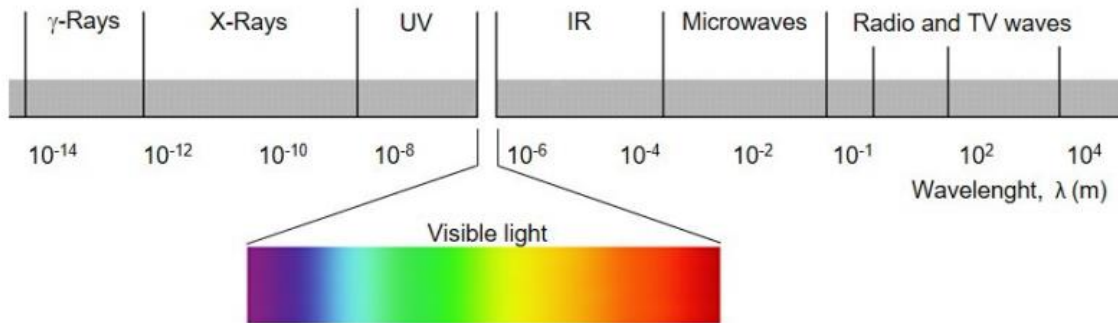


Figura 1. Espectro eletromagnético e suas principais regiões. Fonte: adaptado de Casimiro et al., 2019

A aquisição de dados de sensoriamento remoto depende do tipo de informação necessária, além do tamanho e da dinâmica dos objetos ou fenômenos estudados (Novo et al., 2001). Para isso é necessário a utilização de diferentes sensores, que são responsáveis por captar e registrar a radiação e gerar informações passíveis de interpretação (Moreira, 2001). Os sensores diferenciam entre si pela forma de funcionamento e resolução (espacial, espectral, radiométrica) (Novo et al., 2001) e de acordo com a fonte de radiação: passivo e ativo. Os sensores passivos são aqueles que medem a radiação refletida pelos alvos, que provém de uma fonte de iluminação externa, como o *leaf clip*, acessório de medir a reflectância que será utilizado neste trabalho (ASD Fieldspec 3). Os sensores ativos operam com sua própria fonte de luz (Moreira, 2001).

A utilização da espectroscopia do infravermelho próximo tem promovido avanços significativos no conhecimento das características físicas e biofísicas dos ecossistemas. Esta ferramenta permite o registro de espectro em uma ampla variedade de materiais sem a necessidade de preparação prévia da amostra. No contexto florestal, por exemplo, diversos trabalhos comprovam o potencial da espectroscopia para obter informações sobre as características ecológicas, químicas e fisiológicas das plantas (Durgante et al., 2011; Costa et al., 2018). Neste contexto, a utilização de métodos espectroscópicos rápidos permite executar maior número de medições e cobrir regiões geográficas mais amplas.

3.5 Espectroscopia aplicada à vegetação

O sinal radiométrico da vegetação, captado por sensores remotos, é resultado de uma complexa interação entre fatores bioquímicos e físicos (Jensen, 2000). Essa radiação é formada por um conjunto de partículas (chamada de *quanta* ou fótons), diferindo entre si em relação comprimento de onda (λ) e quantidade de energia (Jacquemoud et al., 1996;). A folha é o principal elemento da vegetação quando se considera o processo de interação com a radiação eletromagnética (Gausman, 1974). O resultado deste processo são os fenômenos de absorção, reflexão e transmissão. A absorção está relacionada com a energia que é absorvida pelo pigmento das folhas para realização da fotossíntese. A reflexão é a parte da energia que não é absorvida pela planta. Finalmente, a radiação pode vir a atravessar a folha além de se espalhar pelas camadas internas, em um processo denominado de transmissão (Ponzoni et al., 2012).

O comportamento espectral de uma folha é função da sua composição, idade, morfologia e de sua estrutura interna (Peñuelas, 1998). As folhas são formadas por três tecidos básicos: epiderme, mesófilo fotossintético e tecidos vasculares (xilema e floema). Essa rede de tecidos do sistema vascular supre a folha com água e nutrientes do solo e constitui o local de passagem da radiação pela folha (Ollinger et al, 2010). Assim, essas diferenças morfológicas e químicas da estrutura foliar, tendem a alterar a trajetória do feixe de radiação incidente à medida que esse feixe se translada de um meio para o outro (Ponzoni et al., 2012) (Figura 2). Essas variações ocorrem entre espécies diferentes e até em indivíduos de uma mesma espécie que se desenvolveram em condições ambientais distintas.

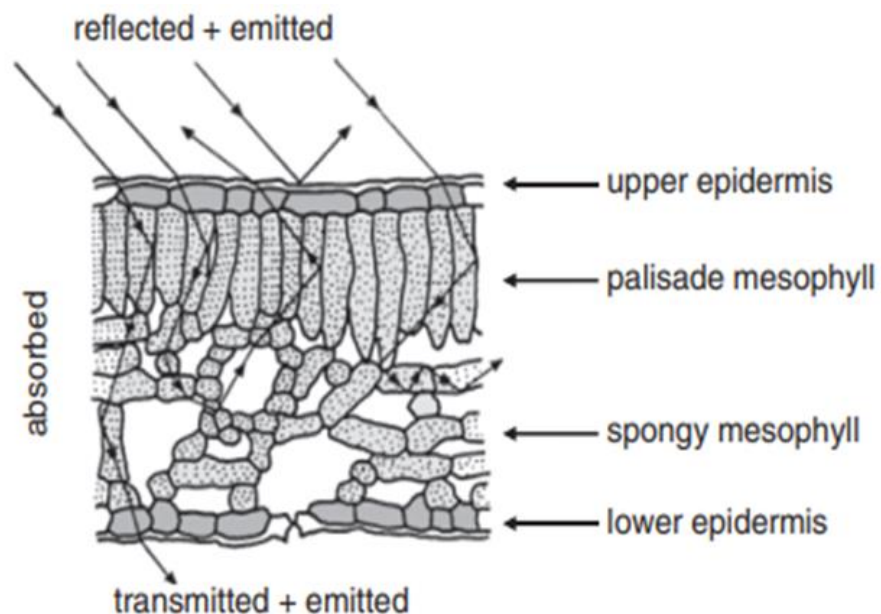


Figura 2. Seção transversal de uma folha com as possíveis trajetórias da radiação eletromagnética incidente. Fonte: Jacquemond e Ustin, 2019

A curva de reflectância de uma folha fornece diversas informações sobre suas características físico-químicas (Figura 3). Essa curva descreve como cada região do espectro interage com a radiação (Figura 3), podendo ser descrita conforme a seguir:

I) região do visível (0,4-0,72 μm): nesta região os pigmentos existentes nas folhas definem a curva de reflectância espectral. A reflectância nesta região é menor, uma vez que as plantas absorvem a radiação incidente para realizar a fotossíntese (Ponzoni et al., 2012).

II) região infravermelho próximo (0,72-1,1 μm): nessa região a absorção de energia é baixa, ocorrendo maior espalhamento interno da radiação. A anatomia foliar possui grande influência nesta região, uma vez que a reflectância é o resultado da interação da energia com a estrutura do mesófilo (Ponzoni et al., 2012).

III) região do infravermelho médio (1,1-3,2 μm): esta região é altamente correlacionada com o teor de água na planta. À medida que o conteúdo de água reduz, a reflectância aumenta, causando uma suavização das feições de absorção da curva (Ponzoni et al., 2012).

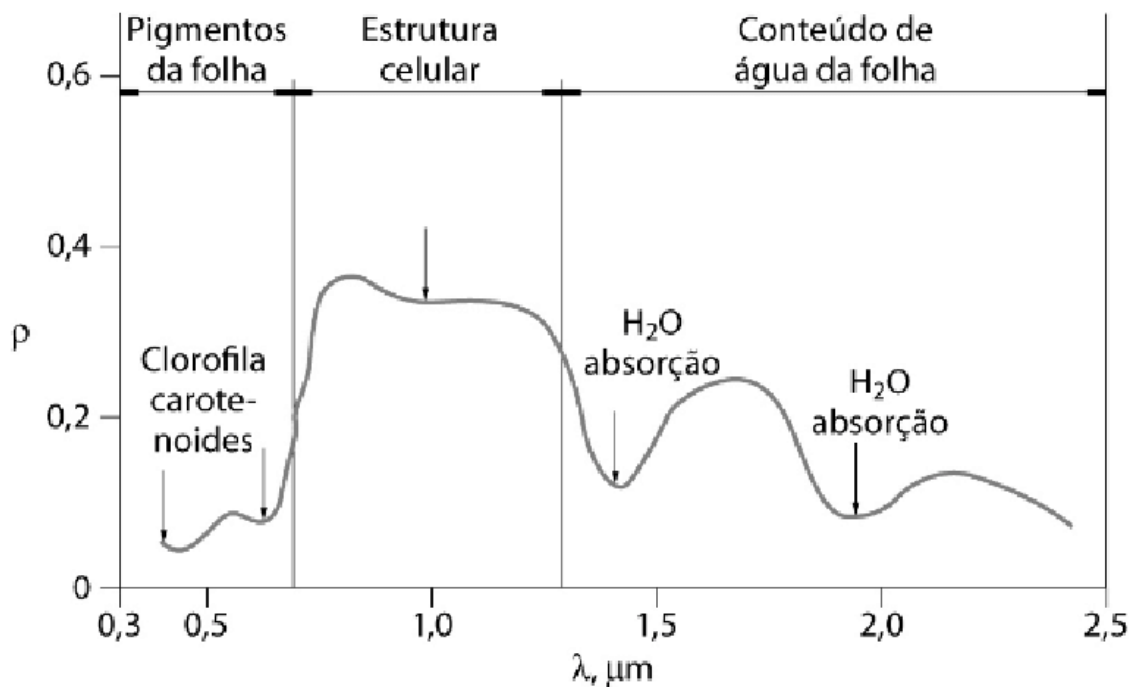


Figura 3. Exemplo de uma curva de reflectância típica de uma folha verde. Fonte: Ponzoni et al (2012)

Entre os elementos que constituem uma folha, a água é um dos mais correlacionado com o espectro de reflectância. As feições de absorção de água dominam a região compreendida entre 1.300 e 2.500 nm (Figura 3), sendo resultado das vibrações de dobramento e estiramentos das ligações de O-H da água e de outros componentes químicos (Dank et al., 1984). Os efeitos diretos da água no espectro de reflectância, aqueles causados pela absorção de água, incluem influência mais forte na região de 1.450 e 1.950 nm. Enquanto os efeitos indiretos, associados a outras propriedades que mudam com o teor de água, refletem 720 e 1.100 nm (Ollinger, 2010; Carter, 1991). Em situações de déficit hídrico, por exemplo, onde as estruturas internas da folha sofrem alterações na sua disposição devido a perda de turgor, os padrões de reflectância foliar são diretamente afetados (Peñuelas et al., 1998; Peñuelas et al., 1993). Assim, considerando a importância da água para manutenção das comunidades vegetais e sua relação com o espectro de reflectância foliar, a espectroscopia é uma alternativa promissora para monitorar a dinâmica da água na vegetação.

4. Material e Métodos

4.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Silvicultura Tropical (E.E.S.T – ZF-2) pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), localizada a 90 km a noroeste de Manaus – AM, Brasil (coordenadas geográficas 2°38'380" S e 60°09'499" O). O acesso é feito pela rodovia federal BR-174 (Manaus-Boa Vista) até o km 934 e, posteriormente, pela vicinal ZF-2. A estação possui área total de 21.000 hectares, coberta por floresta tropical úmida de terra firme (Higuchi et al., 1997).

Na ZF-2 o estudo foi conduzido na área de monitoramento da dinâmica florestal com parcelas permanentes do projeto BIONTE (Biomassa e Nutrientes Florestais) (Figura 4) iniciado em 1987 e que compreende uma área de 72 ha. A área do Bionte foi delineada com quatro tipos de tratamentos experimentais com diferentes intensidades de exploração. O experimento é composto por uma testemunha (T0), exploração seletiva de 1/3 da área basal comercial (T1), exploração de 50% da área basal (T2) e exploração de 2/3 da área basal (T3) (Amaral et al., 2019). No centro de cada tratamento foi instalada uma parcela permanente de 100 x 100 m, que tem sido monitorada anualmente desde os primórdios do projeto (Higuchi et al., 1997). Nesse sentido, devido à exploração seletiva, o projeto BIONTE possui uma grande variedade de espécies com diferentes traços funcionais e com uma ampla variação no espectro de densidade da madeira composta por espécies pioneiras e clímax (Gauí et al., 2019).

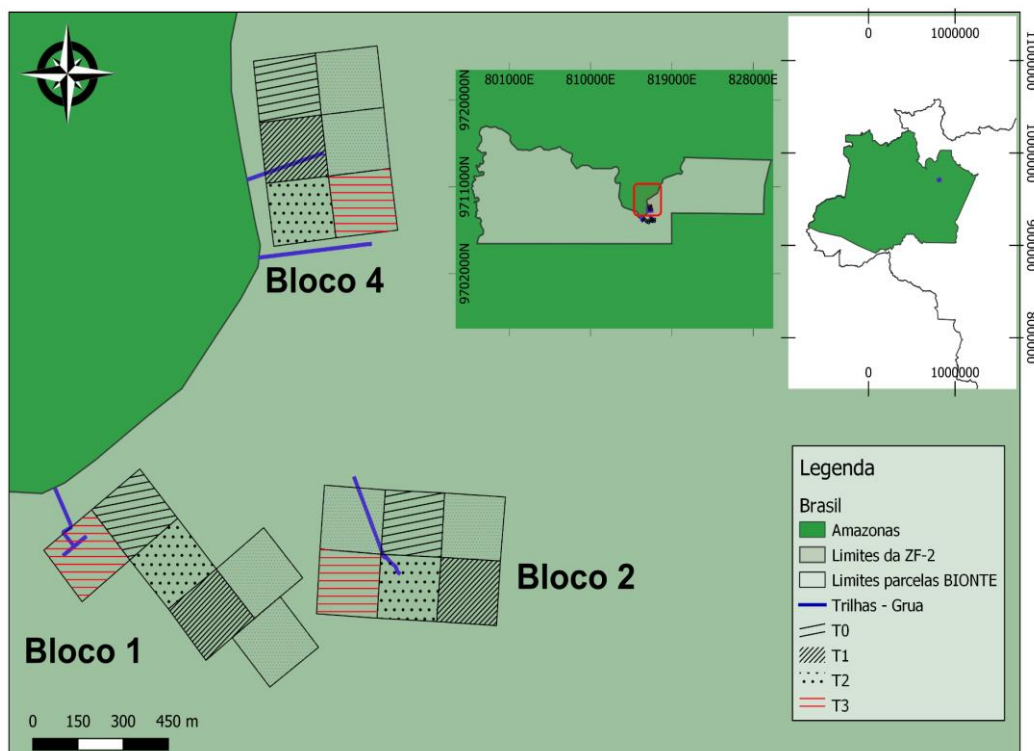


Figura 4. Mapa de localização da área de estudo (projeto Bionte) na E.E.S.T. – ZF-2.

O clima da região é classificado como tropical chuvoso, quente e úmido durante todo o ano (Kottek. et al., 2006). A temperatura média é de 26,7° C, variando entre 19 °C e 39 °C (Kottek. et al., 2006). A precipitação média anual está entre 1.800 e 2.800 mm, com chuvas distribuídas em dois períodos bem definidos. A estação seca ocorre entre Julho e Outubro, quando é verificada precipitação inferior a 100 mm por mês (TOMASELLA et al., 2008); e uma estação chuvosa de novembro a junho (TOMASELLA et al., 2008). O relevo é levemente ondulado, caracterizado por uma extensa rede de drenagem. A vegetação é classificada como floresta densa ombrófila densa de terra firme ocorrendo no platô, vertente, e baixio (Gauí, 2013). Nos platôs os solos são argilosos, e ao longo do gradiente topográfico varia até a textura arenosa, presente nos baixios (Ferraz et al., 1998). As parcelas do BIONTE estão todas localizadas em uma área de platô.

4.2 Descrição do experimento

4.2.1 Espécies estudadas

Neste trabalho, foram escolhidas 14 árvores, distribuídas em 14 espécies e 11 famílias botânicas (Tabela 1), sendo 6 espécies de baixa densidade e 8 de alta densidade da madeira. O critério adotado para seleção das árvores foi a facilidade de acesso à copa de cada árvore a partir das trilhas de acesso da grua (Figura 4), além dos traços funcionais de cada espécie (seguindo um gradiente de densidade da madeira). O acesso às copas dos indivíduos selecionados foi realizado com o auxílio de uma grua (modelo Genie Z80/60) (Figura 5) com alcance vertical de 26 m, que permite o acesso às copas da maioria das espécies que ocorrem na ZF-2 (altura média entre 30-35 m) (Suwa et al., 2013). O cesto da grua, onde estão localizados os comandos, contém um espaço suficiente para transportar duas pessoas e equipamentos até alturas elevadas (Figura 5(A)).

Tabela 1. Espécies selecionadas por este estudo com os seus respectivos nomes científico, família botânica, densidade da madeira, diâmetro a altura do peito, classe de densidade e incremento médio anual.

N	Espécie	Família	Densidade da madeira (g/cm ³)	DAP (cm)	Classe de densidade	Incremento médio anual (mm)
1	<i>Geissospermum argenteum</i> Woodson	Apocynaceae	0.85	77.6	Alta	1.4
2	<i>Pourouma guianensis</i> Aubl	Urticaceae	0.34	33.1	Baixa	5.4
3	<i>Lecythis prancei</i> S.A. Mori	Lecythidaceae	0.85	56.1	Alta	1.6
4	<i>Cecropia sciadophylla</i> Mart	Urticaceae	0.32	22.1	Baixa	2.3
5	<i>Ocotea floribunda</i> (Sw.) Mez	Lauraceae	0.46	15.1	Baixa	5.9
6	<i>Swartzia arborescens</i> (Aubl.) Pittier	Fabaceae	0.97	27.7	Alta	0.5
7	<i>Vismia</i>	Hypericaceae	0.49	14.9	Baixa	4.3

	<i>guianensis</i> (Aubl.) Pers					
8	<i>Miconia .</i> <i>minutiflora</i> (Bonpl.) DC.	Melastomataceae	0.65	22.5	Alta	4.8
9	<i>Duckeodendron</i> <i>cestroides</i> Kuhl	Solanaceae	0.62	62.5	Alta	3.6
10	<i>Qualea</i> <i>paraensis</i> Ducke	Vochysiaceae	0.66	53.9	Alta	5.1
11	<i>Iryanthera</i> <i>elliptica</i> Ducke	Myristicaceae	0.6	38.6	Alta	1.3
12	<i>Protium</i> <i>tenuifolium</i> Engl	Burseraceae	0.58	28.2	Baixa	2.2
13	<i>Tachigali</i> <i>paraensis</i> (Huber) Barneby	Fabaceae	0.49	74	Baixa	4.3
14	<i>Inga</i> <i>splendens</i> (Pittier) Ducke	Fabaceae	0.66	18	Alta	3.8

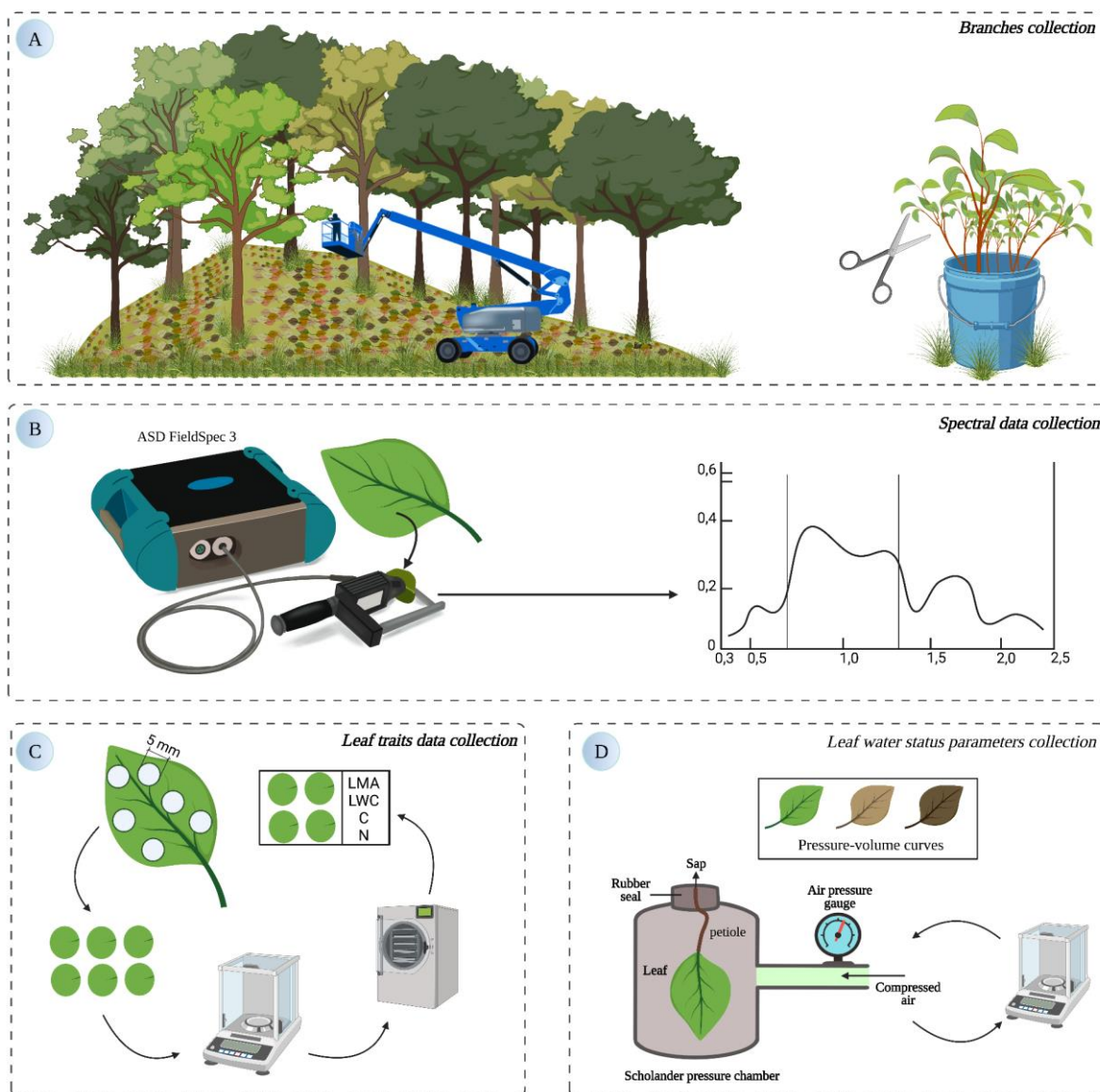


Figura 5. Figura ilustrativa detalhando a metodologia do presente estudo. **(A)** Coleta de material botânico em campo (BIONTE) utilizando a grua; **(B)** Leituras espectrais das folhas das espécies selecionadas utilizando o equipamento ASD Fieldspec 3; **(C)** Medida dos traços funcionais foliares; **(D)** Medidas de potencial hídrico foliar e curvas pressão-volume.

4.2.2 Coleta de dados espectrais utilizando o espectrorradiômetro (ASD FieldSpec 3)

As leituras espectrais das folhas foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro ASD FieldSpec 3 (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO, USA) (Figura 6), conectado a uma unidade detectora denominada leaf clip. Este equipamento é portátil, robusto e compacto, sendo

ideal para a utilização em campo. Os espectros deste equipamento cobrem uma região 350-2500 nm do espectro de luz, que vai do visível até o infravermelho próximo. O tempo médio de coleta de dados em nível foliar é de 0,1 segundos. No momento da leitura o ASD FieldSpec é conectado a um laptop e a leitura do espectro é feita por meio do software Indico Pro. A resolução espectral é de 3 até 700 nm e 10 até 2.100 nm sendo o intervalo de 1,4 nm para a região de 350-2.100 nm e 2 nm para a região de 1.000-2.500 nm.



Figura 6. Fotografia do equipamento ASD FieldSpec 3 utilizado por este estudo.

Para cada leitura espectral do material vegetativo, foi conectado uma folha ao “*leaf clip*” do espectrorradiômetro. A cada leitura foi realizada a calibração em fundo branco, sendo a referência para configurar a linha de base onde há 100% de reflectância. Cada folha foi posicionada no orifício do *leaf clip* com sua face adaxial voltada para o sensor, sendo realizada entre 3 e 4 medidas de reflectância em áreas diferentes da lâmina foliar. Os espectros gerados foram armazenados no computador e posteriormente processados no software IndicoPro.

4.2.3 Curvas de Pressão-Volume

Em paralelo às leituras espectrais, foram obtidas curvas de pressão-volume (P-V) para as espécies em estudo, com o propósito de avaliar a resposta espectral das plantas em diferentes estágios de hidratação das folhas. As curvas de pressão-volume foram realizadas utilizando a

técnica de secagem em bancada, conforme descrita por Turner (1988) e Sack et al. (2003), com a utilização de três folhas por espécie. Os ramos foram coletados antes do amanhecer para assegurar a plena hidratação. Logo em seguida, foram imersos em baldes de água, e o galho principal cortado embaixo da água com uma tesoura de poda a fim de se restabelecer o potencial hídrico e evitar a entrada de ar e consequente cavitação dos vasos. Uma vez coletados, os ramos com parte do seu tecido condutivo imerso na água foram transportados da ZF-2 para o laboratório de manejo florestal, na cidade de Manaus, devido ao suprimento de energia ilimitada e condições de temperatura controladas. No laboratório, os galhos principais foram novamente cortados embaixo da água para restabelecer o potencial hídrico foliar. Foram realizadas medições consecutivas do potencial hídrico (MPa) e da massa foliar (g) nas folhas previamente selecionadas (sadias e sem nenhum sinal de herbivoria). Esse processo de medição foi repetido até que um potencial de aproximadamente -4 MPa fosse atingido. As medições do potencial hídrico foram conduzidas utilizando uma bomba de pressão (também conhecida como Câmara de Scholander) modelo 1000 da PMS Instrument Company®, e posteriormente pesadas em uma balança analítica com uma precisão de 0,01 g. Após a conclusão das medidas, as amostras foram secadas em estufa a 60°C por um período de 72 horas para determinação da massa seca. Para determinar o Ponto de Perda de Turgor (TLP) para cada espécie, as curvas foram ajustadas individualmente para cada folha utilizando o pacote "Plant_Ecophysiology_Tools" do software R (Development Core Team), e calculou-se a média desta medida para cada espécie. As leituras espectrais foram obtidas durante a desidratação progressiva, considerando-se o estágio túrgido como a primeira medição, quando a folha estava hidratada; o estágio úmido, quando o potencial hídrico atingiu cerca de -2 MPa, indicando hidratação intermediária; e o estágio seco, a última medição, quando o potencial estava próximo a -4 Mpa.

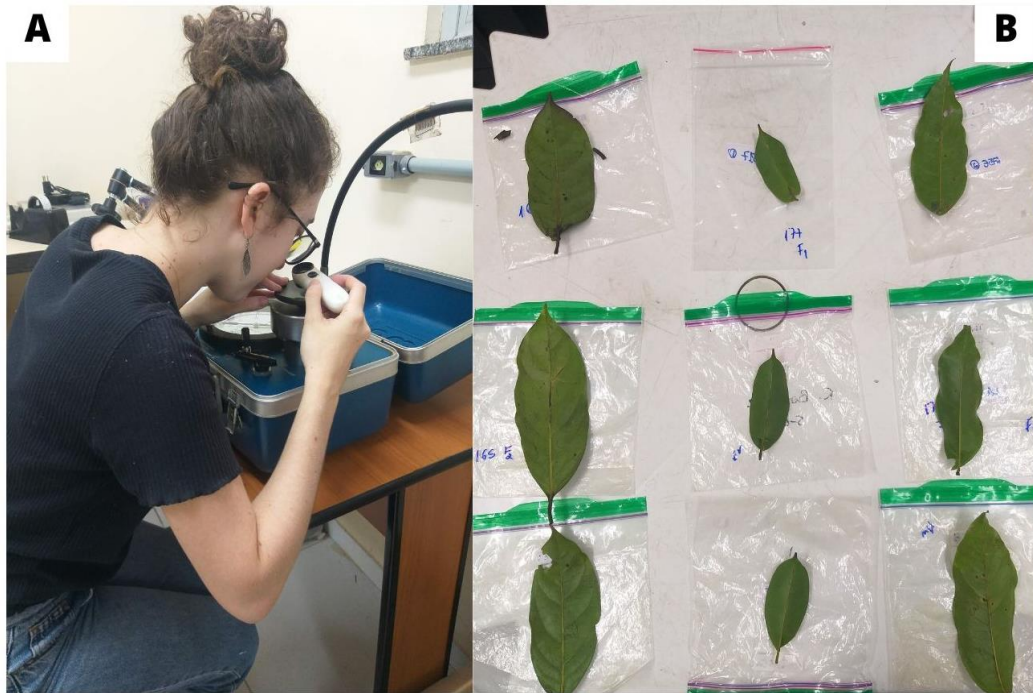


Figura 7. Medidas da curva de pressão-volume. (A) Medida de potencial hídrico foliar utilizando a Bomba de Scholander; (B) Secagem das folhas pela técnica de secagem em bancada.

4.3 Traços foliares funcionais

4.3.1 Conteúdo de água da folha

Além das folhas utilizadas para a realização das curvas de pressão-volume, foram coletadas outras três folhas do mesmo ramo para mensurar o conteúdo de água foliar. Nestas folhas também foram realizadas leituras espectrais e obtidos discos foliares de área conhecida utilizando um perfurador. A partir dos discos, foi obtido o peso fresco e posteriormente, estes foram secados em estufa a 60° C até a obtenção da massa constante (massa seca). O conteúdo de água da folha foi calculado conforme a equação (1):

$$(2) CA = \frac{\text{massa fresca (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa fresca}} * 100$$

4.3.2 Massa foliar específica

As amostras de folhas utilizadas para obter o conteúdo de água foliar, também serão utilizadas para obter a massa e área foliar específica. A razão entre a massa e área foliar fornecem a massa foliar específica (MFE g m²) e a razão entre a área e massa foliar fornecem a área foliar específica (AFE m² g m⁻²), segundo as equações (2 e 3), respectivamente:

$$(2) MFE = \frac{\text{massa seca (g)}}{\text{área (m}^2\text{)}}$$



Figura 8. Pesagem dos discos foliares para obtenção dos traços funcionais foliares

4.3.3 Teor de Nitrogênio

O teor de nitrogênio foi determinado a partir das amostras secas dos discos foliares. Em laboratório, estas amostras foram moídas em um moinho de bolas e posteriormente inseridas no Analisador elementar Perkinermer 2400 series-II CHNS/O. Este equipamento utiliza o

comprimento de onda do infravermelho através da absorção catalítica para determinar os teores de nutrientes. O teor de nitrogênio foi então com base na área.

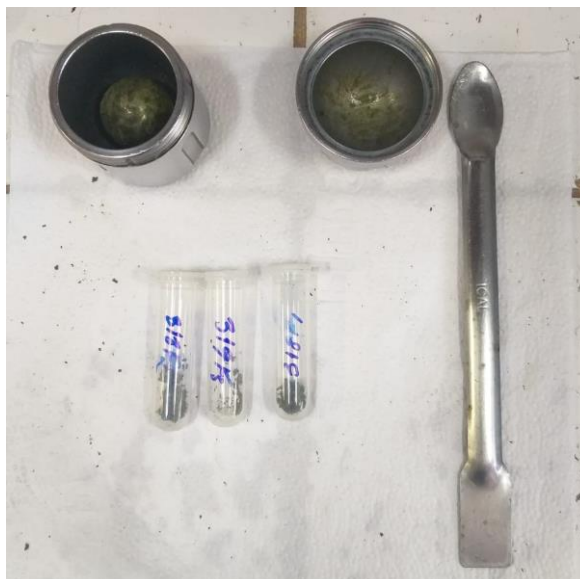


Figura 9. Amostras de folhas moídas para análise do teor de nitrogênio.

4.4 Densidade da madeira

A densidade da madeira foi calculada a partir de segmentos dos galhos (2-4 cm de diâmetro), utilizando a razão entre a massa secada e volume saturado (Williamson and Wiemann, 2010). Para garantir a saturação completa, os galhos tiveram a casca removida e foram submersos por 20 dias. O volume saturado foi medido pelo método do deslocamento da água. Posteriormente, as amostras foram secadas em estufa a 105°C até a obtenção do peso constante. As espécies foram agrupadas em classes de densidade da madeira alta ($> 0.6 \text{ g/ cm}^3$) e baixa ($< 0.6 \text{ g/ cm}^3$).

5. Índices de vegetação

Foram selecionados 10 índices espectrais encontrados na literatura que já foram apontados como sensíveis aos diferentes traços funcionais foliares. Com base nos dados de reflectância coletados para as diferentes espécies, foram realizados os cálculos dos índices

citados na tabela abaixo para as classes de densidade da madeira alta e baixa, de acordo com suas respectivas fórmulas descritas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Índices de vegetação utilizados por este estudo para relacionar com traços funcionais foliares de cada grupo. λ = comprimento de onda selecionado

Índice	Símbolo	Equação	Referência
Water index	WI	$\lambda 900/\lambda 970$	Peñuelas et al., 1997
Moisture Stress index	MSI	$\lambda 1650/\lambda 1820$	Hunt & Rock, 1989
Normalised difference Water Index	NDWI	$(\lambda 860-\lambda 1240)/$ $\lambda 860+\lambda 1240)$	Gao, 1996
Normalized Difference Infrared Index	NDII	$(\lambda 819-\lambda 1600)/$ $\lambda 819+\lambda 1600)$	Hardisky et al.,1983
Leaf Chlorophyll Index	LCI	$(\lambda 850-\lambda 710)/$ $\lambda 850+\lambda 680)$	Datt, 1999
Red Edge NDVI	reNDVI	$(\lambda 750-\lambda 710)/$ $\lambda 750+710)$	Gitelson & Merzlyak, (1994)
Physiological Reflectance Index	PRI	$(\lambda 550-\lambda 530)/$ $\lambda 550+530)$	Peñuelas et al.,1994
Normalized Difference LMA	NDLMA	$(\lambda 1340-\lambda 1710)/$ $\lambda 1340+1710)$	Le Maire et al.,2008
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(\lambda 800-\lambda 680)/$ $\lambda 800+680)$	Tucker, 1979
Normalized Difference Nitrogen Index	NDNI	$(\log (1/\lambda 510)-$ $\log(1/\lambda 680))/$ $\log (1/\lambda 510)-$ $\log(1/\lambda 680)$	Serrano et al.,2002

6. Análise de dados

O pré-tratamento dos dados espectrais coletados foram realizados utilizando o software IndicoPro. Os espectros foram analisados, e os comprimentos de ondas iniciais e finais removidos, buscando reduzir os ruídos, onde optou-se por focar nos espectros entre 500-2.400 nm. As inferências dos resultados foram descritas com base nas recomendações do IPainel Intergovenamental de Mudanças Climáticas (IPCC), segundo Mastrandrea et al. (2010). As análises estatísticas foram realizadas com o software R (Development Core 0Team). Para atender os objetivos deste trabalho foram realizadas as seguintes análises:

I) Comparação de média

Para avaliar a influência da densidade da madeira nos traços foliares, foi realizado teste de comparação de médias. A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk. As variáveis que seguiram a normalidade foram aplicadas o teste t e as que não seguiram a normalidade foi utilizado o teste de Mann-Whitney

II) Análise descritiva

Foi realizada uma análise descritiva do comportamento espectral médio das espécies nos diferentes estágios de hidratação da curva pressão-volume, buscando entender como suas respostas espectrais variam ao longo do processo de desidratação. Para facilitar a interpretação dos resultados, os espectros foram agrupados de acordo com a densidade da madeira (alta e baixa) e também foram incluídas todas as espécies estudadas.

II) Correlações espectrais

A relação entre os traços foliares e comprimentos de ondas foi analisada por meio de uma matriz de correlação de Pearson. Para avaliar a relação entre os índices de vegetação e os traços funcionais foliares também foi utilizada esta análise. Essa análise avalia a afinidade de entre as variáveis, indicando o comportamento de uma em relação a outra, variando de -1 a +1. Valores positivos indicam que as variáveis são diretamente proporcionais e valores negativos uma relação inversamente proporcional. Quanto mais próximo +1 ou -1, mais forte é a correlação. Neste trabalho, as correlações espectrais buscaram identificar quais comprimentos de ondas dos espectros de reflectância são melhor correlacionados com os traços foliares.

7. Resultados

7.1 Influência da densidade da madeira nos traços funcionais foliares

Em relação aos efeitos da densidade da madeira nos traços funcionais foliares, observou-se que para massa foliar específica é improvável que exista diferença (alta densidade = $101,57 \pm 32,06$; baixa densidade = $114,05 \pm 7,57$), para o conteúdo de água da folha é muito improvável diferenças (alta densidade = $39,74 \pm 11,51$; baixa densidade = $38,07 \pm 11,11$), para o ponto de perda de turgor é provável a diferença (alta densidade = $-2,56 \pm 0,25$; baixa densidade = $-2,21 \pm 0,34$) e para teor de nitrogênio é improvável diferenças (alta densidade = $2,56 \pm 0,61$; baixa densidade = $2,15 \pm 0,53$) (IC 95%).

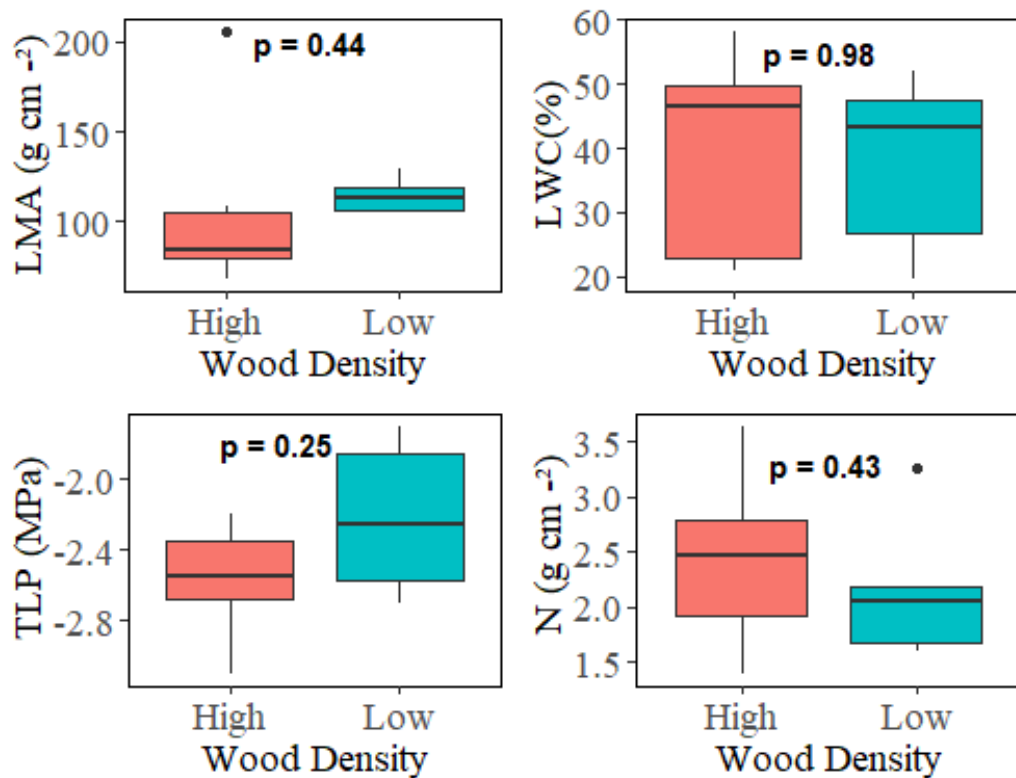


Figura 10. Box plot dos traços funcionais foliares analisados para cada grupo de densidade da madeira, sendo estes: massa foliar específica (LMA), conteúdo de água da folha (LWC), ponto de perda de turgor (TLP) e teor nitrogênio na folha (N). A linha horizontal dentro de cada caixa indica a mediana dos dados, a barra representa a variação de 50% dos dados, as linhas de erros são os percentis e os pontos redondos são outliers. (n alta densidade = 8; n baixa densidade = 6).

7.2 Efeitos do status hídrico foliar e da densidade da madeira no comportamento espectral das espécies

O comportamento espectral de uma planta é determinado pelas suas características fisiológicas, morfológicas e químicas. A Figura 11 apresentada abaixo representa a resposta espectral média das 14 espécies agrupadas em duas classes de densidade da madeira (alta e baixa) durante o processo de desidratação por meio da curva de pressão-volume. O painel A mostra os valores médios de reflectância das folhas no início da curva pressão-volume sendo estas em estado totalmente túrgido e hidratadas. Nesse painel, é possível observar uma elevada sobreposição de espectros para as duas classes de densidade (linhas vermelha e azul) além de todas as espécies juntas (linha preta), especialmente nos comprimentos de onda entre 500 - 1.440 nm. No entanto, a partir de 1.450 nm o comprimento de onda relacionado ao conteúdo de água da folha, tornam-se evidentes diferenças entre os valores de reflectância entre os grupos funcionais, sugerindo que a variação do conteúdo de água da folha está influenciando este comportamento.

No painel B, é possível observar a assinatura espectral das folhas ainda em estado úmido, mas já evidenciando uma redução no conteúdo de água da folha. Neste painel, também é possível observar um leve aumento da reflectância na região do infravermelho próximo, situado entre 1.100 - 2.400 nm, o qual pode estar relacionado a diminuição da absorção da radiação eletromagnética pela molécula de água já em menor conteúdo nas folhas.

O painel C apresenta a assinatura espectral dos grupos funcionais após as espécies terem perdido a turgescência das células devido a secagem. Nesse painel, é possível observar um aumento generalizado da reflectância em todos os comprimentos de ondas, o que possivelmente está associado à uma redução significativa da presença de água nas folhas, substância que tem efeito direto e indireto em todo o espectro eletromagnético. Além disso, neste painel é possível notar algumas alterações espectrais em comprimento de onda específicos. Na região do vermelho, por exemplo, entre 700 - 750 nm, os resultados revelaram que ocorreu uma deformação na curva de reflectância no grupo de baixa densidade da madeira. Um comportamento espectral parecido também foi observado nos comprimentos de onda entre 2.180 - 2.230 nm.

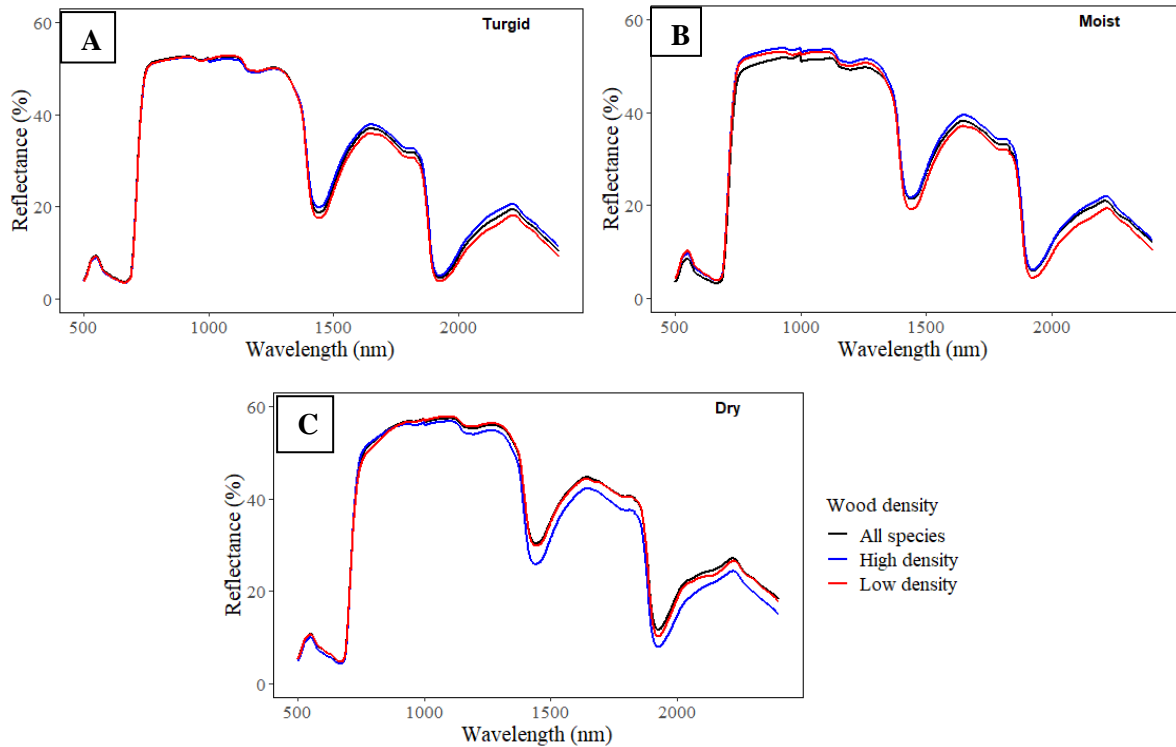


Figura 11- Assinatura espectral média das espécies agrupadas em classes de densidade da madeira nos diferentes estágios de desidratação ao longo da curva de pressão-volume. A curva na cor preta representa a assinatura espectral de todas as espécies, a curva em azul representa o grupo de alta densidade da madeira, enquanto a curva vermelha representa o grupo com baixa densidade da madeira.

7.3 Correlações espectrais

As correlações espectrais foram desenvolvidas para se identificar quais comprimentos de ondas apresentam uma associação mais significativa com os traços funcionais foliares como LMA, LWC e teores de nitrogênio. A análise revelou que as correlações entre os comprimentos de ondas e os traços funcionais variaram ao longo do espectro eletromagnético (Figura 12). Em relação ao conteúdo de água das folhas (*leaf water content* (LWC) - painel A), é possível notar padrões de correlações distintos para cada grupo de densidade da madeira. Para o grupo com baixa densidade da madeira, foram encontradas correlações negativas para LWC na porção visível do espectro (500-700 nm). Na região do infravermelho próximo (700-1.300 nm), foram observadas correlações positivas para os dois grupos funcionais (baixa e alta densidade), sugerindo que esta faixa de comprimento de onda não é influenciada diretamente pelo conteúdo

de água da folha. Já na região do infravermelho de ondas curtas (1.300-2.400 nm), foram observadas correlações positivas e picos de correlações negativas, especialmente nas bandas de absorção da água, localizadas entre 1.450 e 1.940 nm. Para o grupo de alta densidade da madeira o comportamento na região do visível (500-700) foi similar ao grupo de baixa densidade, no entanto, entre 600-690 nm foram observadas fracas correlações positivas. Na região do infravermelho próximo (700-1.300 nm), as correlações foram positivas, embora inferiores ao grupo de espécies com baixa densidade da madeira. No infravermelho de ondas curtas (1300-2400 nm), observou-se algumas fracas correlações positivas e fracas correlações negativas nas feições de absorção da água.

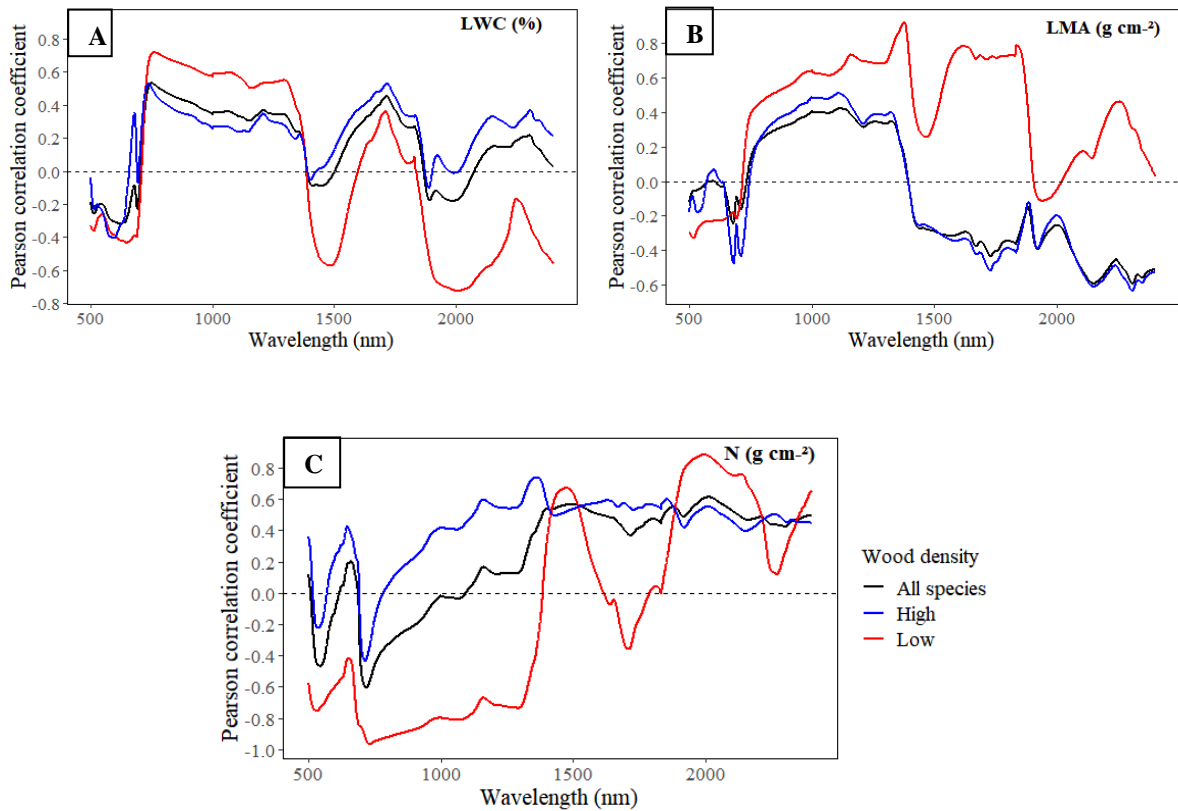


Figura 12. Correlações espectrais entre a refletância e os traços funcionais foliares. (A) Conteúdo de água da folha (LWC, %), (B) Massa foliar específica (LMA, g cm⁻²) e (C) Teor de nitrogênio (N, g cm⁻²). A linha preta é referente ao padrão de correlação para todas as espécies, em azul para o grupo de alta densidade da madeira e vermelho baixa densidade da madeira.

Em relação a massa foliar específica (LMA) (Painel B), é possível observar variações significativas nos padrões de correlações ao longo dos comprimentos de ondas. Para o grupo de baixa densidade, foram observadas correlações negativas fracas na região do visível. No infravermelho próximo, foram observadas correlações positivas, com pico de correlação na região entre 1.370-1.380 nm. No infravermelho médio, as correlações foram positivas, especialmente nos comprimentos de ondas relacionados a água. Para o grupo de espécies de alta densidade foram observadas fracas correlações negativas na região do visível em (500-700). No infravermelho próximo, as correlações foram positivas, embora com menor intensidade em relação ao grupo de baixa densidade. No infravermelho próximo, ao contrário, do grupo de baixa densidade, as correlações foram negativas, sendo mais forte na região de 2.200 nm.

Em relação aos teores de nitrogênio foliar (Painel C), é possível observar variações nos padrões de correlações ao longo do espectro. Para o grupo de baixa densidade, na região do visível foi observado fortes correlações negativas, sendo mais fortes especialmente em 680-695 nm. No infravermelho próximo, foram observadas fortes correlações negativas, especialmente na região de transição com o visível (680-750), região que é conhecida como ponto de inflexão na “red edge”. No infravermelho de ondas curtas foram observadas fracas correlações positivas e uma fraca correlação negativa em 1.640 nm. Para o grupo de alta densidade, foram observadas fracas correlações positivas na região do visível. No infravermelho próximo as correlações foram positivas. No infravermelho de ondas curtas as correlações predominantes foram positivas, com fracas correlações negativas em 1.450 nm.

A figura 13, a seguir, apresenta os padrões de correlação entre o ponto de perda de turgor e a reflectância em diferentes estágios de hidratação da folha. O primeiro gráfico ilustra as correlações espectrais para todas as espécies entre o ponto de perda de turgor e a reflectância em diversos estágios de hidratação foliar. Observa-se que, quando a folha está túrgida, as correlações mais fortes ocorrem no infravermelho próximo, sugerindo que esses comprimentos de onda são particularmente sensíveis à turgescência celular. À medida que as plantas desidratam e perdem turgescência, as correlações permanecem positivas e intensas no infravermelho próximo. No infravermelho de ondas curtas, as correlações se tornam mais fortemente negativas, especialmente nas bandas de absorção de água. Após perderem turgescência e se tornarem secas e desidratadas, as plantas podem perder suas características espectrais, o que pode estar relacionado às correlações fracas ao longo de todo o espectro.

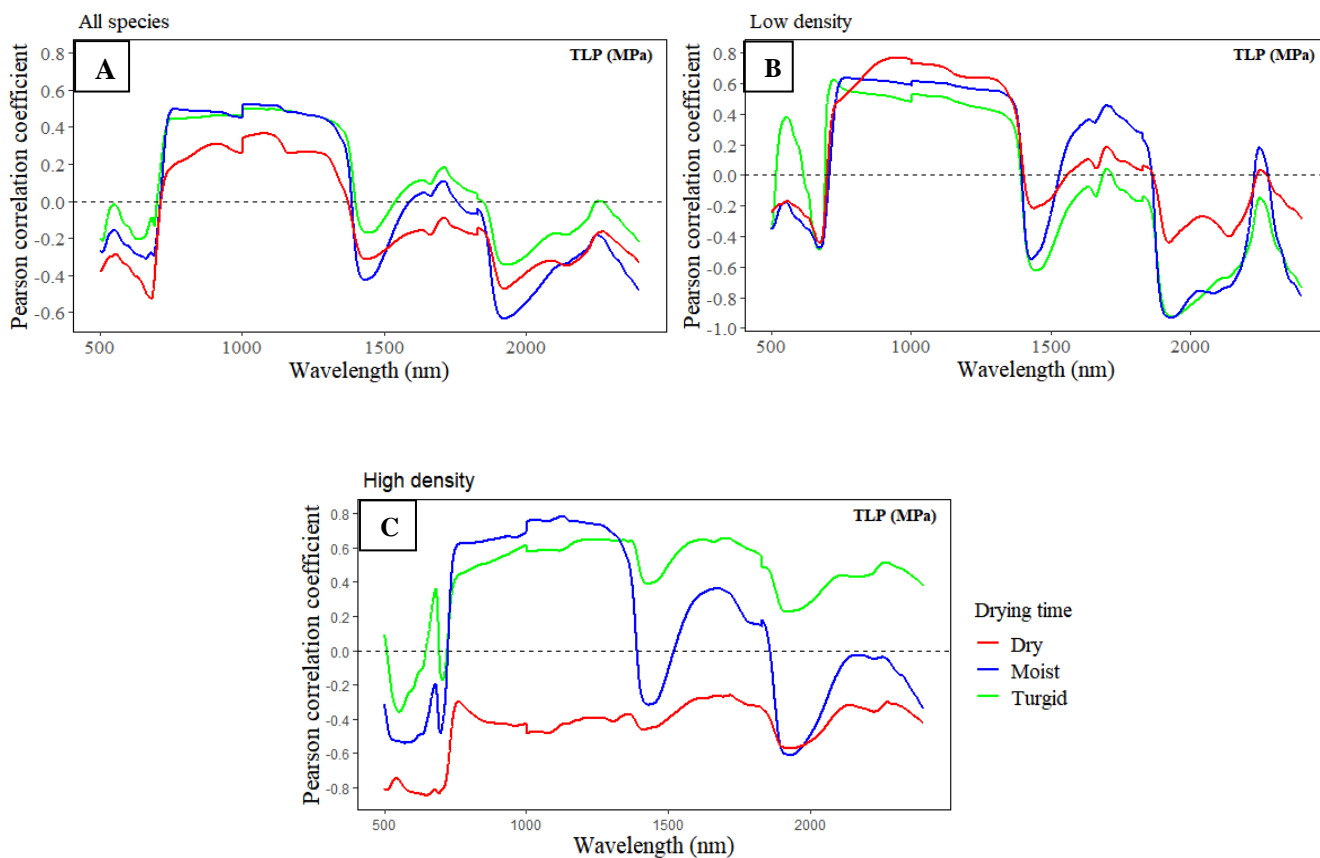


Figura 13. Correlações espectrais entre o ponto de perda de turgor (TLP) e a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha ao longo da curva de pressão-volume. (A) Todas as espécies avaliadas neste trabalho, (B) grupo de baixa densidade da madeira e (C) baixa densidade da madeira. Em verde a reflectância da folha túrgida, azul a folha úmida e vermelho folha seca.

Analisando individualmente, os padrões de correlação entre o ponto de perda de turgor e a reflectância para cada grupo de espécies, é possível observar variações. Para o grupo de baixa densidade, quando as folhas estão túrgidas, na região do visível é possível observar que fracas correlações positivas. No infravermelho próximo, houve predominância de correlações fortes e positivas, assim como observado no padrão geral para todas as espécies. No infravermelho de ondas curtas, especialmente nas bandas de absorção da água (1.450 e 1.940 nm) foram observadas fortes correlações negativas. À medida que a folhas perdem mais água passando do estágio túrgido para o estado úmido é possível observar que os padrões de

correlações permanecem parecidos no infravermelho próximo, enquanto no infravermelho de ondas curtas as correlações ficam mais fortes. Quando a folha já passou do ponto de perda de turgor, e já está seca, é possível observar uma redução que as correlações ficam mais fortes no infravermelho próximo e reduzem no infravermelho de ondas curtas.

Para o grupo de alta densidade da madeira, quando a folha está túrgida é observado um pico de correlações fracas e positivas na região do visível. No infravermelho próximo, as correlações são moderadas e positivas. No infravermelho de ondas curtas, as correlações foram predominantemente positivas, especialmente, nas bandas de absorção de água. A partir do momento que a folha começa a perder a água, na região do visível, as correlações são fracas negativas. No infravermelho próximo, as correlações são mais fortes e positivas, sendo maiores que o grupo de baixa densidade. No infravermelho de ondas curtas, as correlações são predominantemente negativas, porém mais fracas que para as de baixa densidade. Quando a folha está desidratada, as correlações são negativas ao longo de todo o espectro, sendo mais fortes na região do visível.

7.4 Índices de vegetação

As correlações entre os índices espectrais e os traços funcionais foliares foram realizados buscando-se identificar quais índices podem ser utilizados a fim de se compreender as características foliares dos grupos de espécies de baixa e alta densidade da madeira. A Figura (x) apresenta os valores de correlações entre os índices espectrais e os traços foliares para o grupo de alta densidade da madeira. Em relação a massa foliar específica (LMA), observou-se correlações fortes e significativas com o índice NDLMA. Observou-se também correlações mais fracas com os índices LCI, WI e NDVI. Por outro lado, o conteúdo de água da folha (LWC) não apresentou correlações significativas com nenhum dos índices espectrais testados neste trabalho. Uma fraca correlação foi observada com o índice NDWI. Em relação ao Nitrogênio, este traço foliar apresentou correlações fortes e significativas com os índices NDWI, WI e PRI. Também foram identificadas fracas correlações entre os índices RededgeNDVI, MSI e NDNI.

Para o grupo de espécies de baixa densidade da madeira, as correlações entre os índices de vegetação e as características tiveram algumas mudanças em relação ao grupo de alta densidade. Em relação a massa foliar específica (LMA), esta não apresentou correlações significativas com nenhum dos índices avaliados, embora fracas correlações tenham sido

observadas com os índices LCI, RededgeNDVI e NDLMa. Em relação ao conteúdo de água da folha (LWC), não foram observadas correlações significativas com nenhum dos índices avaliados. As correlações, de modo geral, foram fracas com todos os índices. Em relação ao Nitrogênio, este apresentou correlações significativas com os índices NDII, NDNI, MSI e NDWI. Correlações fracas foram observadas com os demais índices avaliados.

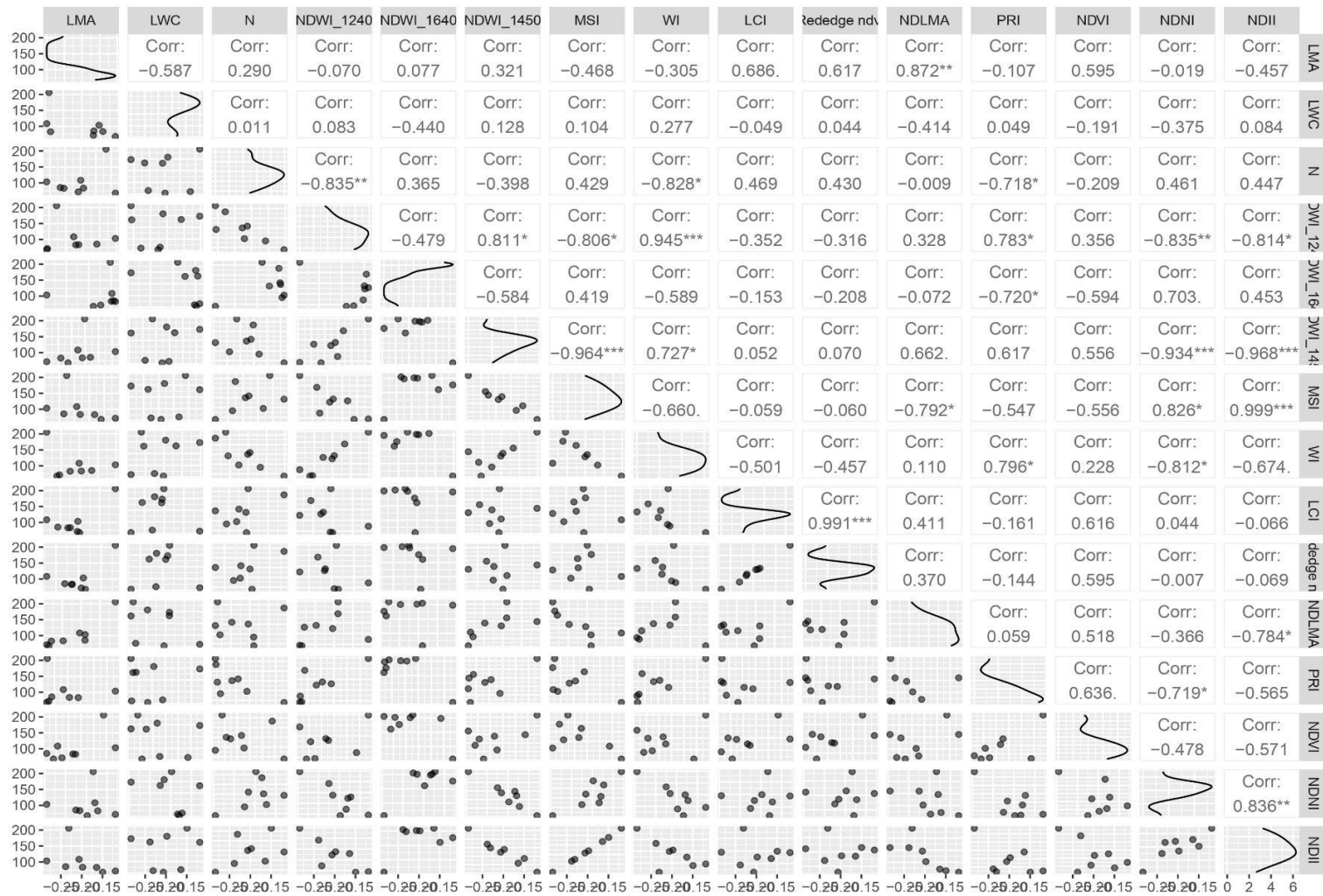


Figura 14. Matriz de correlação entre os índices e os traços foliares para o grupo de espécies com alta densidade da madeira. Os valores com * representam correlações significativas ($p < 0.05$) e ** ($p < 0.01$)

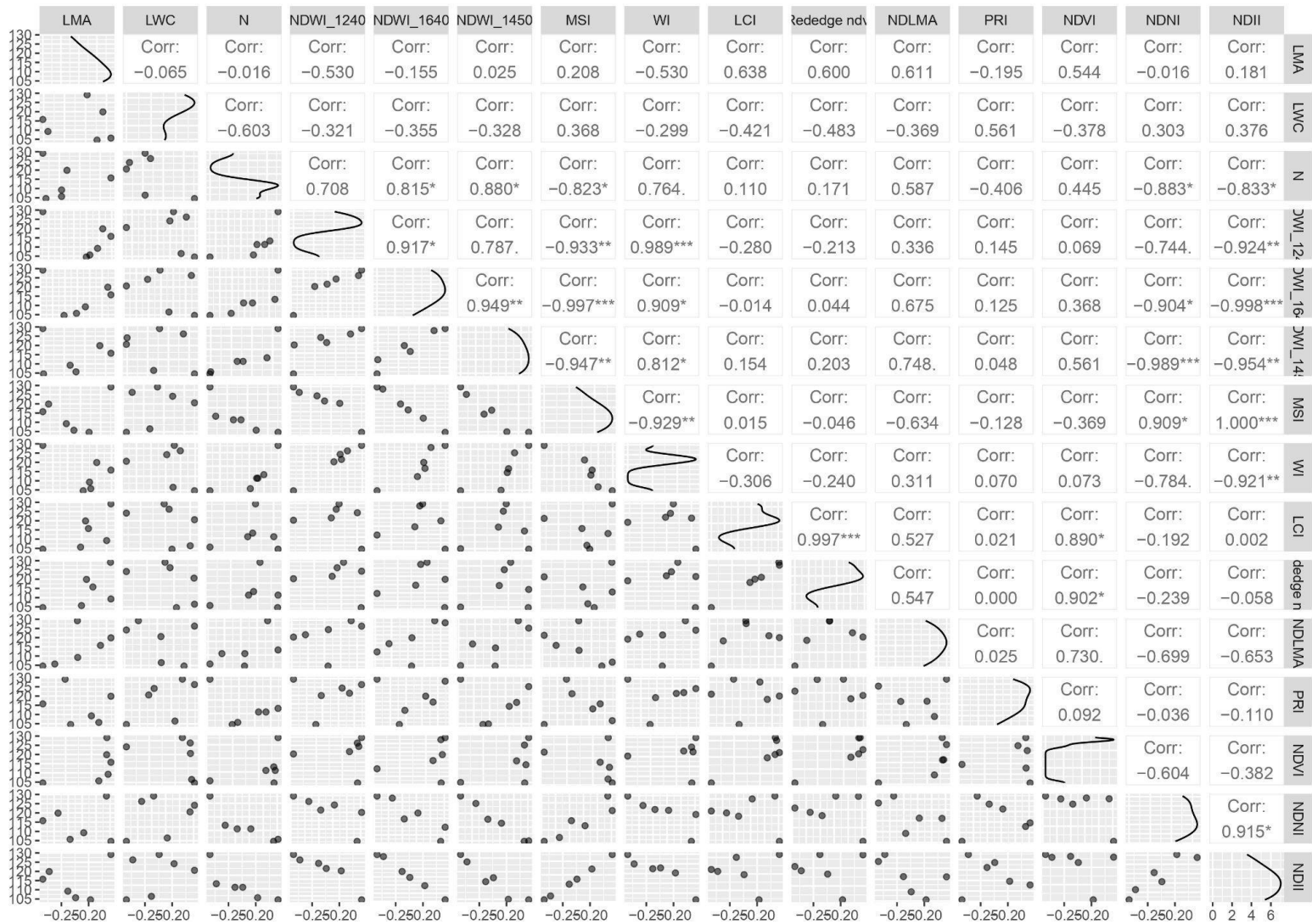


Figura 15. Matriz de Correlação entre os índices e traços funcionais foliares para o grupo de espécies de baixa densidade da madeira. Os valores com * representam correlações significativas ($p < 0.05$) e ** ($p < 0.01$)

A tabela 3 apresenta os resultados das correlações entre os índices de vegetação e ponto de perda de turgor (TLP) para o grupo de espécies com baixa densidade da madeira, considerando a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha. Quando a folha está túrgida, observa-se correlações fortes e significativas com o índice PRI. Com os índices NDWI, MSI, WI, NDVI e NDII as correlações também foram fortes (> 0.7), porém não foram significativas estatisticamente. Quando a folha já perdeu água, e está úmida, não é observado correlações significativas com nenhum dos índices avaliados, embora as correlações com os índices NDWI, MSI e NDII ainda sejam fortes. A partir do momento que a folha já está seca e desidratada, as correlações de modo geral, são fracas com os índices avaliados.

Tabela 3. Valores de correlação entre o ponto de perda de turgor e os índices de vegetação para grupo de espécies de baixa densidade da madeira, considerando a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha. Os valores em negrito indicam correlação significativa ($p < 0.05$).

Índices de vegetação	NDWI_1240	NDWI_1640	NDWI_1450	MSI	WI	LCI	Rededge NDVI	PRI	NDVI	NDII
TLP (túrgida)	0.719	0.781	.0784	-0.805	0.709	-0.63	-0.48	-0.9187	0.794	0.792
TLP (úmida)	0.587	0.699	0.715	-0.717	0.563	0.122	0.155	-0.727	0.627	0.711
TLP (seca)	0.648	0.659	0.6	-0.62	0.65	-0.746	-0.155	-0.703	0.592	0.626

Para o grupo de espécies com alta densidade da madeira, tabela 3, observa-se padrões de correlações distintos entre o ponto de perda de turgor e os índices de vegetação. Quando as folhas estão túrgidas não são observadas correlações significativas com nenhum dos índices avaliados. Foram observadas correlações fracas com os índices PRI e NDWI. Quando a folha está úmida, também não é possível observar correlações significativas, embora tenha um aumento da correlação com o RededgeNDVI. Já quando a folha está seca, observa-se correlações significativas com os índices LCI e Rededge NDVI. E uma forte correlação com o NDVI, embora não significativa.

Tabela 4. Valores de correlação entre o ponto de perda de turgor e os índices de vegetação para grupo de espécies de alta densidade da madeira, considerando a reflectância nos diferentes estágios de hidratação da folha. Os valores em negrito indicam correlação significativa ($p < 0.05$).

Índices de vegetação	NDWI_1240	NDWI_1640	NDWI_1450	MSI	WI	LCI	Rededge NDVI	PRI	NDVI	NDII
TLP (túrgida)	-0.528	-0.123	0.224	0.155	-0.395	0.41	0.432	0.68	-0.11	0.133
TLP (úmida)	-0.261	0.163	0.507	-0.211	0.401	0.664	0.708	0.137	0.267	-0.314
TLP (seca)	-0.163	0.079	0.322	-0.111	0.126	0.857	0.833	0.192	0.774	-0.999

8. Discussão

8.1 A densidade da madeira e o espectro de economia foliar

A densidade da madeira é uma característica chave das estratégias ecológicas das espécies (Chaves, 2009), podendo ser utilizada com um proxy para compreender os trade-offs do espectro de economia foliar. Em florestas tropicais, espécies com baixa densidade da madeira estão associadas a um crescimento rápido, altas taxas fotossintéticas e folhas com um ciclo de vida curto (Wright et al., 2004; Pooter et al., 2019). Por outro lado, espécies de alta densidade possuem crescimento mais lento, menores taxas fotossintéticas e folhas com um ciclo de vida mais longo (Wright et al., 2004). Ao comparar as médias dos traços foliares, não foi observado diferenças significativas entre os grupos de baixa e alta densidade. Observações semelhantes, foram documentadas por Lamour et al. (2023), que conduziram pesquisas na mesma área de estudo (ZF-2) e focaram em um conjunto semelhante de espécies. A coordenação entre os traços funcionais do tronco e da folha é frequentemente modulada pela interação entre fatores intrínsecos das espécies e o ambiente (Pooter et al., 2019; Garcia et al., 2021), levando em alguns casos, à observação de coordenação entre estes traços, enquanto em outros casos essa coordenação pode não ser evidente. Por exemplo, Baraloto et al. (2010),

avaliando a relação entre características do tronco e da folha, não observou eixos ortogonais de coordenação entre estes traços para algumas espécies amazônicas. Enquanto, Mendez-Alonzo et al. (2012), apontou evidências de coordenação entre os espectros econômicos da folha e do tronco. Esta complexidade de interações entre os ecossistemas tropicais pode explicar a ausência de coordenação entre os traços do tronco e das folhas observadas neste trabalho, sugerindo que outras variáveis, além da densidade da madeira, podem desempenhar papéis significativos nestas características.

8.2 A água e o comportamento espectral das plantas

Os resultados iniciais obtidos neste trabalho apontam que a densidade da madeira não apresentou uma correlação significativa com os traços foliares. No entanto, ao se utilizar a espectroscopia, sendo uma abordagem mais sensível, foram identificadas diferenças nas características funcionais foliares entre os grupos de densidade da madeira, incluindo no conteúdo de água da folha. A espectroscopia é uma técnica que permite identificar variações mais sutis nas características fisiológicas, morfológicas e químicas, que muitas vezes não podem ser observadas a olho nu ou mensuradas numa escala maior. Sendo assim, esta abordagem mostrou-se como uma ferramenta útil para se compreender o status hídrico de espécies com diferentes traços funcionais, tendo a densidade da madeira como elemento principal.

Analisando os espectros foliares das espécies ao longo da curva de pressão-volume, em diferentes estágios de hidratação, é possível observar padrões distintos de reflectância. Isso ocorre, pois a água exerce influência direta e indireta ao longo de todo o espectro, a influência direta da água pode ser observada especialmente nos comprimentos de ondas que estão relacionados ao conteúdo de água da folha (1300-2500 nm), visto que, a água é responsável pela absorção de energia, mais especificamente nos comprimentos de ondas próximo a 1450, 1940 e 2500 nm, e em outras duas regiões 970 e 1200, porém mais fracas próximas a 970 e 1200 nm (Jacquemoud & Ustin, 2019; Ceccatto 2001, Ollinger 2010). Enquanto os efeitos indiretos estão relacionados a alteração da estrutura celular em relação ao conteúdo de água, e podem ser observados na região do infravermelho próximo (720-1300 nm).

A possibilidade de avaliar o status hídrico das plantas a partir de dados hiperespectrais, torna-se possível devido o “efeito primário” da água na reflectância, onde a água influencia inversamente na reflectância, ou seja, quanto maior o conteúdo de água da folha, menor será a reflectância (Carter, 1991, Ponzoni, 2012). As respostas espectrais das plantas em função da

variação do conteúdo de água na folha, aqui observadas, corroboram estas teorias, uma vez que, a reflectância aumenta significativamente entre as plantas túrgidas e desidratadas. Estes resultados também foram observados por outros utilizando dados hiperespectrais para avaliar o conteúdo de água da folha (Strabeli et al., 2023; Caturegli et al., 2020)

Explorando especificamente as curvas de reflectância dos grupos de espécies de baixa e alta densidade da madeira, nos diferentes estágios de hidratação da folha é possível observar algumas diferenças. Na figura A, quando a folha está túrgida, na região do visível e infravermelho próximo, é notável uma sobreposição das curvas, esse comportamento pode ser relacionado ao fato que nestes comprimentos de onda as feições de absorção da água são menores e mais fracas, resultando em curvas de reflectância harmônicas e de sobreposição (Curran, 1989). Na região do infravermelho de ondas curtas, embora sutis, é possível notar diferenças na reflectância dos grupos, especialmente nos comprimentos de ondas relacionados ao conteúdo de água da folha, com espécies de alta densidade apresentando valores de reflectância maiores que o grupo de baixa densidade. Esse resultado é consistente com o maior conteúdo de água nas células do mesófilo para esse grupo, o que necessário para suportar o crescimento mais rápido e altas taxas fotossintéticas (Onoda et al., 2017).

À medida que as folhas começam a perder água e passam para o estágio úmido, é possível observar diferenças mais visíveis entre os valores de reflectância entre os grupos de espécies. Este comportamento é provocado pela diminuição da água nos espaços intercelulares, fazendo com que a radiação incidente nas folhas seja mais intensamente espalhada pelas interfaces da parede celular, resultando em alterações na reflectância (Ponzoni et al., 2012). Quando as folhas já estão secas é notável diferenças significativas nas curvas de reflectância ao longo de todo o espectro, entre os grupos de espécies. Na região entre o visível e a borda do infravermelho, ocorre uma descaracterização da curva de reflectância, para o grupo de espécies de baixa densidade. Esta região de transição do visível para o vermelho é conhecida no sensoriamento remoto como “red edge”, que é utilizada como um indicador sensível de estresse na vegetação (Jansen, 2009; Curran et al., 1991). Este fenômeno de descolamento da curva de reflectância em direção a comprimento de onda menores acontece devido a diminuição da absorção da radiação pela clorofila, que provoca a diminuição da largura total da banda de absorção (Filela & Peñuelas, 1994; Xie et al, 2018). Logo, este resultado pode sugerir uma menor resistência ao estresse hídrico para este grupo de espécies.

Os comprimentos de onda do infravermelho próximo e curtas, quando a folha está desidratada (painel C), são caracterizados pelo aumento da reflectância mais acentuado do grupo de baixa densidade, ao contrário dos estágios anteriores. Este comportamento pode estar refletindo a capacidade de regular a perda de água, uma vez que, espécies de alta densidade estão associadas a uma parede celular mais rígida e espessa, o que pode aumentar sua capacidade de reter água mesmo sob pressão (Onoda et al., 2017). Além disso, é possível observar que entre os comprimentos de ondas entre 2120-2320 nm, ocorre uma deformação na curva de reflectância para espécies de baixa densidade da madeira. Liu et al., (2019) encontraram associação entre estas bandas e o teor de clorofila, sendo uma possível explicação para o comportamento observado neste trabalho, visto que nas folhas desidratadas a degradação da clorofila para o grupo de baixa densidade aparenta ser maior. Estes resultados demonstram a importância de utilizar diferentes técnicas para estudar as respostas ecológicas e fisiológicas das plantas, pois às vezes as diferenças são sutis e precisam de métodos mais robustos para serem captadas.

8.3 Influência dos traços funcionais foliares na resposta espectral das plantas

A espectroscopia é uma técnica que permite avaliar uma ampla característica foliares, sendo capaz de capturar informações em uma escala mais ampla de comprimento de ondas, o que pode revelar diferenças sutis na reflexão e absorção da luz pelas folhas. Embora muitas características não sejam expressas diretamente na assinatura espectral das plantas, como a densidade da madeira, estas estão correlacionadas com características como LMA, N e LWC, que podem ser previstos diretamente a partir das propriedades espectrais das plantas (Doughty et al., 2017; Chavana-Bryant et al., 2017; Serbin et al., 2012). Neste trabalho, ao avaliar os padrões de correlações entre os traços foliares e a reflectância, observa-se diferentes respostas ao longo dos comprimentos de ondas, tanto para espécies no geral, como para os grupos funcionais (baixa e alta densidade da madeira). Em relação ao conteúdo de água da folha (Figura 12-A), no comprimento de onda do visível as correlações são predominantemente fracas, provavelmente por essa região ter correlações mais fortes com os pigmentos das folhas (Ponzoni et al, 2012), o que pode influenciar mais que o conteúdo de água na resposta espectral. Na região do infravermelho próximo as correlações são predominantemente positivas, provavelmente por esta faixa espectral ser mais sensível à estrutura celular, ao invés do conteúdo de água da folha. No infravermelho próximo, região que está diretamente relacionado

ao conteúdo de água da folha, as correlações são predominantemente negativas, principalmente nas bandas de absorção da água. Este comportamento está atribuído a quantidade de energia refletida pelas folhas sendo inversamente relacionada com a água, ou seja, quanto mais água possuir uma folha maior será a absorção de luz, portanto menor a reflectância (Bao et al., 2013; Kovar et al., 2019). Sendo que, esta relação é mais evidente para espécies de baixa densidade da madeira, podendo sugerir que este grupo possa ter mais água no interior das suas células.

Em relação a massa foliar específica, as principais respostas para este traço funcional foliar podem ser observadas na região do infravermelho próximo. Observa-se que na região do infravermelho próximo (700-1300 nm) as correlações foram predominantemente fracas e positivas, para os dois grupos (baixa e alta densidade). Estes resultados corroboram com estudos anteriores que mostraram que a absorção espectral do conteúdo de matéria seca é próxima a zero no NIR, mas aumenta significativamente para região do infravermelho de ondas curtas (Asner, 2011; Le Maire et al., 2008). No infravermelho de ondas curtas são observadas fortes correlações para os dois grupos funcionais, sendo positivas para o grupo de baixa densidade e negativas para alta densidade. Este comportamento observado para o grupo de espécies de alta densidade da madeira pode sugerir que este grupo tenha maior LMA, uma vez que plantas com esta característica tendem a ter uma maior concentração de compostos como lignina e celulose (Poorter et al., 2009). Estes compostos são sensíveis à faixa de comprimento de onda em questão e exibem uma relação inversa com a reflectância (Jacquemoud & Ustin, 2019). Resultados semelhantes foram obtidos por (Serbin et al., 2019; Le Maire et al., 2008), demonstrando sensibilidade desta região espectral para LMA.

Em relação ao Nitrogênio, a sua principal influência está na região do visível, uma vez que, este elemento é um componente da clorofila, sendo um pigmento responsável pela absorção de luz para fotossíntese. Além disso, é um dos principais constituintes da rubisco, proteína chave para fixação do CO₂ durante o processo fotossintético (Lambers et al., 2008). Observou-se fortes correlações negativas com Nitrogênio com a reflectância região do visível, resultado semelhante a outros a outros estudos que também identificaram essa região como importante para predição deste elemento a partir de dados espectrais (Asner et al., 2010; Dechant et al., 2017; Ely et al., 2019; Wang et al., 2021). As correlações negativas mais fortes observadas para o grupo de baixa densidade da madeira, podem indicar maior concentração de nitrogênio e maior capacidade fotossintética para o grupo de espécies. Este resultado corrobora ao que foi observado por Lamour et al (2023), nesta mesma área de estudo, onde espécies de baixa densidade da madeira investiram maior fração de nitrogênio na molécula rubisco e

consequentemente tiveram maior capacidade fotossintética em comparação ao grupo de alta densidade da madeira. Além disso, na região do infravermelho de ondas curtas, observa-se fortes relações positivas para os dois grupos (alta e baixa densidade), este comportamento pode estar associado a presença de nitrogênio em alguns compostos orgânicos, que são sensíveis a esta região (Jacquemoud & Ustin.,2019).

O ponto de perda de turgor é uma medida do potencial hídrico do momento em que as células perdem a turgescência e ficam flácidas, sendo um indicador da capacidade das plantas em tolerar estresse hídrico (Bartlett et al., 2012). Plantas que possuem um ponto de perda de turgor mais negativo tendem a manter a condutância estomática, condutância hidráulica e trocas gasosas em menores potenciais de água no solo, sendo mais tolerantes a secas. Enquanto plantas que possuem um ponto de perda de turgor menos negativos, tendem a não tolerar baixos potenciais hídricos e perdem a turgescência celular mais rapidamente e são menos tolerantes a situações de seca (Sack et al., 2003; Marechaux et al.,2015). Ao avaliar a correlação entre o ponto de perda turgor e a reflectância no momento que as folhas estão túrgidas, é observa-se que os padrões de correlação, em geral, refletem a assinatura espectral de uma folha verde e sadia, indicando que as folhas estão bem hidratadas e refletindo a luz de forma uniforme.

À medida que plantas perdem água e iniciam o processo de murchamento das células, as correlações negativas são intensificadas, especialmente nas bandas de absorção da água, devido a redução da capacidade de absorção de luz por esta molécula. Este fenômeno é ainda acentuado no grupo de baixa densidade, indicando maior perda de água. Tal fato corrobora ao que foi observado Fu & Meinzer (2018) em uma análise de dados globais sobre características hidráulicas de plantas de diversos biomas: a densidade da madeira é negativamente correlacionada com ponto de perda de turgor, ou seja, plantas com baixa densidade da madeira atingem a perda de turgor mais rapidamente e são mais suscetíveis a eventos de seca.

Após a perda de turgor, quando as folhas já estão secas e desidratadas, as feições de absorção devido às proteínas, ligninas e celulose são ressaltadas no espectro (Kokaly et al., 1998). Neste trabalho, os grupos funcionais (baixa e alta densidade da madeira) apresentaram diferentes padrões de correlação com ponto de perda de turgor, com a reflectância das folhas secas. Para o grupo de baixa densidade, as correlações predominantemente positivas podem ser um sugerir que ocorreram alterações significativas na estrutura celular, em função do menor ponto de perda de turgor e as plantas perderam as características de absorção de luz. Para o grupo de alta densidade, as correlações predominantemente negativas, especialmente na região do visível, podem ser um indicativo da maior longevidade foliar e resistência ao estresse biótico

e abiótico. Isto pode ser explicado pelo fato que espécies de alta densidade da madeira tendem a investir maior proporção de nitrogênio foliar em proteínas e outros compostos de defesa (Coley & Barone,1996; Onoda et al.,2017), que geralmente absorvem mais luz na região do visível e infravermelho próximo.

8.4 Índices de vegetação e traços funcionais foliares

Os índices de vegetação são formados a partir da combinação de duas ou mais bandas espectrais selecionadas para ressaltar sua relação com os parâmetros da vegetação (Jackson & Huelte,1991). Os resultados das correlações entre os traços funcionais foliares e os índices de vegetação, mostraram que grupos funcionais (alta e baixa densidade da madeira), respondem de forma distinta aos índices, confirmando o que tinha sido observado nas correlações espectrais entre a reflectância e o próprio traço funcional. Em relação a massa foliar específica (LMA), o grupo de alta densidade apresentou uma correlação significativa entre o índice NDIma e este traço funcional. Este resultado pode ser explicado pelo fato que este índice avalia a quantidade de matéria seca em relação a área da folha (Le Maire et al.,2008). Assim, considerando que outros trabalhos apontam que as plantas de alta densidade da madeira estão investem em folhas com maior massa, com maior conteúdo de matéria seca por unidade de área (Poorter et al., 2009; Mendez-Alonzo et al., 2012), os resultados obtidos aqui corroboram com estes dados.

Com relação ao conteúdo de água de da folha, este traço funcional não apresentou correlações significativas com nenhum dos índices avaliados, para os dois grupos funcionais (baixa e alta densidade). No entanto, um fato a ser observado, o Nitrogênio, nos dois grupos de espécies, apresentou correlações significativas com os índices NDWI, WI, MSI, que estão diretamente relacionados ao conteúdo de água, sugerindo que as feições de absorção de nitrogênio, inibiram o sinal da água em relação aos índices. Este resultado pode ser explicado pelo que alguns estudos mostram que na região do infravermelho próximo e de ondas curtas podem ter, embora mais fracas, bandas sensíveis ao nitrogênio, coincidindo com as bandas de absorção de água (Ollinger et al., 2009; Wang et al., 2020). Além disso, este sinal pode ser intensificado pela alta concentração de nitrogênio encontrada nas florestas de terra firme da Amazônia (Nardoto et al., 2008).

Em relação ao Nitrogênio, além das correlações significativas com índices NDWI, WI e MSI, este elemento também apresentou correlações significativas com índice PRI para o grupo de alta densidade e com NDNI, NDII, para o grupo de baixa. Neste caso, observa-se que

estes índices abrangem a região do visível e da borda do vermelho, regiões sensíveis ao nitrogênio. De acordo com Abrahão et al (2009), os melhores índices de vegetação para discriminar os teores de N são aqueles resistentes à atmosfera do visível, sendo, portanto, os indicados para análises hiperespectrais. Além disso, Oliveira et al (2017), utilizando índices de vegetação para estimar nitrogênio no gênero *Eucalyptus*, observaram também que os índices que utilizam a região da borda do vermelho fornecem estimativas mais precisas do nitrogênio foliar.

As correlações espectrais entre o ponto de turgor e os índices de vegetação calculados a partir da reflectância nos diferentes estágios de hidratação das folhas, buscou avaliar a sensibilidade dos índices às variações no status hídrico das plantas. Quando as folhas estão túrgidas no grupo de baixa densidade, observou-se uma correlação significativa. Este índice permite avaliar a saúde e a fisiologia das plantas, pois reflete a atividade fotossintética (Peñuelas et al., 1994). Este resultado sugere que o grupo de baixa densidade apresenta maiores taxas fotossintéticas, corroborando com os resultados anteriormente descritos. À medida que as plantas perdem água e ficam úmidas é esperado que índices que são sensíveis ao estresse hídrico, como o MSI, apresente correlações significativas. No entanto, em nenhum dos grupos funcionais (alta e baixa densidade) foi observado este comportamento. Isto pode estar relacionado ao fato que os índices espectrais são calibrados em vegetações específicas e podem não ter a mesma performance na detecção das características foliares em outros ambientes. Além disso, o índice MSI não é calculado pela diferença normalizada, técnica que permite realçar a sensibilidade dos parâmetros biofísicos que estão sendo avaliados (Jansen,2009).

Quando as folhas já estão secas, os índices que tiveram correlações significativas foram LCI e Rededge NDVI, para o grupo de alta densidade da madeira. Estes índices abrangem a região do *red edge*, que está relacionada a absorção de pigmentos fotossintéticos e compostos orgânicos. Este resultado pode estar associado, ao fato que, nas folhas verdes, estes compostos são normalmente inibidos devido à sobreposição dos picos de absorção na região do azul e à maior concentração de clorofila, no entanto, quando folhas estão secas são realçados e detectáveis a partir das propriedades espectrais das folhas (Jacquemoud & Ustin,2019). Além disso, podem estar refletindo uma menor degradação da molécula de clorofila e maior resistência ao estresse hídrico.

9. Conclusão

Os resultados obtidos, demonstram que as plantas utilizam diferentes estratégias para utilização dos recursos, refletindo em trade-offs entre os traços das funcionais da folha e a densidade da madeira. A análise por espectroscopia revelou variações nos padrões de reflectância foliar em resposta aos diferentes estágios de hidratação das folhas e grupos de espécies. As correlações espectrais indicaram sensibilidade dos traços funcionais foliares a diferentes faixas espectrais. Além disso, a integração dos dados de espectroscopia foliar com os índices de vegetação, possibilitou avaliar com mais precisão o impacto dos traços funcionais foliares na resposta espectral. A abordagem espectral em estudos ecológicos oferece a vantagem de ser não destrutiva e em grande escala, possibilitando a análise de um maior número de amostras e a exploração de padrões mais detalhados.

Ademais, o conhecimento das propriedades espectrais ao nível das folhas, possibilita validar e calibrar modelos espectrais para o nível de dossel, garantindo que os dados obtidos a partir de imagens de satélites ou aeronaves remotas sejam precisos e representem as condições reais da vegetação.

10. Referências Bibliográficas

- Abrahamo, S. A., Pinto, F. D. A. D. C., Queiroz, D. M. D., Santos, N. T., Gleriani, J. M., & Alves, E. A. (2009). Vegetation spectral indices to discriminate nitrogen rates in tanzania grass. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38, 1637-1644.
- Almeida, S. S; Amaral, D. D; Silva, A. S. L. 2004. Análise florística e estrutura de florestas de Várzea no estuário amazônico. *Acta Amazonica*, 34 (4): 513-524.
- Amaral, M. R., Lima, A. J., Higuchi, F. G., Dos Santos, J., & Higuchi, N. (2019). Dynamics of tropical forest twenty-five years after experimental logging in Central Amazon mature forest. *Forests*, 10(2), 89.
- Ardnt, S.K.; Irawan, A.; Sanders, G. Apoplastic water fraction and rehydration techniques introduce significant errors in measurements of relative water content and osmotic potential in plant leaves; *International Journal for Plant Biology*, Lund, v. 155, p. 355-368, 2015.
- Asner, G. P., & Martin, R. E. (2008). Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3958-3970.
- Asner, G. P., Powell, G. V., Mascaró, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., ... & Hughes, R. F. (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38), 16738-16742.
- Asner, G. P., Martin, R. E., Knapp, D. E., Tupayachi, R., Anderson, C., Carranza, L., ... & Weiss, P. (2011). Spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3587-3598.
- Asner, G. P., Martin, R. E., Carranza-Jiménez, L., Sinca, F., Tupayachi, R., Anderson, C. B., & Martínez, P. (2014). Functional and biological diversity of foliar spectra in tree canopies throughout the Andes to Amazon region. *New Phytologist*, 204(1), 127-139.
- Baraloto, C., Timothy Paine, C. E., Poorter, L., Beauchene, J., Bonal, D., Domenach, A. M., ... & Chave, J. (2010). Decoupled leaf and stem economics in rain forest trees. *Ecology letters*, 13(11), 1338-1347.
- Bartlett, M. K., Scoffoni, C., & Sack, L. (2012). The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. *Ecology letters*, 15(5), 393-405.

- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ... & Marimon, B. S. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519: 344-348.
- Cao, Z., Wang, Q., & Zheng, C. (2015). Best hyperspectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. *Ecological indicators*, 54, 96-107.
- Carter, G. A. (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American journal of botany*, 78(7), 916-924.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., & Grégoire, J. M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote sensing of environment*, 77(1), 22-33.
- Coley, P. D., & Barone, J. A. (1996). Herbivory and plant defenses in tropical forests. *Annual review of ecology and systematics*, 27(1), 305-335.
- Cordeiro, A. L., Norby, R. J., Andersen, K. M., Valverde-Barrantes, O., and Quesada, C. A. (2020). Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant Environ. Inter.* 1, 3–16.
- Costa, F. R., Lang, C., Almeida, D. R., Castilho, C. V., & Poorter, L. (2018). Near-infrared spectrometry allows fast and extensive predictions of functional traits from dry leaves and branches. *Ecological Applications*, 28(5), 1157-1167.
- Costa, F. R., Schiatti, J., Stark, S. C., & Smith, M. N. (2022). The other side of tropical forest drought: do shallow water table regions of Amazonia act as large-scale hydrological refugia from drought?. *New Phytologist*.
- Caturegli, L., Matteoli, S., Gaetani, M., Grossi, N., Magni, S., Minelli, A., ... & Volterrani, M. (2020). Effects of water stress on spectral reflectance of bermudagrass. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12.
- Chambers, J. Q. et al. Carbon sink for a century. *Nature*, 2002.
- Chavana-Bryant, C., Malhi, Y., Anastasiou, A., Enquist, B. J., Cosio, E. G., Keenan, T. F., & Gerard, F. F. (2019). Leaf age effects on the spectral predictability of leaf traits in Amazonian canopy trees. *Science of the Total Environment*, 666, 1301-1315.
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology letters*, 12(4), 351-366.

Cosme LHM, Schietti J, Costa FRC, Oliveira RS. 2017. The importance of hydraulic architecture to the distribution patterns of trees in a central Amazonian forest. *New Phytologist* 215: 113–125.

Curran, P. J. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote sensing of environment*, 30(3), 271-278.

Curran, P. J., Dungan, J. L., Macler, B. A., & Plummer, S. E. (1991). The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. *Remote Sensing of Environment*, 35(1), 69-76.

Damm, A., Paul-Limoges, E., Haghghi, E., Simmer, C., Morsdorf, F., Schneider, F. D., ... & Rascher, U. (2018). Remote sensing of plant-water relations: An overview and future perspectives. *Journal of plant physiology*, 227, 3-19.

Dank, S.M., Evans, E.H. & Whittaker P.A. 1984. Photosynthetic Systems: Structure, Function and Assembly. Wiley, New York.

Datt, B. (1999). A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves. *Journal of plant physiology*, 154(1), 30-36.

de Moura, Y. M., Galvão, L. S., Hilker, T., Wu, J., Saleska, S., do Amaral, C. H., ... & Aragão, L. E. (2017). Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and modis observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 52-64.

Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., ... & Gorné, L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167-171.

Dixon, H. H., & Joly, J. (1895). On the ascent of sap. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B: 563-576.

Doughty, C. E., Asner, G. P., & Martin, R. E. (2011). Predicting tropical plant physiology from leaf and canopy spectroscopy. *Oecologia*, 165(2), 289-299.

Doughty, C. E., Santos-Andrade, P. E., Goldsmith, G. R., Blonder, B., Shenkin, A., Bentley, L. P., ... & Malhi, Y. (2017). Can leaf spectroscopy predict leaf and forest traits along a Peruvian tropical forest elevation gradient?. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(11), 2952-2965.

Doughty, C. E., Cheesman, A. W., Riutta, T., Thomson, E. R., Shenkin, A., Nottingham, A. T., ... & Malhi, Y. (2020). Predicting tropical tree mortality with leaf spectroscopy. *Biotropica*, 53(2), 581-595.

Durgante, F.M.; Higuchi, N.; Almeida, A.; Vicentini, A. 2013. Species Spectral Signature: Discriminating closely related plant species in the Amazon with NearInfrared Leaf-Spectroscopy. *Forest Ecology and Management* 291: 240–248.

Elsayed, S., Mistele, B., & Schmidhalter, U. (2011). Can changes in leaf water potential be assessed spectrally?. *Functional Plant Biology*, 38(6), 523-533.

Ely, K. S., Burnett, A. C., Lieberman-Cribbin, W., Serbin, S. P., & Rogers, A. (2019). Spectroscopy can predict key leaf traits associated with source–sink balance and carbon–nitrogen status. *Journal of experimental botany*, 70(6), 1789-1799.

Fearnside, P. M. (2008). The roles and movements of actors in the deforestation of Brazilian Amazonia. *Ecology and society*, 13(1).

Ferraz, J.; Otha, S.; Sales, P.C. de. 1998. Distribuição dos solos ao longo de dois transectos em floresta primária ao norte de Manaus (AM), p. 111-141. In: Higuchi, N.; Campos M. A. A.; Sampaio, P. T. B.; Santos, J. (Eds). Pesquisas Florestais para a conservação da floresta e reabilitação de áreas degradadas. INPA. Manaus-AM.

Field, C. B. et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998.

Fontes, C. G., Dawson, T. E., Jardine, K., McDowell, N., Gimenez, B. O., Anderegg, L., ... & Chambers, J. Q. (2018). Dry and hot: the hydraulic consequences of a climate change–type drought for Amazonian trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760), 20180209.

Fontes, C. G., Fine, P. V., Wittmann, F., Bittencourt, P. R., Piedade, M. T. F., Higuchi, N., ... & Dawson, T. E. (2020). Convergent evolution of tree hydraulic traits in Amazonian habitats: implications for community assemblage and vulnerability to drought. *New Phytologist*, 228(1), 106-120.

Filella, I., & Penuelas, J. 1. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International journal of remote sensing*, 15(7), 1459-1470.

Fu, X., & Meinzer, F. C. (2018). Metrics and proxies for stringency of regulation of plant water status (iso/anisohdry): a global data set reveals coordination and trade-offs among water transport traits. *Tree Physiology*, 39(1), 122-134.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.

Garcia, M. N., Ferreira, M. J., Ivanov, V., Dos Santos, V. A. H. F., Ceron, J. V., Guedes, A. V., & Oliveira, R. S. (2021). Importance of hydraulic strategy trade-offs in structuring response of canopy trees to extreme drought in central Amazon. *Oecologia*, 197(1), 13-24.

Garcia, M. N., Hu, J., Domingues, T. F., Groenendijk, P., Oliveira, R. S., & Costa, F. R. (2021). Local hydrological gradients structure high intraspecific variability in plant hydraulic traits in two dominant central Amazonian tree species. *Journal of Experimental Botany*, 73(3), 939-952.

Gauí, T. D. 2013. Mudança na composição de espécies arbóreas em uma floresta de terra firme explorada experimentalmente há 25 anos na Amazônia central. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus – AM. 70p.

Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., & Weidner, V. R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied optics*, 4(1), 11-20.

Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L., ... & Neves, R. A. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 388-393.

Gimenez, B. O., Jardine, K. J., Higuchi, N., Negrón-Juárez, R. I., Sampaio-Filho, I. D. J., and Chambers, J. Q. (2019). Species-specific shifts in diurnal sap velocity dynamics and hysteretic behavior of ecophysiological variables during the 2015–2016 El Niño event in the Amazon forest. *Front. Plant Science*. 10:830.

Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 22(3), 247-252.

Hadlich, H. L., Durgante, F. M., Dos Santos, J., Higuchi, N., Chambers, J. Q., & Vicentini, A. (2018). Recognizing Amazonian tree species in the field using bark tissues spectra. *Forest ecology and management*, 427, 296-304.

Hardinsky, M. A.; Lemas, V.(1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.

Higuchi, N.; Santos J. dos; Ribeiro, R. J.; Freitas, J. V.; Vieira, G.; Cöic, A.; Minette, L. J. 1997. Crescimento e incremento de uma floresta amazônica de terra firme manejada experimentalmente. p. 88-132. In: Biomassa e nutrientes florestais: relatório final. Manaus: INPA.

Hunt Jr, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*, 30(1), 43-54.

Jacquemoud, S., & Ustin, S. (2019). *Leaf optical properties*. Cambridge University Press.

Jacquemoud, S., Ustin, S. L., Verdebout, J., Schmuck, G., Andreoli, G., & Hosgood, B. (1996). Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote sensing of environment*, 56(3), 194-202.

Jarvis, P. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 273: 593-610.

Jasechko, S.; Sharp, Z. D.; Gibson, J. J.; Birks, S. J.; Fawcett, P. J. (2013) Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496: 347-350.

Jensen, J. R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Pearson Education India.

Kokaly, R. F., Clark, R. N., & Livo, K. E. (1998, January). Mapping the biology and mineralogy of Yellowstone National Park using imaging spectroscopy. In *JPL Airborne Earth Science Workshop* (Vol. 7, pp. 97-21).

Lambers, H.; Chapin III, F.S.; Pons, T.L. (2008). *Plant Physiological Ecology* (Second Edition). Springer.

Lamour, J., Davidson, K. J., Ely, K. S., Anderson, J. A., Rogers, A., Wu, J., & Serbin, S. P. (2021). Rapid estimation of photosynthetic leaf traits of tropical plants in diverse environmental conditions using reflectance spectroscopy. *Plos one*, 16(10), e0258791.

Lamour, J., Souza, D. C., Gimenez, B. O., Higuchi, N., Chave, J., Chambers, J., & Rogers, A. (2023). Wood-density has no effect on stomatal control of leaf-level water use efficiency in an Amazonian forest. *Plant, Cell & Environment*.

Le Maire, G., François, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailier, J. Y., Bréda, N., ... & Dufrêne, E. (2008). 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*, 112(10), 3846-3864.

Liu, J., Han, J., Chen, X., Shi, L., & Zhang, L. (2019). Nondestructive detection of rape leaf chlorophyll level based on Vis-NIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 222, 117202.

Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. 2006. World Map of the open Geiger climate classification update. *Meteorology*, 15: 259-263.

Kunert, N., Aparecido, L. M. T., Wolff, S., Higuchi, N., dos Santos, J., de Araujo, A. C., & Trumbore, S. (2017). A revised hydrological model for the Central Amazon: The 102 importance of emergent canopy trees in the forest water budget. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, 47-57.

Kovar, M., Brestic, M., Sytar, O., Barek, V., Hauptvogel, P., & Zivcak, M. (2019). Evaluation of hyperspectral reflectance parameters to assess the leaf water content in soybean. *Water*, 11(3), 443.

Makarieva, A. M., & Gorshkov, V. G. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and earth system sciences*, 11(2), 1013-1033.

Malhi, Y. 2012. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *Journal of Ecology* 100: 65–75.

Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science* 319, 169-172.

Martínez-Vilalta, J., & Garcia-Forner, N. (2017). Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant, cell & environment*, 40(6), 962-976.

Maréchaux, I., Bartlett, M. K., Sack, L., Baraloto, C., Engel, J., Joetzjer, E., & Chave, J. (2015). Drought tolerance as predicted by leaf water potential at turgor loss point varies strongly across species within an Amazonian forest. *Functional Ecology*, 29(10), 1268-1277.

McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., ... & Yezzer, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New phytologist*, 178(4), 719-739.

Méndez-Alonzo, R., Paz, H., Zuluaga, R. C., Rosell, J. A., & Olson, M. E. (2012). Coordinated evolution of leaf and stem economics in tropical dry forest trees. *Ecology*, 93(11), 2397-2406.

Meinzer, F. C., James, S. A., & Goldstein, G. (2004). Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees. *Tree Physiology* 24(8): 901-909.

Moreira, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 105 p.

Nardoto, G. B., Ometto, J. P. H. B., Ehleringer, J. R., Higuchi, N., Bustamante, M. M. D. C., & Martinelli, L. A. (2008). Understanding the influences of spatial patterns on N availability within the Brazilian Amazon forest. *Ecosystems*, 11, 1234-1246.

- Novo, E. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010.
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189(2), 375-394.
- Oliveira, L. F. R. D., Oliveira, M. L. R. D., Gomes, F. S., & Santana, R. C. (2017). Estimating foliar nitrogen in Eucalyptus using vegetation indexes. *Scientia Agricola*, 74, 142-147.
- Onoda, Y., Wright, I. J., Evans, J. R., Hikosaka, K., Kitajima, K., Niinemets, Ü., ... & Westoby, M. (2017). Physiological and structural tradeoffs underlying the leaf economics spectrum. *New Phytologist*, 214(4), 1447-1463.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in plant science*, 5, 86.
- Pallardy, S. G. (2010). Physiology of woody plants. *Academic Press (Elsevier)*.
- Pasquini, C. 2003. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 14: 198–219.
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Vyvyan, J. A. (2014). *Introduction to spectroscopy. Cengage learning*.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Save, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International journal of remote sensing*, 14(10), 1887-1905.
- Peñuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International journal of remote sensing*, 18(13), 2869-2875.
- Peñuelas, J., & Filella, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in plant science*, 3(4), 151-156.
- Peñuelas, J., & Inoue, Y. (1999). Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. *Photosynthetica*, 36(3), 355-360.
- Pereira, E. da C. Silva, C. F. da; Mesquita, M. R.; Procópio, L. C. 1999. Flora da Reserva Ducke: guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central. Manaus: INPA. p. 816.

Phillips, O. L. et al. The changing Amazon forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1498, p. 1819–1827, 2008.

Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., & Kuplich, T. M. (2012). Sensoriamento remoto da vegetação. Oficina de Textos.

Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New phytologist*, 182(3), 565-588.

Poorter, L., Rozendaal, D. M., Bongers, F., de Almeida-Cortez, J. S., Almeyda Zambrano, A. M., Álvarez, F. S., ... & Westoby, M. (2019). Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time. *Nature ecology & evolution*, 3(6), 928-934.

Ribeiro, J. E. L da S.; Hopkins, M. J. G.; Vicentini, A.; Sothers, C. A.; Costa, M. A. da S.; Brito, J. M. de; Souza, M. A. D. de; Martins, L. H. P.; Lohmann, L. G.; Assunção, P. A. C. L.;

Rowland, L., Da Costa, A. C. L., Galbraith, D. R., Oliveira, R. S., Binks, O. J., Oliveira, A. A. R., ... & Ferreira, L. V. (2015). Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, 528(7580): 119-122.

Sack, L., Cowan, P. D., Jaikumar, N., & Holbrook, N. M. (2003). The ‘hydrology’ of leaves: co-ordination of structure and function in temperate woody species. *Plant, Cell & Environment*, 26(8), 1343-1356.

Salati, E., & Vose, P. B. (1984). Amazon basin: a system in equilibrium. *Science*, 225(4658), 129-138.

Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668), 339-346.

Serbin, S. P., Dillaway, D. N., Kruger, E. L., & Townsend, P. A. (2012). Leaf optical properties reflect variation in photosynthetic metabolism and its sensitivity to temperature. *Journal of Experimental Botany*, 63(1), 489-502.

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. *Ecological Applications*, 24(7), 1651-1669.

Serbin, S. P., Wu, J., Ely, K. S., Kruger, E. L., Townsend, P. A., Meng, R., ... & Rogers, A. (2019). From the Arctic to the tropics: multibiome prediction of leaf mass per area using leaf reflectance. *New Phytologist*, 224(4), 1557-1568.

Serrano, L., Penuelas, J., & Ustin, S. L. (2002). Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote sensing of Environment*, 81(2-3), 355-364.

Silva, R. P. D. (2007). Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Tese de Doutorado.

Silva-Perez, V., Molero, G., Serbin, S. P., Condon, A. G., Reynolds, M. P., Furbank, R. T., & Evans, J. R. (2018). Hyperspectral reflectance as a tool to measure biochemical and physiological traits in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 69(3), 483-496.

Spanner, G. C., Gimenez, B. O., Wright, C. L., Menezes, V. S., Newman, B. D., Collins, A. D., ... & Warren, J. M. (2022). Dry Season Transpiration and Soil Water Dynamics in the Central Amazon. *Frontiers in plant science*, 13.

Suwa, R., Sakai, T., dos SANTOS, J., da SILVA, R. P., Kajimoto, T., Ishizuka, M., & Higuchi, N. (2013). Significance of topographic gradient in stem diameter-height allometry for precise biomass estimation of a tropical moist forest in the central Amazon. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 47(1), 109-114.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2009). Fisiologia vegetal. In *Fisiologia vegetal*.

Strabeli, T. F., Fiorio, P. R., Ré, N. C., Alvares, C. A., Luciano, A. C. D. S., & Nakai, É. S. (2023). Modelos espectrais para a estimativa do conteúdo de água em folhas de Eucalyptus. *Scientia Forestalis*, *51*, 1-17.

TOMASELLA, J. et al. The water balance of an Amazonian micro-catchment: The effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrological Processes*, 2008.

Thomson, E. R., Malhi, Y., Bartholomeus, H., Oliveras, I., Gvozdevaite, A., Peprah, T., ... & Doughty, C. E. (2018). Mapping the leaf economic spectrum across West African tropical forests using UAV-acquired hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, *10*(10), 1532.

Thompson, M. V. et al. Change in net primary production and heterotrophic respiration: How much is necessary to sustain the terrestrial carbon sink? *Global Biogeochemical Cycles*, 1996.

Wang, R., He, N., Li, S., Xu, L., & Li, M. (2021). Spatial variation and mechanisms of leaf water content in grassland plants at the biome scale: evidence from three comparative transects. *Scientific reports*, *11*(1), 1-12.

Wang, Y., Xiang, J., Tang, Y., Chen, W., & Xu, Y. (2022). A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry. *Applied Spectroscopy Reviews*, *57*(4), 300-317.

Wang, J., Yang, D., Detto, M., Nelson, B. W., Chen, M., Guan, K., ... & Wu, J. (2020). Multi-scale integration of satellite remote sensing improves characterization of dry-season green-up in an Amazon tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, *246*, 111865.

Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., ... & Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, *428*(6985), 821-827.

Wu, J., Albert, L. P., Lopes, A. P., Restrepo-Coupe, N., Hayek, M., Wiedemann, K. T., ... & Saleska, S. R. (2016). Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. *Science*, *351*(6276), 972-976.

Wu, J., Rogers, A., Albert, L. P., Ely, K., Prohaska, N., Wolfe, B. T., ... & Serbin, S. P. (2019). Leaf reflectance spectroscopy captures variation in carboxylation capacity across species, canopy environment and leaf age in lowland moist tropical forests. *New Phytologist*, 224(2), 663-674.

Wu, J., Serbin, S. P., Ely, K. S., Wolfe, B. T., Dickman, L. T., Grossiord, C., ... & Rogers, A. (2020). The response of stomatal conductance to seasonal drought in tropical forests. *Global change biology*, 26(2), 823-839.

Xie, Q., Dash, J., Huang, W., Peng, D., Qin, Q., Mortimer, H., ... & Ye, H. (2018). Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index retrieval. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 11(5), 1482-1493.