

BEATRIZ LOURENÇO MANZATO

**PREDIÇÃO DE NÍVEIS DE NITROGÊNIO EM MUDAS DE *Eucalyptus*
spp. POR MEIO DE ESPECTRORRADIOMETRIA**

BOTUCATU

2023

BEATRIZ LOURENÇO MANZATO

**PREDIÇÃO DE NÍVEIS DE NITROGÊNIO EM MUDAS DE *Eucalyptus*
spp. POR MEIO DE ESPECTRORRADIOMETRIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutora em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. José Raimundo de
Souza Passos

Botucatu

2023

M296p

Manzato, Beatriz Lourenço

Predição de níveis de nitrogênio em mudas de
Eucalyptus spp. por meio de espectrorradiometria / Beatriz
Lourenço Manzato. -- Botucatu, 2024

90 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: José Raimundo de Souza Passos

1. Espectroscopia de Infravermelho. 2. Análise
espectral. 3. Nutrição florestal. 4. Nitrogênio foliar. 5.
Viveiros florestais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

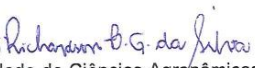
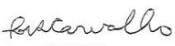
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

PREDIÇÃO DE NÍVEIS DE NITROGÊNIO EM MUDAS DE *Eucalyptus* spp. POR MEIO DE
ESPECTRORRADIOMETRIA

AUTORA: BEATRIZ LOURENÇO MANZATO

ORIENTADOR: JOSÉ RAIMUNDO DE SOUZA PASSOS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciência Florestal,
pela Comissão Examinadora:
Prof. Dr. JOSÉ RAIMUNDO DE SOUZA PASSOS (Participação Presencial)
Bioestatística Biologia Vegetal Parasitologia e Zoologia / Instituto de Biociências de Botucatu UNESP
Prof. Dr. FELIPE GIROTTTO CAMPOS (Participação Presencial)
Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP
Prof. Dr. JOÃO RICARDO FAVAN (Participação Presencial)
Big Data no Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Pompéia
Prof. Dr. RICHARDSON BARBOSA GOMES DA SILVA (Participação Presencial)
Pós-Doutorando - Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas
de Botucatu
Prof.ª. Dr.ª. LIDIA RAQUEL DE CARVALHO (Participação Presencial)
Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Botucatu, 18 de dezembro de 2023.

Aos meus pais, Cecília e Roberto e
à minha irmã gêmea Caroline,
Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de tudo, agradeço a Deus, por ser minha maior inspiração e nunca me abandonar nas horas mais difíceis. Sem Ele, jamais teria chegado até aqui.

Aos meus pais Cecília e Roberto por todo apoio, incentivo e palavras de encorajamento para que eu pudesse ter mais uma conquista em minha vida.

À minha irmã gêmea Caroline, por me ajudar na realização da parte prática e de algumas correções no trabalho e também pelas palavras de encorajamento.

Ao Claudinho do viveiro da FCA Unesp de Botucatu, pelos ensinamentos.

À Karla, aluna do PG em Ciência Florestal da FCA Unesp de Botucatu, pela ajuda com a fertirrigação das mudas.

Aos Profs. Drs. Maurício Acconcia Dias, Richardson Barbosa Gomes da Silva, Felipe Giroto Campos e à Profa. Dra. Lídia Raquel de Carvalho pelas correções e contribuições que fizeram para que o trabalho pudesse ser aprimorado.

Ao Prof. Dr. João Ricardo Favan, pela ajuda com a organização dos dados da reflectância foliar.

À Profa. Dra. Magali Ribeiro da Silva, pela ajuda com a metodologia e a instalação do experimento no viveiro da FCA Unesp de Botucatu.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. José Raimundo de Souza Passos, por tudo que pude aprender com seus ensinamentos.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp de Botucatu, em especial ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade em poder desenvolver meu projeto e conquistar o título de Doutora em Ciência Florestal.

À toda equipe da Biblioteca “Prof. Paulo de Carvalho Mattos” e da Seção Técnica de Pós-graduação da FCA Unesp de Botucatu, pela atenção em que tiveram com os esclarecimentos das minhas dúvidas e ajuda com o que eu precisei.

À Capes, pelo auxílio financeiro concedido por meio da bolsa de estudo, código de financiamento 001.

“É melhor obter sabedoria do que ouro! É melhor obter entendimento do que prata!”

Provérbios 16-16

“Pois a sabedoria é mais preciosa do que rubis; nada do que vocês possam desejar compara-se a ela. “Eu, a sabedoria, moro com a prudência, e tenho conhecimento que vem do bom senso”. Provérbios 8-12

RESUMO

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é o gênero florestal que compõe a maior parte dos povoamentos florestais no Brasil. Uma das etapas mais importantes no estabelecimento de povoamentos florestais é a produção de mudas. A nutrição das mudas e o uso de substratos de cultivo apropriados são fatores essenciais para este processo. Com a falta ou excesso nutricional, ocorrem diferentes processos nas plantas, como alteração molecular; lesão subcelular; alteração celular; modificação no tecido, e por último, a manifestação visível do sintoma de deficiência ou toxicidade nutricional. Os métodos convencionais de diagnose de estresse nutricional apresentam algumas limitações. Como alternativa, o uso de novas tecnologias de sensoriamento remoto, como a espectrometria no infravermelho-próximo e de ondas curtas (NIR-SWIR) permite prever por meio da resposta espectral das folhas seu estado nutricional e um maior controle e precisão do manejo nutricional nos viveiros florestais. O presente trabalho teve por objetivo avaliar se é possível prever a concentração de nitrogênio em mudas *Eucalyptus urophylla* (clone I144) por meio da espectrometria de infravermelho próximo e de ondas curtas (NIR-SWIR). Por meio da espectrometria de infravermelho próximo e de ondas curtas foi possível identificar os tratamentos em que as mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) foram submetidas.

Palavras-Chave: Espectroscopia; NIR-SWIR; Nutrição Florestal; Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Eucalyptus (*Eucalyptus* spp.) is the forest genus that makes up the majority of forest stands in Brazil. One of the most important steps in establishing forest stands is the production of seedlings. Seedling nutrition and the use of appropriate growing substrates are essential factors for this process. With a lack or excess of nutrition, different processes occur in plants, such as molecular changes; subcellular injury; cellular change; modification in the tissue, and finally, the visible manifestation of the symptom of nutritional deficiency or toxicity. Conventional methods for diagnosing nutritional stress have some limitations. As an alternative, the use of new remote sensing technologies, such as near-infrared and short-wave spectrometry (NIR-SWIR), allows the nutritional status of leaves to be predicted through the spectral response and greater control and precision of nutritional management in forest nurseries. The present work aimed to evaluate whether it is possible to predict the nitrogen concentration in *Eucalyptus urophylla* seedlings (clone I144) using Near-Infrared and Shortwave Spectrometry (NIR-SWIR). Using near-infrared and short-wave spectrometry, it was possible to identify the treatments to which *Eucalyptus urophylla* seedlings (clone I144) were subjected.

Keywords: Near-Infrared Spectroscopy; Forest Nutrition; Remote Sensing Techniques.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1	<i>Eucalyptus</i> spp.....	22
2.2	Nutrição de plantas em viveiros florestais.....	23
2.3	Importância do Nitrogênio para as plantas.....	27
2.4	Estresse nutricional.....	28
2.5	Diagnoses dos sintomas de estresse nutricional.....	29
2.5.1	Diagnose Visual.....	30
2.5.2	Diagnose Foliar.....	31
2.6	Radiação Eletromagnética (REM) e sua Interação com a Vegetação.....	32
2.7	Espectrorradiometria de reflectância.....	36
2.8	Predição da Composição foliar por meio de Espectrometria de Infravermelho próximo (NIR).....	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1	Área de estudo.....	41
3.2	Material genético.....	41
3.3	Delineamento Experimental.....	42
3.4	Aplicação dos tratamentos e manejo hídrico.....	43
3.5	Procedimentos da aquisição das reflectâncias foliares.....	44
3.6	Metodologia estatística.....	46
3.6.1	Estudo descritivo dos dados de reflectância foliar.....	46
3.6.2	Redução da dimensionalidade dos dados de reflectância foliar - Componentes Principais.....	46
3.6.3	Efeito dos tratamentos no primeiro componente principal – Modelos Lineares Generalizados.....	47
3.6.4	Efeito dos tempos no primeiro componente principal – Modelos Lineares Normais.....	48
3.6.5	Simulação <i>Bootstrap</i> aplicada à classificação dos tratamentos.....	48
3.6.6	Redução da dimensionalidade dos dados de reflectância foliar – Componentes Principais.....	50
3.6.7	Classificação dos tratamentos pelo Modelo Logístico Multinomial e Função Linear/Quadrática Discriminante.....	50

3.6.8 Seleção dos melhores modelos.....	51
3.7 Resumo da metodologia estatística.....	51
4 Resultados e Discussão.....	53
4.1 Estudo descritivo dos dados de reflectância foliar.....	53
4.2 Redução da dimensionalidade dos dados de reflectância – Componentes Principais.....	57
4.3 Efeito dos tratamentos no primeiro componente principal - Modelos Lineares Generalizados.....	60
4.4 Efeito dos tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos no primeiro componente principal (prin1) - Modelos de Regressão Lineares Generalizados.....	66
4.5 Classificação dos tratamentos pelo Modelo Logístico Multinomial e Função Linear/Quadrática Discriminante.....	68
4.5.1 Seleção dos melhores modelos.....	69
CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS.....	73
APÊNDICE A - Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem <i>bootstrap</i> , segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....	83
APÊNDICE A (continuação) - Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem <i>bootstrap</i> , segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....	84
APÊNDICE B – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem <i>bootstrap</i> , segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....	85
APÊNDICE B (continuação) – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem <i>bootstrap</i> , segundo categorias de tratamentos e do modelo	

logístico multinomial para o tempo 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....86

APÊNDICE C – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 16 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....87

APÊNDICE C (continuação) – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 16 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....88

APÊNDICE D – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....89

APÊNDICE D (continuação) – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.....90

1 INTRODUÇÃO

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é o gênero florestal que compõe a maior parte dos povoamentos florestais no Brasil (EMBRAPA, 2014). A área total plantada com eucalipto no Brasil em 2021 foi de 7,53 milhões de hectares, com produtividade média de 36,0 m³/ha/ano, destacando-se principalmente os estados de Minas Gerais (30%), Mato Grosso do Sul (14%) e São Paulo (13%) (IBÁ, 2022).

Entretanto, o sucesso dos povoamentos florestais se deve a diversos fatores, como práticas silviculturais, melhoramento genético, solo, produção de mudas florestais, entre outros.

Obter mudas de qualidade do ponto de vista nutricional é essencial para o êxito de plantios florestais, sendo os viveiros, o início de todo um ciclo produtivo, representando o início da cadeia produtiva do estabelecimento florestal (HIGASHI; SILVEIRA, 2004). As plantas necessitam de nutrientes essenciais em doses adequadas, pois quando inadequadas se tornam limitantes para seu desenvolvimento e sobrevivência.

Se no viveiro não forem produzidas mudas com manejos (hídrico, nutricional, fitossanitário, entre outros) adequados, refletindo em mudas de qualidade, quando as mesmas forem levadas a campo, as suas chances de sobrevivência e consequentemente, seu estabelecimento serão diminuídos.

Apesar da literatura indicar valores de referência, cada viveiro adota uma recomendação nutricional para as espécies do gênero *Eucalyptus*, a qual, na maioria dos casos, é baseada na experiência de cada viveirista.

Entretanto, com a adoção dessas medidas, as mudas podem sofrer algum tipo de estresse nutricional pela falta ou excesso de nutrientes. Porém, se as plantas estiverem sob estresse nutricional, o mesmo se manifestará visualmente, e quando isso ocorre, a produtividade e sobrevivência das mesmas podem ter sido comprometidas.

Normalmente, não é uma prática adotada pelos viveiros florestais realizar diagnose foliar para o diagnóstico do estado nutricional das mudas, devido ser uma análise destrutiva, de alto custo, demandar tempo necessário para sua realização e não ser possível realizar uma correção nutricional antes do desenvolvimento das plantas terem sido comprometidos.

São realizadas intervenções no manejo nutricional quando é observado a ocorrência de sintomas visuais característicos ocasionados pela falta ou excesso de determinado nutriente (diagnose visual). Mas, a diagnose visual não fornece dados da magnitude dos danos causados, e quando surgem os sintomas, ocorreram diversos processos metabólicos que muitas vezes são irreversíveis, o que dificulta na tomada de decisão do manejo nutricional resultando em perdas significativas na produção de mudas de eucalipto, e conseqüentemente sua sobrevivência após o plantio em campo.

Visto que os métodos convencionais envolvendo as diagnoses visuais e foliares do estado nutricional das plantas, principalmente das mudas florestais, possuem algumas limitações, faz-se necessário minimizá-las por meio do desenvolvimento e adoção de novas tecnologias.

O uso de novas tecnologias de sensoriamento remoto, como a espectrometria nas faixas espectrais do infravermelho-próximo (NIR) e de ondas curtas (SWIR) pode representar uma alternativa, visando complementar esses métodos de diagnoses convencionais.

A NIRS permite identificar a nível celular modificações das estruturas das folhas das plantas, portanto, a técnica possui potencial em prever por meio da resposta espectral das folhas seu estado nutricional, e com isso, possibilitar um maior controle e precisão do manejo nutricional nos viveiros florestais.

Desse modo, corroborando para um manejo nutricional mais eficiente, tanto do ponto de vista ambiental, quanto econômico, minimizando o uso excessivo dos recursos naturais e, conseqüentemente, reduzindo custos e fornecendo às plantas, os nutrientes requeridos para seu desenvolvimento em quantidades adequadas, sem que haja dosagem inferior ou superdosagem.

O emprego da NIRS também poderá possibilitar a identificação de estresses nutricionais e a possível correção do manejo nutricional nos viveiros florestais antes do surgimento dos sintomas visuais característicos provenientes da deficiência ou toxicidade, pois permite identificar a nível celular as mudanças nos processos fisiológicos das plantas por meio do seu comportamento espectral. Essa característica (predição) da NIRS permitirá que os danos provenientes do estresse nutricional sejam evitados, devido a técnica prever desde a primeira mudança na reflectância foliar se as mudas estão com alguma alteração celular decorrente de estresse nutricional, e

consequentemente dar suporte aos viveiristas na tomada de decisão antes das mudas desenvolverem os sintomas e prejudicar seu desenvolvimento.

O presente trabalho teve por objetivo geral avaliar se é possível prever diferentes níveis de nitrogênio em mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) por meio da Espectrometria de Infravermelho-Próximo e de ondas curtas (NIR-SWIR).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Eucalyptus* spp.

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) pertence à família das Mirtáceas (Angiospermas) (DOS SANTOS et al., 2001; VIANA, 2004), sendo originário da Austrália (MARTINI, 2004; FREITAG, 2007; SCOLFORO, 2008; CIB, 2014; COSTA; OLIVEIRA, 2019), Tasmânia (PINTO JÚNIOR et al., 2014); Timor, Indonésia (CIB, 2014) e outras ilhas da Oceania (PINTO JÚNIOR et al., 2014; COSTA; OLIVEIRA, 2019). Entretanto, as espécies *E. urophylla* e *E. deglupta* não ocorrem naturalmente na Austrália (MARTINI, 2004).

O gênero *Eucalyptus* spp. possui cerca de 730 espécies descritas pela botânica, porém, somente 20 espécies são plantadas para fins comerciais nas diferentes regiões do mundo (PINTO JÚNIOR et al., 2014).

No Brasil, as espécies de eucalipto mais cultivadas são *E. urophylla*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*) (CIB, 2014; PINTO JÚNIOR et al., 2014; EMBRAPA, 2019) e *E. camaldulensis* (CIB, 2014).

Devido à grande diversidade de espécies (WILCKEN et al., 2008); sua adaptabilidade às diferentes condições climáticas e edáficas (GONZÁLEZ, 2002; FREITAG, 2007); rápido crescimento e alta produtividade (DE AMORIM et al., 2021), o eucalipto, pode ser utilizado como fonte de energia (lenha e carvão) (GONZÁLEZ, 2002; FREITAG, 2007; WILCKEN et al., 2008; GOULART et al., 2012; PINTO JÚNIOR et al., 2014; COSTA; OLIVEIRA, 2019; RODRIGUES, 2021) para produzir o ferro gusa e o ferro liga (COSTA; OLIVEIRA, 2019); na fabricação de móveis (WILCKEN et al., 2008; COSTA; OLIVEIRA, 2019; DE AMORIM et al., 2021); painéis de madeira (DE AMORIM et al., 2021); madeira processada; celulose (GONZÁLEZ, 2002; VIANA, 2004; FREITAG, 2007; WILCKEN et al., 2008; COSTA; OLIVEIRA, 2019; DE AMORIM et al., 2021; RODRIGUES, 2021) e papel (GONZÁLEZ, 2002; VIANA, 2004; WILCKEN et al., 2019; COSTA; OLIVEIRA, 2019; DE AMORIM et al., 2021; RODRIGUES, 2021); construção civil; postes (GONZÁLEZ, 2002; WILCKEN et al., 2008) e mourões (WILCKEN et al., 2008); madeira processada (GONZÁLEZ, 2002; FREITAG, 2007); óleos essenciais (VITTI; BRITO, 2003; WILCKEN et al., 2008; PINTO JÚNIOR et al., 2014).

No Brasil, as plantações de eucalipto são mais produtivas, ao serem comparadas com outras regiões do mundo (IBÁ, 2016). Em 2021, a área plantada com espécies do gênero eucalipto foi de 7,47 milhões de hectares, com uma produtividade média de 38,9 m³/ha/ano (IBÁ, 2021).

Essa alta produtividade se deve aos processos tecnológicos e inovadores empregados na eucaliptocultura brasileira (FOELKEL, 2005). Dentre esses processos, podem se destacar a geração de conhecimento e desenvolvimento de produtos e processos nas áreas de silvicultura, manejo, conservação, melhoramento genético, proteção e tecnologia da madeira do gênero eucalipto (GRATTAPAGLIA, 2021), os fatores edafoclimáticos favoráveis para o desenvolvimento do gênero em diferentes regiões do país (SCANAVACA JUNIOR; GARCIA, 2003) e a evolução das práticas adotadas nos viveiros florestais, como a utilização de recipientes adequados para cada tipo de substrato, métodos de propagação e a infraestrutura adequada para cada fase de desenvolvimento das mudas (STAPE et al., 2001).

Entretanto, a produtividade do eucalipto pode ser prejudicada por diferentes fatores bióticos (pragas e doenças) e abióticos (clima, solo, irrigação, nutrição). Dentre esses fatores, a nutrição de plantas adequada é de extrema importância, principalmente nos viveiros florestais, devido aos nutrientes serem essenciais para o desenvolvimento e sobrevivência vegetais.

2.2 Nutrição de plantas em viveiros florestais

Uma das etapas mais importantes no estabelecimento de povoamentos florestais é a produção de mudas (DEL QUIQUI et al., 2004), tanto em quantidade, quanto em qualidade (GONÇALVES et al., 2000; SILVA; WICHERT, 2008), sendo a qualidade das mudas florestais um fator fundamental para o sucesso das florestas (SILVA; WICHERT, 2008). Mudanças com qualidade, são aquelas plantas que possuem atributos necessários para que consigam sobreviver e se desenvolver após o plantio no campo (DURYEA, 1985) sob as condições ambientais adversas.

Esses atributos podem ser morfológicos, analisando as características das mudas, como por exemplo, altura da parte aérea; desenvolvimento do sistema radicular; fitossanitários (pragas ou doenças); nutricionais (sintomas de deficiência ou toxicidade), entre outros.

Produzir mudas de qualidade reflete em plantas mais resistentes às condições ambientais adversas das áreas de plantio florestal, e conseqüentemente, com maior taxa de sobrevivência após o plantio, devido às plantas estarem bem desenvolvidas e com crescimento satisfatório (WENDLING et al., 2021).

Quando o processo produtivo das mudas é bem realizado, produz-se mudas de qualidade em quantidade suficiente para atender e suprir a demanda para a instalação dos povoamentos florestais bem sucedidos.

O entendimento sobre a nutrição das mudas e o uso de substratos de cultivo apropriados são fatores essenciais para este processo (GONÇALVES et al., 2000; DEL QUIQUI et al., 2004), pois é por meio do solo, substrato ou solução nutritiva que as plantas obtêm os elementos minerais essenciais para seu desenvolvimento, mas quando as exigências nutricionais das plantas não são supridas pelo meio de cultivo, há redução do crescimento e da sua produtividade, devido a deficiência nutricional (FAQUIN, 2002).

Os substratos comerciais utilizados para a produção de mudas de espécies arbóreas muitas vezes não suprem as quantidades necessárias dos nutrientes, havendo assim a necessidade de enriquecê-los com fertilizantes para aumentar a sua eficiência nutricional (MORAES NETO et al., 2003; SCHEER et al., 2010).

Os viveiros florestais utilizam para a nutrição das mudas principalmente fertilizantes químicos (RIBEIRO et al., 2001), com o intuito de controlar o tamanho e vigor das mudas (RIBEIRO et al., 2001; PAIVA; GOMES, 1993), devido aos fertilizantes fornecerem os elementos essenciais para as plantas realizarem diferentes atividades bioquímicas (CAMARGO, 2012).

A nutrição das mudas nos viveiros florestais é realizada por meio de solução nutritiva e existem diferentes maneiras para sua aplicação, como aspersão, microaspersão, gotejamento ou manual (regador) (HIGASHI et al., 2000). O emprego da maneira de aplicação da solução nutritiva, se deve à infraestrutura de cada viveiro empregada nas diferentes etapas de desenvolvimento das mudas (casa de vegetação, casa de aclimação ou de sombra e as áreas a pleno sol).

Os elementos químicos requeridos pelas plantas independentemente da espécie são divididos em macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn). A nomenclatura macro e micronutrientes são utilizadas devido às quantidades requeridas pelas espécies vegetais de determinados nutrientes. Ou seja, as plantas precisam de maiores quantidades dos nutrientes classificados como

macronutrientes, e menores quantidades dos nutrientes classificados como micronutrientes. Por exemplo, a quantidade requerida de nitrogênio (N) por uma planta é maior do que a quantidade de zinco (Zn).

Os macros e micronutrientes são os elementos minerais essenciais para o desenvolvimento das plantas, devido às funções de cada nutriente exercidas no metabolismo e no funcionamento normal das plantas. Se as plantas recebem esses elementos, assim como água e energia solar, elas sintetizam todos os compostos necessários para seu desenvolvimento (TAIZ et al., 2017) e sobrevivência.

A nutrição adequada é de extrema importância para as plantas, principalmente na fase de mudas. Nessa etapa de desenvolvimento, as plantas precisam dos nutrientes em quantidades ideais para seu pleno desenvolvimento (BRASIL et al., 1999).

Nos viveiros florestais, o manejo nutricional adotado é diferente nas distintas fases da produção de mudas de eucalipto. A primeira fertilização de crescimento das mudas ocorre na casa de aclimação (ou casa de sombra) (DA SILVA et al., 2022), sendo a concentração dos nutrientes compreendida entre 100 a 200 mg L⁻¹ de N; 15 a 30 mg L⁻¹ de P; 100 a 200 mg L⁻¹ de K; 100 a 200 mg L⁻¹ de Ca; 25 a 50 mg L⁻¹ de Mg; 35 a 65 mg L⁻¹ de S; 0,3 a 0,6 mg L⁻¹ de B; 0,03 a 0,06 mg L⁻¹ de Cu; 3,0 a 7,0 mg L⁻¹ de Fe; 0,3 a 0,8 mg L⁻¹ de Mn; 0,01 a 0,02 mg L⁻¹ de Mo e 0,05 a 0,1 mg L⁻¹ de Zn (HIGASHI; SILVEIRA, 2006), sendo aplicados diariamente.

Na área a pleno sol (fase de crescimento), a concentração dos nutrientes e a periodicidade são modificados, principalmente no aumento expressivo de nitrogênio (DA SILVA et al., 2022), e ao invés das plantas receberem os nutrientes diariamente, estes, são aplicados semanalmente, em uma concentração compreendida entre 500 a 1500 mg L⁻¹ de N; 150 a 300 mg L⁻¹ de P; 400 a 800 mg L⁻¹ de K; 300 a 500 mg L⁻¹ de Ca; 80 a 200 mg L⁻¹ de Mg; 100 a 250 mg L⁻¹ de S; 0,3 a 0,6 mg L⁻¹ de B; 0,03 a 0,06 mg L⁻¹ de Cu; 3,0 a 7,0 mg L⁻¹ de Fe; 0,3 a 0,8 mg L⁻¹ de Mn; 0,01 a 0,02 mg L⁻¹ de Mo e 0,05 a 0,1 mg L⁻¹ de Zn (HIGASHI; SILVEIRA, 2006).

Quando as mudas estão quase na fase de expedição, ou seja, antes de serem plantadas a campo, as mesmas são submetidas ao processo de rustificação, com o objetivo de serem desenvolvidas raízes mais espessas e caule mais lignificado (DA SILVA et al., 2022) para que, ao serem plantadas a campo, sejam minimizados os efeitos ambientais adversos à sobrevivência inicial das plantas a campo (SILVEIRA et al., 2001).

Nessa fase, a concentração dos nutrientes é compreendida entre 0 a 100 mg L⁻¹ de N; 100 a 300 mg L⁻¹ de P; 500 a 1000 mg L⁻¹ de K; 300 a 500 mg L⁻¹ de Ca; 80 a 200 mg L⁻¹ de Mg; 50 a 100 mg L⁻¹ de S; (0,3 a 0,6 mg L⁻¹ de B; 0,03 a 0,06 mg L⁻¹ de Cu; 3,0 a 7,0 mg L⁻¹ de Fe; 0,3 a 0,8 mg L⁻¹ de Mn; 0,01 a 0,02 mg L⁻¹ de Mo e 0,05 a 0,1 mg L⁻¹ de Zn, sendo submetidas a esse manejo nutricional semanalmente (HIGASHI; SILVEIRA, 2006).

Porém, quando as doses de fertilizantes aplicadas nas plantas são insuficientes (MALAVOLTA et al., 1989; CAMARGO, 2012; FAQUIN, 2012) ou excessivas (MALAVOLTA et al., 1989; FAQUIN, 2012), as plantas não conseguem completar seu ciclo de vida (CAMARGO, 2012), ocorrendo danos ao crescimento, consequentemente perda em sua produtividade (MALAVOLTA et al., 1989) e sua qualidade é comprometida, podendo acarretar em sua morte (CAMARGO, 2012).

Com isso, podem surgir sintomas visíveis de estresse nutricional característicos de determinado elemento mineral (FAQUIN, 2012; TAIZ et al., 2017), ocasionados pelo distúrbio nutricional (TAIZ et al., 2017), uma vez que o estresse nutricional modifica as estruturas anatômicas e as propriedades bioquímicas das plantas (SILVEIRA; HIGASHI, 2003), visto que os macro e micronutrientes participam de diferentes processos vitais às plantas (CARVALHO NETO et al., 2012).

No processo de produção de mudas, o aspecto nutricional das plantas precisa ser acompanhado criteriosamente, pois se houver falta ou excesso de nutrientes, o crescimento é prejudicado (GONÇALVES et al., 2000).

Os principais problemas nutricionais encontrados nos viveiros florestais com maior frequência são os relacionados à toxicidade e a desequilíbrios nutricionais (SILVEIRA et al., 2000).

O desequilíbrio nutricional é um dos fatores que contribui para o estresse nas plantas. O estresse nutricional não causa somente problemas relacionados ao desenvolvimento vegetal (altura, desenvolvimento de folhas e da parte radicular e produtividade), mas também é um fator que pode provocar outros danos às plantas, como por exemplo, favorecer o surgimento de patógenos, causando ainda mais danos às plantas e dificultando ainda mais a diagnose visual, devido a alguns sintomas característicos de alguns patógenos serem semelhantes àqueles causados por desequilíbrios nutricionais.

Entretanto, quando os sintomas visuais de estresse nutricional aparecem, os efeitos negativos da falta ou excesso dos nutrientes, são praticamente impossíveis de

serem revertidos, devido ao sintoma visual ser a manifestação visual de vários processos metabólicos que já ocorreram na planta, como alteração molecular; lesão subcelular; alteração celular; modificação no tecido, e por último, a manifestação visível do sintoma de deficiência ou toxicidade nutricional (MALAVOLTA et al., 1997).

2.3 Importância do Nitrogênio para as plantas

Para que um elemento seja considerado essencial para o crescimento vegetal, ele precisa apresentar uma das seguintes características: ser um componente intrínseco tanto na estrutura quanto em seu metabolismo, ou quando ocorre sua ausência ocasiona anormalidades severas no crescimento, desenvolvimento, em sua reprodução, ou impedir uma planta de completar seu ciclo de vida (ARNON; STOUT, 1939; TAIZ et al., 2017) e não pode ser substituído por nenhum outro elemento (ARNON; STOUT, 1939).

Dentre os elementos químicos, o nitrogênio (N) é um nutriente essencial para as plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004), pois é constituinte dos ácidos nucleicos (DNA e RNA) (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2004; HUNGRIA et al., 2007; TAIZ; ZEIGER, 2013; PES; ARENHARDT, 2015; FERREIRA; MORAIS, 2021), das biomoléculas mais importantes dos processos biológicos (MIFLIN; LEA, 1976; HARPER, 1994; HUNGRIA et al., 2007) como ATP, NADH, NADPH, clorofila (MIFLIN; LEA, 1976; HARPER, 1994; ANDRADE et al., 2003; TAIZ; ZEIGER, 2013; FERREIRA; MORAIS, 2021), proteínas (MIFLIN; LEA, 1976; HARPER, 1994; MOREIRA; SIQUEIRA, 2002; FLOSS, 2006; HUNGRIA et al., 2007; PES; ARENHARDT, 2015; FERREIRA; MORAIS, 2021), aminoácidos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2013; PES; ARENHARDT, 2015; FERREIRA; MORAIS, 2021), vitaminas (PES; ARENHARDT, 2015; FERREIRA; MORAIS, 2021), enzimas (MIFLIN; LEA, 1976; HARPER, 1994; TAIZ; ZEIGER, 2004) e coenzimas (TAIZ; ZEIGER, 2004); componentes estruturais (TAIZ; ZEIGER, 2013) sendo o nutriente utilizado em maiores quantidades pelas plantas (RAIJ, 1991; HUNGRIA et al., 2007; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Devido a importância do nitrogênio (N), quando as doses requeridas pelas plantas não são adequadas, pode comprometer a fotossíntese, a formação de raízes, taxa de crescimento entre folhas e raízes, afetando primeiramente o crescimento foliar (TAIZ; ZEIGER, 2004).

2.4 Estresse nutricional

Cada nutriente exerce funções específicas no metabolismo das espécies vegetais, e quando um elemento mineral não se encontra em quantidades suficientes de acordo com a demanda da planta ou quando a interação entre esses elementos não ocorre de forma adequada, surgem as desordens fisiológicas (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

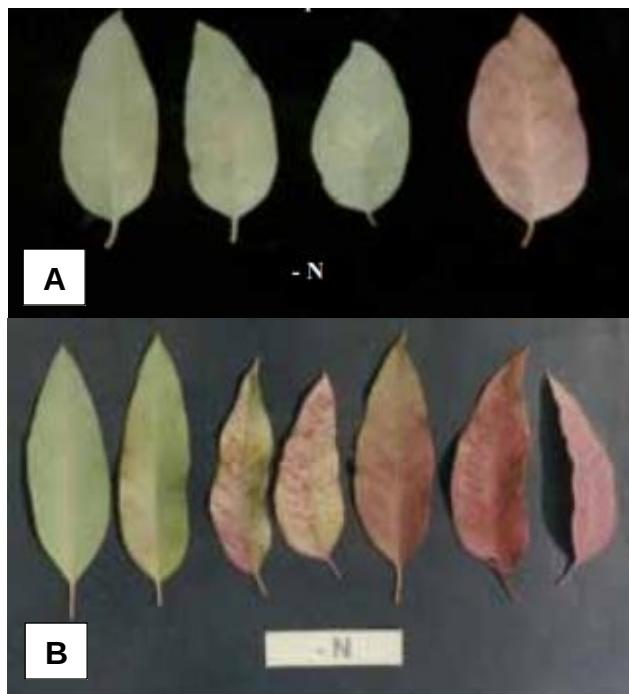
Diversos fatores afetam a disponibilidade dos nutrientes para os vegetais. Dentre esses fatores podem ser citados a espécie vegetal, idade fisiológica, e os fatores externos relacionados ao clima, solo, manejo nutricional, formas de cultivo e manejo de pragas e doenças (LIMA FILHO, 2020).

O excesso de Nitrogênio pode refletir em algumas características nas plantas, como maior crescimento da parte aérea em comparação com as raízes, maior relação parte aérea e raiz e em algumas espécies vegetais pode ocorrer um atraso na floração, por permanecer mais tempo na fase vegetativa (SOUZA; CARVALHO, 2000).

Pelo excesso (toxidez) de nitrogênio pode ocorrer a ausência (deficiência) de outros elementos minerais disponíveis para as plantas, isso ocorre porque o excesso de determinado nutriente pode induzir a falta de outro (SALVADOR et al., 1999).

Os sintomas visuais de deficiência de N em mudas de eucalipto são descritos na seguinte ordem, inicialmente as folhas mais velhas apresentam coloração verde clara que vão ficando amareladas e com pequenos pontos avermelhados ao longo do limbo. Posteriormente, os pontos cobrem todo o limbo, ocorrendo um avermelhamento generalizado e queda das folhas (SILVEIRA et al., 2001; HIGASHI; SILVEIRA, 2002) (Figura 1).

Figura 1 – Progressão dos sintomas visuais de deficiência de nitrogênio em folhas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (A) e *Eucalyptus urophylla* (B)



Fonte: Adaptado de SILVEIRA et al., 2001.

2.5 Diagnoses dos sintomas de estresse nutricional

Os métodos para avaliar estresse nutricional em plantas, são realizados por meio das diagnoses visual (observação de sintomas de deficiência ou excesso) e foliar (análise de tecidos vegetais) (REIS et al., 2007).

As diagnoses foliar e visual representam um dos métodos de identificação do elemento limitante, visto que as deficiências minerais alteram o metabolismo e modificam a morfologia e anatomia das plantas (SILVEIRA et al., 2002).

Entretanto, nos dois métodos, quando surgem os sintomas ou quando a deficiência nutricional é identificada na análise química de tecido vegetal, é difícil de serem corrigidas as doses adequadas, antes de ter comprometido o crescimento das plantas (GONÇALVES, 1995; FAQUIN, 2002), e consequentemente sua produtividade.

2.5.1 Diagnose Visual

O método de diagnóstico de sintomas visuais de deficiência ou toxicidade nutricional possui por princípio que cada nutriente exerce funções específicas em qualquer espécie vegetal (GONÇALVES, 1995; FAQUIN, 2002).

O diagnóstico se baseia nesse princípio, devido às funções de cada nutriente serem as mesmas em qualquer espécie vegetal (FAQUIN, 2002). Essas alterações no metabolismo das plantas, modificam a morfologia e anatomia vegetais, sendo estas facilmente identificadas visualmente (SILVEIRA et al., 2002).

Quando as plantas sofrem estresse nutricional, surgem sintomas característicos para cada nutriente (GONÇALVES, 1995; FAQUIN, 2002), sendo os principais, redução do crescimento, perda ou mudança de cor e deformações na parte aérea. Porém, este método não fornece informações da magnitude do estresse (GONÇALVES, 1995).

O surgimento dos sintomas visuais de deficiência ou toxicidade de determinado nutriente é descrita em uma sequência de diferentes processos metabólicos que ocorrem nas plantas, como alteração molecular; lesão subcelular; alteração celular; modificação no tecido, e por último, a manifestação visível do sintoma de deficiência ou toxicidade nutricional (MALAVOLTA et al., 1997).

Pelo fato do surgimento dos sintomas visuais de estresse nutricional, ser o último acontecimento de diversos problemas metabólicos irreversíveis, há comprometimentos na produtividade (FAQUIN, 2002) vegetal. Porém, muitas vezes as plantas não manifestam os sintomas, mas estão sofrendo algum tipo de estresse nutricional (FAQUIN, 2002), conhecidos por fome ou toxidez oculta.

Dentre os nutrientes requeridos pelas plantas, o nitrogênio (N) é essencial para seu desenvolvimento e sobrevivência. O nitrogênio possui redistribuição móvel nos tecidos vegetais, por isso, os sintomas visuais de sua deficiência, ocorrem primeiramente nas folhas mais velhas (SILVEIRA et al., 2001; FAQUIN, 2002; COSTA et al., 2008), apresentando coloração verde claro e vão ficando amareladas e com pequenos pontos avermelhados no limbo, e com o passar do tempo, os pontos cobrem todo o limbo foliar, ocorrendo um avermelhamento por toda a folha, e posteriormente, a queda das mesmas (SILVEIRA et al., 2001).

Devido aos nutrientes exercerem as mesmas funções nas plantas independentemente da espécie vegetal, os sintomas de deficiência nutricional são típicos e são identificados da mesma forma (COSTA et al., 2008).

Dentre as limitações do método de diagnose visual de deficiência ou toxicidade nutricional se destacam: a perda da produção é inevitável quando os sintomas aparecem; por ser qualitativo, não é possível estabelecer as doses do nutriente para correção; não é possível diagnosticar deficiências múltiplas (FAQUIN, 2002), e a “fome (FAQUIN, 2002; COSTA et al., 2008) ou toxidez oculta”; os sintomas de origem nutricional e não nutricional (fatores bióticos e abióticos, como por exemplo, pragas, doenças, climáticos, físicos do solo e toxidez por herbicidas e defensivos) são semelhantes (FAQUIN, 2002); os sintomas visuais de deficiência de alguns nutrientes podem ser confundidos com os sintomas de deficiência de outros nutrientes, como por exemplo, N e S (DELL et al., 1995), N e Mg (RAMOS et al., 2009).

2.5.2 Diagnose Foliar

A diagnose foliar possui por princípio a comparação da concentração nutricional foliar com os valores padrões da espécie vegetal de interesse que tenham alta produtividade e bom desenvolvimento (MALAVOLTA et al., 1997; FAQUIN, 2002).

O método de diagnose foliar se baseia na premissa de que a concentração foliar de determinado nutriente reflete em sua disponibilidade no solo, e quando ocorrem alterações na concentração foliar, há comprometimentos no desenvolvimento e produtividade vegetais (TISDALE et al., 1993; BATAGLIA et al., 1996).

A folha é o órgão das plantas que melhor expressa seu estado nutricional, pois são sensíveis às variações nutricionais, e são nas folhas que as plantas realizam os principais processos metabólicos (MALAVOLTA et al., 1997; FAQUIN, 2002).

Existem algumas etapas a serem seguidas na diagnose foliar, sendo, normatização (MARTINEZ et al., 1999), coleta da amostra de folhas (VELOSO et al., 2020); preparo e análise química das amostras (MARTINEZ et al., 1999; VELOSO et al., 2020); encontrar padrões de referência comparativos com a cultura de interesse, interpretação dos resultados (MARTINEZ et al., 1999; VELOSO et al., 2020).

Dentre as limitações da diagnose foliar, se destacam: é um procedimento demorado; destrutivo; custo elevado (CHAVES, 2017); requer o uso de reagentes perigosos para a saúde do profissional e para o meio ambiente; podem ocorrer erros

em alguma das etapas (coleta, preparo, análise foliar e interpretação dos resultados) da técnica, entre outros.

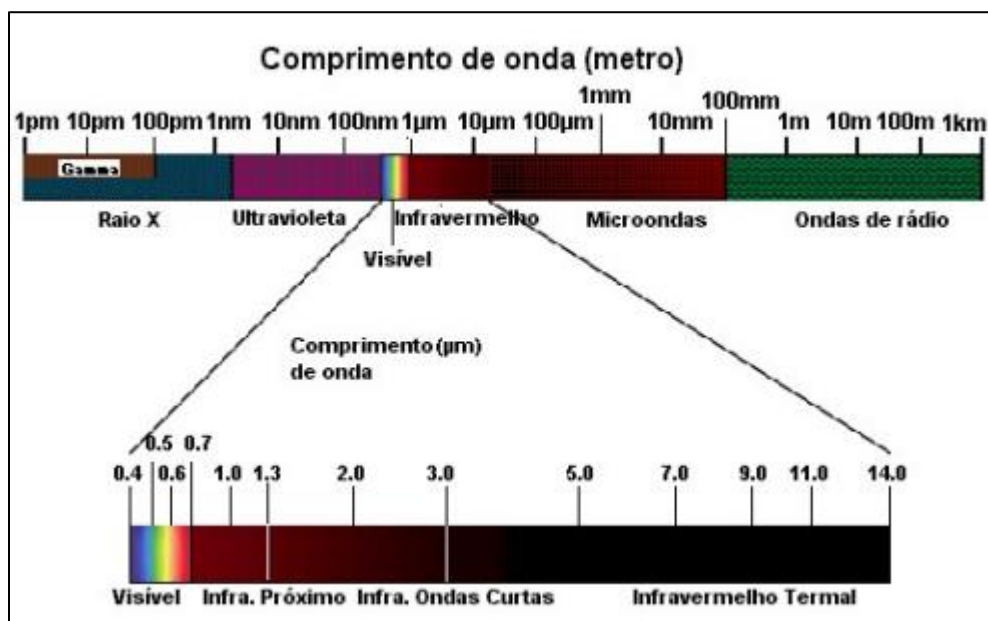
2.6 Radiação Eletromagnética (REM) e sua Interação com a Vegetação

Para o entendimento da espectrorradiometria é importante conhecer sobre a radiação eletromagnética (REM), e como ela interage com a vegetação, pois só é possível obter dados espectrais por meio da radiação eletromagnética.

A radiação pode ser definida como a energia que se propaga de um ponto a outro (no espaço ou meio natural) a certa velocidade, e pode ser dividida em eletromagnética e por emissão de partículas. Entretanto, em sensoriamento remoto (SR) a radiação de interesse é a eletromagnética (MENESES et al., 2019).

Segundo as formulações de Maxwell, a radiação eletromagnética é determinada pelo movimento ortogonal dos campos elétrico e magnético, sendo esse movimento ortogonal denominado de ondas eletromagnéticas (MENESES et al., 2019) e essas ondas eletromagnéticas são organizadas no espectro eletromagnético (Figura 2).

Figura 2 – Representação das ondas eletromagnéticas organizadas no espectro eletromagnético de acordo com seu comprimento de onda



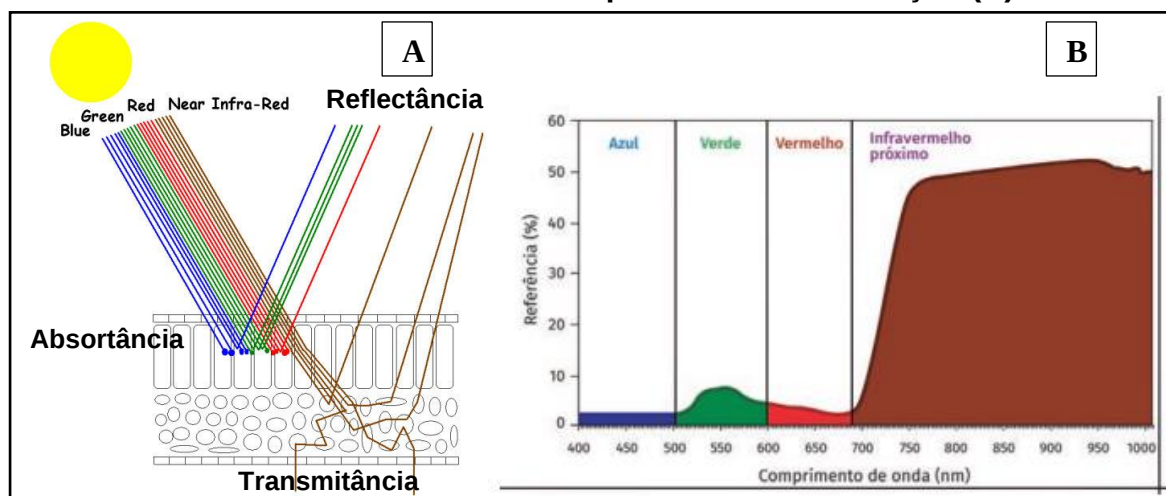
Fonte: BAPTISTA, 2023.

As informações obtidas por meio da radiação eletromagnética só são possíveis de serem geradas em razão dos sensores que conseguem detectar e registrar essa radiação em faixas restritas do espectro eletromagnético e após essa etapa esses dados são transformados em forma gráfica, tabelas ou em imagens para que seja possível sua interpretação (MOREIRA, 2001).

A região do visível ao infravermelho de ondas curtas, é a região espectral mais utilizada pela maioria dos satélites de sensoriamento remoto multi e hiperespectral e a mais explorada pela espectrorradiometria.

É possível diferenciar uma folha verde sadia de uma folha não sadia por meio da sua reflectância que é resultante dos processos de interação da REM com a vegetação, como a absortância, transmitância e reflectância (Figura 3).

Figura 3 – Processos de interação da REM (radiação eletromagnética) com a vegetação em diferentes regiões espectrais (A) e o gráfico de reflectância espectral dessa interação (B)



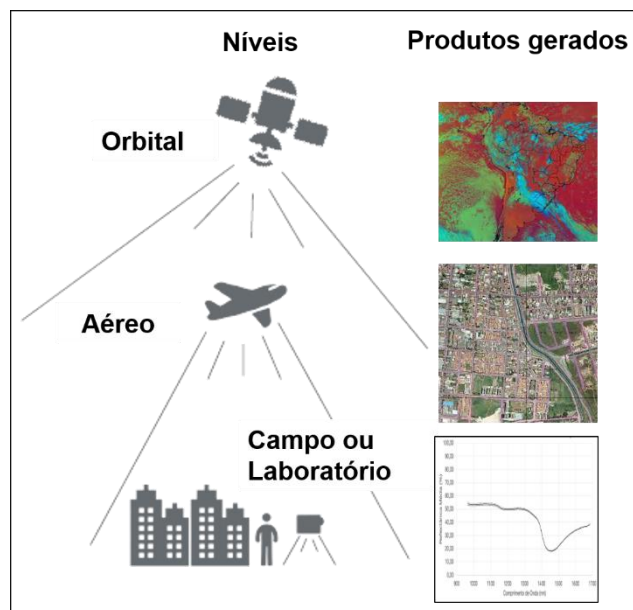
Nota: Blue, Green, Red e Near Infra-Red se referem às bandas espectrais do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente, e seu processo de interação com as células vegetais. Fonte: Adaptado de (A) PORTENGEN, 2017; (B) SENAR, 2018.

Existem diferentes níveis para a aquisição de dados espectrais no estudo da vegetação e em cada um deles são obtidos diferentes produtos, e para se obter informações de folhas individuais, partes das plantas ou conjunto de plantas, utilizam-se radiômetros ou espectrorradiômetros (nível de laboratório) (PONZONI, 2002).

As informações de um dossel florestal ou agrícola, podem ser obtidos por meio de radiômetros ou espectrorradiômetros a poucos metros de distância do alvo de interesse (nível de campo). Os produtos gerados nesses dois níveis (laboratório e campo) são dados numéricos, como as curvas espectrais.

Para analisar um dossel florestal ou agrícola, utilizam-se câmeras, onde são geradas informações por meio de curvas espectrais ou imagens (nível de aeronave), e em nível orbital, por meio de satélites artificiais, com a obtenção de imagens (Figura 4).

Figura 4 – Níveis para a aquisição de dados de sensoriamento remoto e seus respectivos produtos

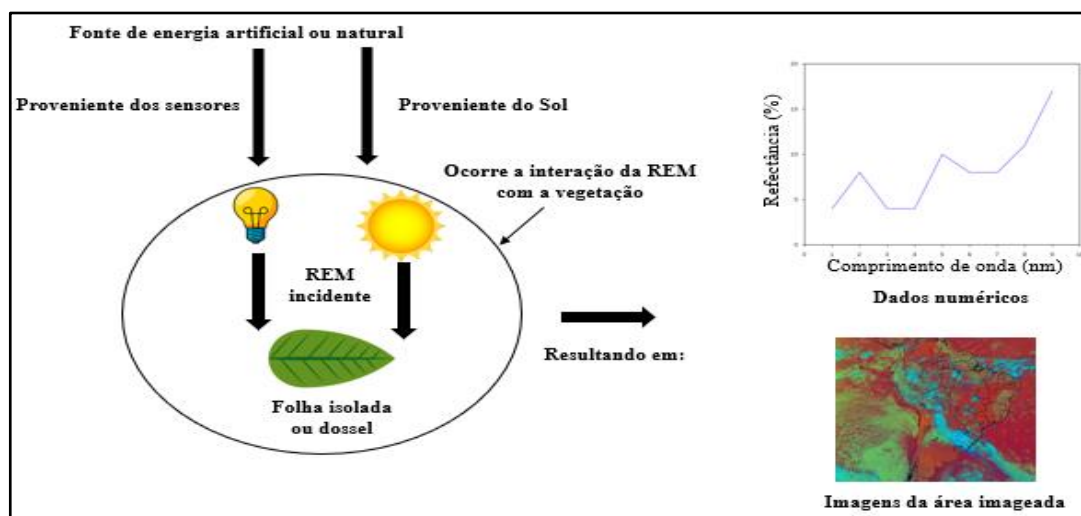


Fonte: Elaborada pela autora.

O registro da interação da REM (radiação eletromagnética) com a vegetação é possível por meio de sensores acoplados aos radiômetros, espectrorradiômetros, câmeras ou nos satélites, capazes de registrar essa interação, resultando em dados numéricos (gráficos), também conhecidos por assinatura espectral ou imagens (Figura 5).

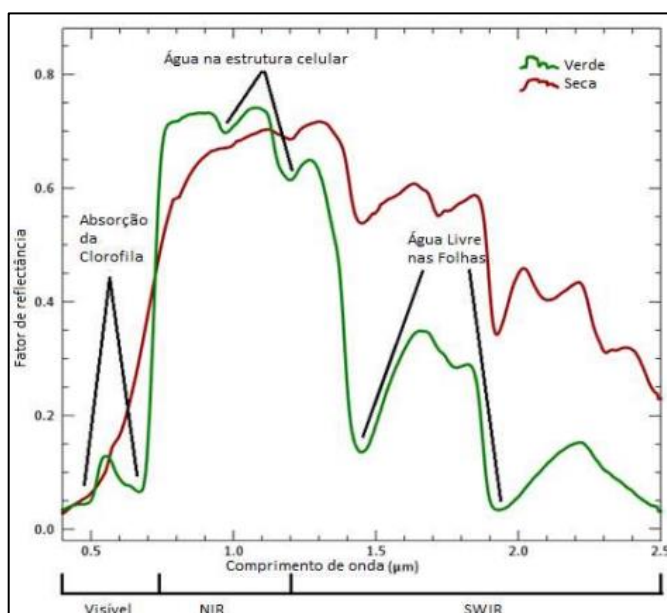
A assinatura espectral (ou comportamento espectral) de determinado alvo compreende os valores sucessivos de sua reflectância em determinados comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Figura 6).

Figura 5 - Esquema da interação da REM (radiação eletromagnética) com a vegetação



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 6 – Comportamento espectral e as feições espectrais de absorção típicas da vegetação verde e seca nas regiões do visível, infravermelho próximo (NIR) e de ondas curtas (SWIR)



Fonte: BAPTISTA, 2023.

O que permite a diferenciação e o reconhecimento de diferentes objetos terrestres são as diferentes propriedades físico-químicas e biológicas que cada alvo possui, e essas interagem de diferentes maneiras com a radiação eletromagnética (REM) incidente. O comportamento espectral dos alvos é obtido por sistemas sensores imageadores e não-imageadores (MORAES, 2002).

No primeiro sistema, o comportamento espectral de determinado alvo é obtido por meio de uma imagem, e um exemplo desses sensores são as câmeras fotográficas (MORAES, 2002), ou os sensores acoplados nos satélites, e no segundo sistema, são obtidos dígitos ou gráficos da sua reflectância, e um exemplo desses sensores são os espectrorradiômetros (MORAES, 2002).

A resposta espectral da vegetação fornece significativas informações sobre o seu material constituinte, estrutura celular das folhas, atividade fotossinteticamente ativa e seus parâmetros biofísicos (JENSEN, 2011), devido à resposta espectral da folha ser em decorrência da sua composição, morfologia e estrutura interna (PONZONI, 2002).

2.7 Espectrorradiometria de reflectância

Estudar a radiação eletromagnética na região do infravermelho é muito importante na obtenção de informações sobre os grupos químicos em diferentes amostras por conseguir identificar nesta região do espectro eletromagnético as vibrações das moléculas (FORATO et al., 2010).

A utilização de folhas frescas na realização de pesquisas pode auxiliar na obtenção de dados sobre o estado nutricional, os métodos de manejo da cultura e do solo e condições da planta sobre pragas e doenças, além de fornecer informações a fim de aprimorar a produtividade e a utilização da técnica de radiação eletromagnética nos comprimentos de infravermelho próximo permite a obtenção dessas informações obtidas por meio das folhas (WANG, 2004).

A curva de reflectância espectral de cada objeto estudado é gerada por meio da espectrorradiometria que é capaz de mensurar a energia eletromagnética refletida pelos materiais presentes na superfície terrestre nos diferentes comprimentos de onda e posteriormente, essas informações geradas são transformadas na forma de gráficos (PEDROSA et al., 2010).

A Espectrorradiometria é uma das técnicas de sensoriamento remoto (SR) não imageador, ou seja, o seu produto final não são imagens da superfície terrestre imageada (SR imageador) mas são gerados gráficos referente ao percentual de reflectância em relação à região espectral do sensor que realizou as leituras espectrais do objeto de interesse.

A espectrorradiometria de reflectância possui inúmeras funcionalidades e aplicações, podendo destacar:

- é uma técnica não destrutiva (MROCZYK; MICHALSKI, 1995; ALBA et al., 2020; FERRARESI et al., 2012; MARTINS; SARGENTELLI, 2021) e rápida;
- é possível identificar diferentes materiais que tenham em sua composição moléculas com ligações CH, NH, SH ou OH (ALBA et al., 2020; MARTINS; SARGENTELLI, 2021);
- permite a medição de diferentes componentes ao mesmo tempo (MROCZYK; MICHALSKI, 1995);
- curta distância entre o objeto e o equipamento, o que permite a minimização dos efeitos atmosféricos, onde as interferências dos fatores ambientais externos são minimizadas em relação aos resultados obtidos por meio de outros sensores (SILVA et al., 2012).
- compreende diferentes comprimentos de onda (hiperespectral) (ALBA et al., 2020);
- pode ser utilizada em pesquisas específicas (ALBA et al., 2020), como na avaliação nutricional das plantas (FERRARESI et al., 2012), ou no aprimoramento de estudos envolvendo imagens provenientes de sensoriamento remoto (ALBA et al., 2020), uma vez que possibilita a identificação indireta dos compostos de um material por meio de sua reflectância (FERRARESI et al., 2012), ou
- em larga escala (MROCZYK; MICHALSKI, 1995; MARTINS; SARGENTELLI, 2021) em análises quantitativa e qualitativa (MROCZYK; MICHALSKI, 1995).

Ao analisarmos as funcionalidades e aplicações da espectrorradiometria de reflectância, a técnica pode ser uma alternativa aos métodos convencionais de identificação de estresse nutricional em plantas, pois como as plantas sob estresse modificam sua morfologia e fisiologia, e a espectrorradiometria permite identificar e prever essas alterações a nível celular.

2.8 Predição da Composição foliar por meio de Espectrometria de Infravermelho próximo (NIR)

Diante do que foi exposto e discutido nos tópicos anteriores, a espectrorradiometria de reflectância é uma técnica que vem sendo estudada para ser

utilizada no monitoramento e na predição de diversos aspectos relacionados às plantas.

A técnica de espectrometria na região espectral do Infravermelho-próximo e de ondas curtas (NIR-SWIR), pode ser empregada em diversas áreas.

Na área de nutrição vegetal, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, mais voltados para a agricultura de precisão. Na década de 1990, por meio da espectrometria de infravermelho-próximo (NIR) foi possível prever proteínas, nitrogênio e sacarídeos em folhas de beterraba (MROCZYK; MICHALSKI, 1995); previsão da composição de tecidos vegetais e animais (FOLEY et al., 1998).

A partir dos anos 2000, foram conduzidos diversos trabalhos, entre eles se destacam:

- a identificação do conteúdo de nitrogênio em plantas cultivadas usando reflectância espectral e RNA (Redes Neurais Artificiais) (ULSON et al., 2001);
- discriminar folhas de trigo com deficiência de nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio das folhas sadias por meio de dados espectrais e RNA (Redes Neurais Artificiais) (AYALA-SILVA; BEYL, 2002);
- previsão dos padrões de mineralização de carbono (C) e nitrogênio (N) da serapilheira (BRUUN et al., 2005);
- estresse hídrico (LIEW et al., 2007);
- prever deficiência de ferro dois dias antes de surgirem os sintomas visuais típicos da falta do nutriente (LIEW et al., 2007);
- estimar o status de nitrogênio (N) das plantas *Brassica napus* e planta do chá por espectroscopia Vis/NIR e modelo matemático (JIN et al., 2009);
- classificação de espécies vegetais (GUO et al., 2009; GUO et al., 2010);
- identificar estresses ambientais em plantas de soja (*Glycine max* L.) (KREZHOVA; KIROVA, 2011);
- determinação do status de nitrogênio em plantas de *Phragmites australis* (LIU et al., 2011);
- identificar a concentração de água e nitrogênio em folhas de pepino (YINCUN et al., 2011);
- teores de umidade e clorofila (MA; JI, 2012);

- nitrogênio foliar nas culturas do milho e da soja (SANTOS et al., 2012);
- identificação de variedades de plantas medicinais (RAJESH et al., 2013);
- predição das características químicas (umidade, massa seca e concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, ferro e magnésio) de folhas de videira por meio da reflectância eletromagnética entre 350 e 2500 nm (visível e infravermelho) (ORDÓNEZ et al., 2013);
- estimar nitrogênio na cultura do arroz com base na reflectância foliar utilizando NIR e RNA (Rede Neural Artificial). Os autores concluíram que o estudo pode ajudar os agricultores a prever o teor de N do arroz para a aplicação ideal de fertilizantes nitrogenados (LESTARI et al., 2015);
- caracterizar espectralmente espécies florestais das famílias *Fabaceae*, *Myrtaceae*, *Rutaceae* e *Salicaceae* (KÄFER et al., 2016);
- discriminação de espécies herborizadas de *Burseraceae* oriundas de diferentes locais da Amazônia Legal (BOTELHO, 2017);
- avaliar a composição química do milho (SIMEONE et al., 2018);
- avaliação de indicadores de qualidade tecnológica da soja (DE OLIVEIRA et al., 2018);
- avaliação de parâmetros de qualidade de trigo (TIBOLA et al., 2018);
- aplicações da espectroscopia no infravermelho próximo na cadeia produtiva de grãos (DE PAULA et al., 2018);
- valores nutricionais em forrageiras (RECH; WERNER, 2020);
- teores foliares de antocianina e predição da produtividade do milho (MEERT, 2020);
- predizer a qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* para a indústria de celulose (BALDIN et al., 2020);
- discriminação de espécies de cordas-de-viola (BRAGA, 2021).

Entretanto, são poucos os trabalhos desenvolvidos na área de nutrição florestal, principalmente para predição do nitrogênio foliar em espécies florestais. Mesmo sendo poucos os trabalhos realizados na área de nutrição florestal aplicada à espectroscopia de infravermelho próximo, as pesquisas desenvolvidas, obtiveram bons resultados.

Como exemplos, se destacam:

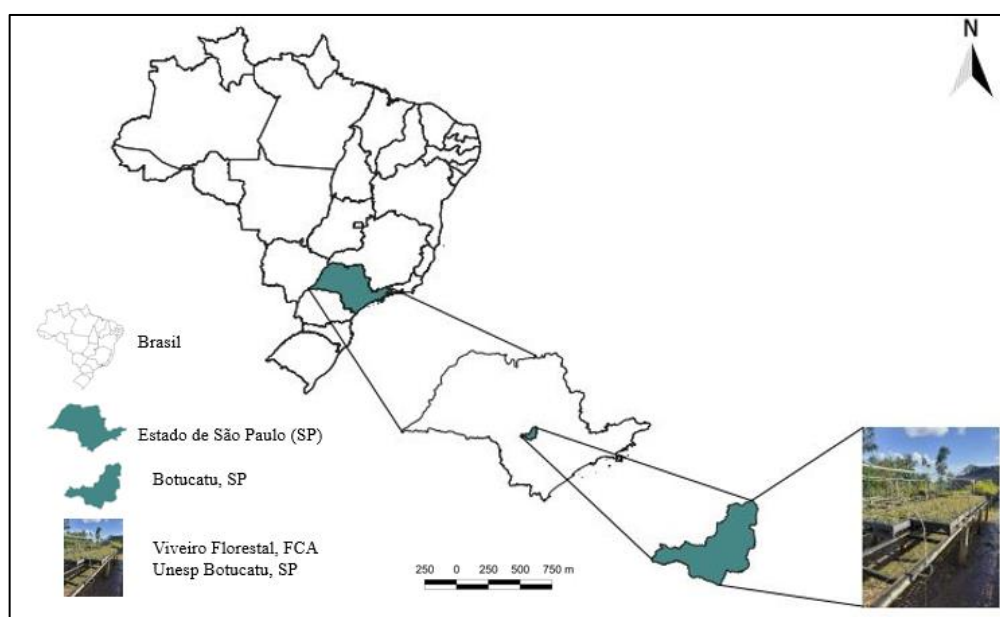
- predição da composição da matéria orgânica no solo e na serapilheira (TERHOEVEN-URSELMANS et al., 2006);
- predição da densidade básica da madeira de *Pinus taeda* (MAGALHÃES et al., 2006);
- monitoramento do teor de umidade e a densidade da madeira sólida, os autores concluíram que a tecnologia NIRS tem potencial para ser usada como uma ferramenta rápida que poderia ser empregada para medição e monitoramento em linha das propriedades da madeira na indústria de produtos florestais (LEBLON et al., 2013);
- predição das propriedades da biomassa florestal para aplicações químicas e bioenergéticas (ACQUAH et al., 2015);
- discriminação rápida de espécies florestais nativas e plantadas (RAMALHO et al., 2018);
- determinação do teor relativo de água nas folhas de oliveiras (TORRES et al., 2019);
- previsão quantitativa do conteúdo de compostos bioativos em folhas de oliveira (VALINGER et al., 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Os experimentos foram desenvolvidos na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da UNESP, no município de Botucatu – SP, no viveiro do Departamento de Recursos Naturais, Setor de Ciências Florestais (Figura 7).

Figura 7 - Localização da área de estudo, onde as mudas foram cultivadas e submetidas aos tratamentos. Viveiro do Departamento de Recursos Naturais, Setor de Ciências Florestais, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da UNESP, no município de Botucatu, SP



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 Material genético

O experimento foi realizado com 800 mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) plantadas em tubetes de 55cm³ obtidas de um viveiro florestal comercial, localizado no município de Águas de Santa Bárbara, SP. As mudas chegaram com 50 dias, estavam na casa de sombra e não receberam adubação.

Após a chegada das mudas no viveiro da FCA (Unesp de Botucatu), as mesmas permaneceram sem adubação, apenas foram irrigadas até o dia do início do experimento e das mudas serem submetidas aos tratamentos.

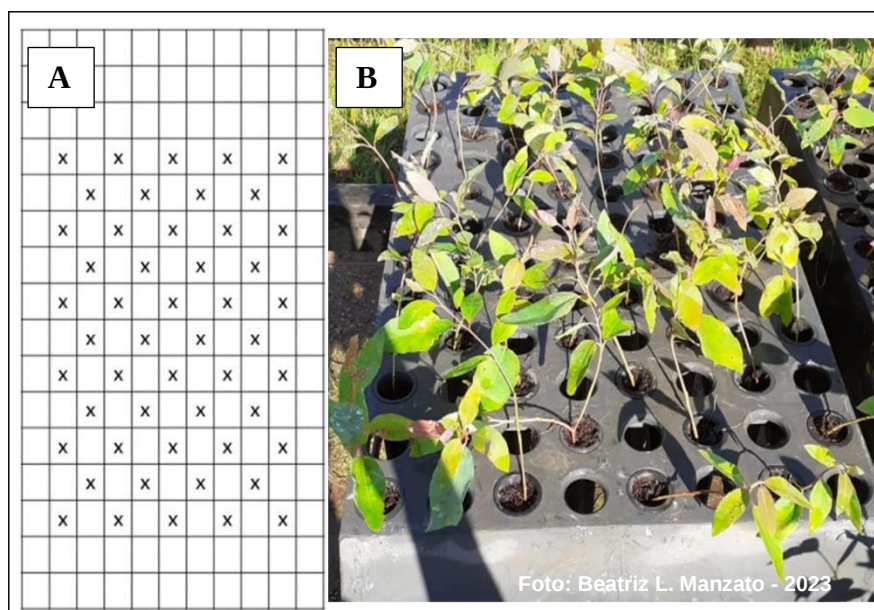
O experimento foi realizado entre os dias 11 de abril e 09 de maio de 2023.

3.3 Delineamento Experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com 4 tratamentos e 5 repetições. Cada bandeja com 50 mudas representou cada repetição.

As mudas foram organizadas em bandejas com 176 células. Cada bandeja teve ocupação de 25% da sua capacidade total, totalizando 50 mudas por bandeja (Figura 8).

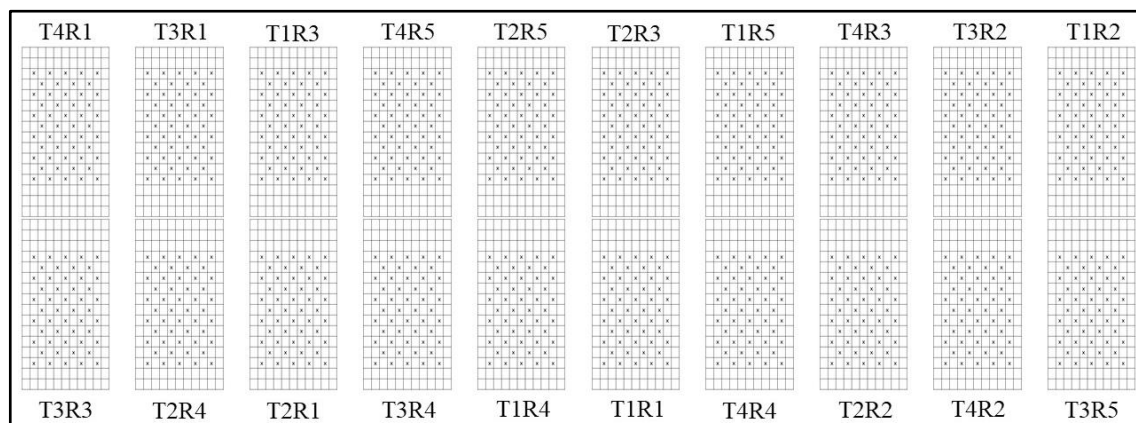
Figura 8 - Ilustração da ocupação de 50% das bandejas com as mudas (A) e a bandeja com as mudas de *E. urophylla* (clone I144) no canteiro suspenso no viveiro da FCA (B)



Cada tratamento foi distribuído em cinco bandejas com 50 mudas cada, totalizando 250 mudas por tratamento.

As bandejas com as mudas foram colocadas em canteiro suspenso com cobertura de filme plástico agrícola e as bandejas de cada repetição de cada tratamento foram distribuídas aleatoriamente sobre o canteiro suspenso (Figura 9).

Figura 9 - Ilustração da disposição das bandejas com as mudas de *E. urophylla* com seus respectivos tratamentos (T) e repetições (R) no canteiro suspenso do viveiro da FCA



Fonte: Elaborada pela autora.

3.4 Aplicação dos tratamentos e manejo hídrico

As mudas foram submetidas aos tratamentos:

T1: Solução nutritiva completa com omissão de nitrogênio (0/4 de N):

- MKP (2,0g/6L); CaCl₂ (5,6g/6L); KCl (1,9g/6L); MgSO₄ (4,61g/6L), solução de micronutrientes (3,0ml/6L);

T2: Solução nutritiva completa com a metade da concentração recomendada de nitrogênio (2/4 de N):

- MKP (2,0g/6L); CaCl₂ (5,6g/6L); KCl (1,9g/6L); MgSO₄ (4,61g/6L); uréia (3,3g/6L), solução de micronutrientes (3,0ml/6L);

T3: Solução nutritiva completa com a concentração recomendada de nitrogênio (4/4 de N):

- MKP (2,0g/6L); CaCl₂ (5,6g/6L); KCl (1,9g/6L); MgSO₄ (4,61g/6L); uréia (6,6g/6L), solução de micronutrientes (3,0ml/6L);

T4: Solução nutritiva completa com o dobro da concentração recomendada de nitrogênio (8/4 de N):

- MKP (2,0g/6L); CaCl_2 (5,6g/6L); KCl (1,9g/6L); MgSO_4 (4,61g/6L); uréia (13,2g/6L), solução de micronutrientes (3,0ml/6L).

A aplicação dos tratamentos foi por fertirrigação. O preparo da solução nutritiva se iniciou com a pesagem dos nutrientes minerais com o auxílio de balança analítica. Posteriormente, os nutrientes foram adicionados em um balde plástico e completou o volume para seis litros de água. O volume de seis litros foi suficiente para fertirrigar todas as bandejas de cada tratamento.

Após a diluição dos nutrientes minerais com a água, a solução foi colocada em um regador manual, onde se iniciou sua aplicação nas mudas.

As mudas foram submetidas aos tratamentos (fertirrigação) nos dias em que ocorreram as análises das medições da reflectância foliar.

As medições foram realizadas antes das mudas serem submetidas aos tratamentos (tempo 0 dias) e nos tempos (dias) 7, 11, 16 e 22 após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Após as mudas terem sido separadas para serem levadas ao departamento para serem realizadas as medições espectrais, somente as demais mudas receberam a fertirrigação.

Durante todo o experimento, as mudas foram irrigadas todos os dias, cinco vezes ao dia, a cada duas horas por dois minutos. Porém, nos dias em que as mudas foram submetidas aos tratamentos, após a fertirrigação com a solução nutritiva, o sistema de irrigação foi desligado por aproximadamente duas horas, para evitar a lixiviação dos nutrientes.

3.5 Procedimentos da aquisição das reflectâncias foliares

O processo de obtenção das reflectâncias foliares foi realizado no Departamento de Biodiversidade e Bioestatística do Instituto de Biociências, pertencente à Unesp de Botucatu, SP.

Para tanto, em cada dia de coleta dos dados espectrais, foram sorteadas aleatoriamente 10 mudas de cada bandeja e de cada tratamento sem reposição, totalizando 40 mudas por tratamento, exceto no dia zero (antes das mudas serem submetidas aos tratamentos), onde foram sorteadas aleatoriamente duas mudas por bandeja de cada tratamento sem reposição, totalizando oito mudas por tratamento.

As mudas sorteadas foram codificadas e separadas em novas bandejas, onde foram levadas ao Departamento para a condução das leituras espectrais.

Posteriormente, foram retiradas aleatoriamente 2 folhas por muda. A preparação para a tomada das medidas da reflectância foliar se iniciou pela fixação das folhas das mudas em folha de papel com gabarito pré-definido e codificado segundo tratamento, repetição, dia de medida e número da folha por muda.

A codificação obedeceu a seguinte regra de pares de letra e número:

- a) Uma letra (T) e um número (1 a 4) para identificar o tratamento;
- b) Uma letra (R) e um número (1 a 5) para identificar a repetição do tratamento;
- c) Uma letra (D) e um número (0; 3; 6; 9 e 12) para identificar o dia de medição;
- d) Uma letra (M) e um número (1 a 10) para identificar a muda;
- e) Uma letra para identificar a folha (F) e seu número (1 a 2).

Assim, por exemplo, a codificação T1R1D3M1F1 se referiu ao tratamento T1, repetição 1, do dia de coleta 7, muda 1 e folha 1 (Figura 10).

Após as folhas terem sido fixadas no gabarito, iniciou-se as medições espectrais com o espectrorradiômetro da *Ocean Optics*, modelo *flame – NIR* com leitura dos comprimentos de onda na faixa 966,31nm a 1685,09nm (infravermelho próximo e de ondas curtas) e sensibilidade de 5,51nm (Figura 11).

Figura 10 - Exemplo da codificação das folhas das mudas de *E. urophylla* (clone I144) identificadas segundo tratamento (T), repetição (R), dia da medida (D) e número da folha (F) por muda (M), e fixadas no gabarito pré-definido para a tomada das medidas espectrais

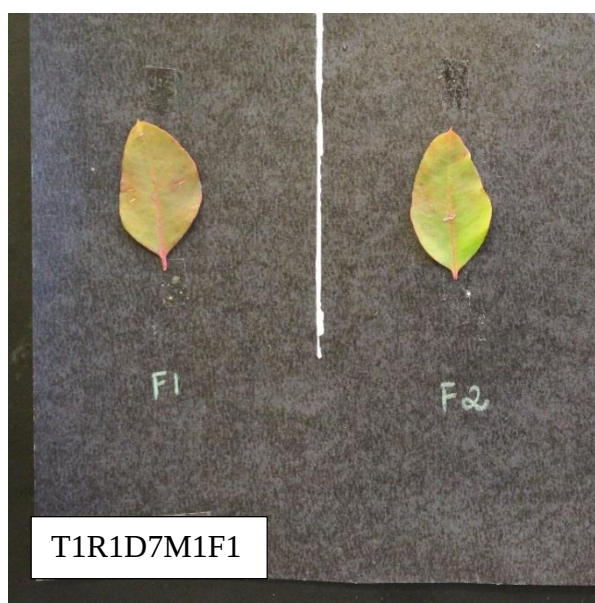


Figura 11 - Sistema dos procedimentos para a obtenção das reflectâncias foliares das mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) com o Espectrorradiômetro da Ocean Optics, modelo flame – NIR



Fonte: Adaptado de OCEAN OPTICS, 2016.

3.6 Metodologia estatística

3.6.1 Estudo descritivo dos dados de reflectância foliar

Foram obtidas médias das reflectâncias foliares por tratamento, repetição e planta referentes dos 128 comprimentos de onda no infravermelho próximo e médio (região espectral entre 966,31nm a 1685,09nm).

Foram construídos para cada tempo (dias) de avaliação do experimento após as mudas serem submetidas aos diferentes tratamentos, curvas médias das reflectâncias foliares (%), das mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) segundo os comprimentos de ondas (nm) e os tratamentos propostos.

3.6.2 Redução da dimensionalidade dos dados de reflectância foliar - Componentes Principais

A variável resposta reflectância foliar tem caráter multidimensional caracterizado pelos 128 comprimentos de onda no infravermelho próximo e de ondas curtas (região espectral entre 966,31nm a 1685,09nm).

Com o intuito de reduzir esta dimensionalidade, foi utilizado a técnica multivariada de componentes principais para todo o conjunto de dados (quatro tratamentos, cinco repetições por tratamento e seis tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos diferentes tratamentos), cujo objetivo é construir combinações lineares das variáveis aleatórias, no caso, comprimento de onda em nanômetros (nm).

Essas combinações lineares possuem propriedades ótimas em termos de variância, buscando-se novas variáveis (coordenadas) que maximizem a variância e não sejam correlacionadas entre si (JOHNSON; WICHERN, 2014).

Nesta redução da dimensionalidade foi utilizado o procedimento *proc princom* do programa estatístico SAS (SAS® Ondemand for Academics Dashboard, 2021), com a opção *n=2* para selecionar os dois primeiros componentes principais.

O uso de componentes principais é fundamental para que possibilite ajustar os modelos propostos nos itens subsequentes 3.6.3 e 3.6.4, caso o primeiro componente principal explique um percentual elevado, como exemplo, acima de 70% da variabilidade total dos dados.

3.6.3 Efeito dos tratamentos no primeiro componente principal – Modelos Lineares Generalizados

Foram ajustados modelos lineares generalizados com distribuição normal e função de ligação de identidade (NELDER; WEDDERBURN, 1972) para o primeiro componente principal (*prin1*), devido ao primeiro componente principal (*prin_1*) ter explicado a variabilidade dos dados a um percentual acima de 70% ao ser comparado com o segundo componente principal (*prin_2*).

Para tanto, foram considerados como fatores principais os tratamentos e o tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Para comparações entre tratamentos foi utilizado o teste de *Tukey-Kramer* (WESTFALL et al., 1999). A qualidade dos ajustes dos modelos lineares generalizados ajustados foi feita pela análise de desvios por graus de liberdade (*deviance*) e o gráfico dos resíduos padronizados de *Pearson*. Nesta etapa, foi utilizado o procedimento *proc genmod* do programa estatístico SAS (SAS® Ondemand for Academics Dashboard, 2021).

3.6.4 Efeito dos tempos no primeiro componente principal – Modelos Lineares Normais

Para estudar o efeito do tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos, no primeiro componente principal, em cada tratamento, foram ajustados modelos de regressão lineares normais para o primeiro componente principal (prin1), considerando como fatores quantitativos o tempo (dias).

A qualidade dos ajustes dos modelos de regressão lineares foi feita pela análise de desvios padronizados de *Pearson* e os *Q-Q plots*. Nesta etapa, foi utilizado o procedimento *proc reg* do programa estatístico SAS (SAS® Ondemand for Academics Dashboard, 2021).

3.6.5 Simulação *Bootstrap* aplicada à classificação dos tratamentos

3.6.5.1 Redefinição de novos tratamentos ou estratégias

Antes de realizar a simulação *bootstrap*, a partir dos quatro tratamentos originais: T1 (0% de Nitrogênio); T2 (50% de Nitrogênio); T3 (dosagem padrão de Nitrogênio), e T4 (dobro da dosagem padrão de Nitrogênio), foram redefinidos três novos tratamentos ou estratégias com base nos quatro tratamentos originais, sendo eles:

2a (tratamento com duas categorias):

- N fora do padrão: 0% de N (tratamento T1 original) + 50% de N (tratamento T2 original) + dobro de N (tratamento T4 original)) e
- N dosagem padrão: N padrão (tratamento T3 original).

2b (tratamento com duas categorias):

- Com N: N padrão (tratamento T3 original) + 50% de N (tratamento T2 original) + dobro de N (tratamento T4 original), e
- Sem N: 0% de N (tratamento T1 original).

4 (tratamento com quatro categorias):

- Todos os tratamentos originais: T1 (0% de N); T2 (50% de N); T3 (N padrão) e T4 (dobro de N).

Essas estratégias de redefinição dos tratamentos objetivaram avaliar possíveis variações nas performances dos modelos de classificações, caracterizados pelo acurácia.

3.6.5.2 Simulação *Bootstrap*

O método de *bootstrap* (EFRON, 1979) é considerado uma técnica de reamostragem de um dado conjunto de dados, permitindo simular amostras de maneira intensiva a partir da amostra original.

Este método permite, por exemplo, obter o conhecimento da distribuição amostral de estimadores em alguns modelos estatísticos os quais não se tenha suporte teórico suficiente.

Nesta pesquisa, o uso do método *bootstrap* permitiu avaliar a incerteza associada à acurácia dos métodos nas tabelas de confusão, obtidas no item 3.6.5.3 seguinte.

Antes da aplicação desta técnica de simulação, inicialmente foi feita a redefinição dos tratamentos descrita no item 3.8.5.1, e posteriormente, foi realizada a separação do conjunto de dados em dois grupos considerando 60% do total – que serão usados para a modelagem dos dados e 40% total – que serão usados para a validação dos dados.

Foram obtidas amostras aleatórias simples com reposição para cada combinação das estratégias de tratamentos definidas no item 3.8.5.1 anterior e de tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos dos dois conjuntos de dados (grupos) obtidos.

Assim, foram obtidas 27 amostras para modelagem (60% das 45 observações) e 18 amostras para validação (40% das 45 observações).

Este processo foi repetido extensivamente, resultando em 1.000 simulações para cada combinação das estratégias de tratamentos e de tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Para cada simulação foi feita a validação dos métodos descritas no item 3.8.6 a seguir. Deste modo, foram obtidas as distribuições empíricas ou histogramas, fornecendo assim informações sobre a acurácia ou a média de acertos.

O procedimento utilizado foi *proc survey select* com a opção *method=srs* (amostras aleatórias simples com reposição) e o comando *strata=tratamento*, do programa estatístico SAS (SAS® Ondemand for Academics Dashboard, 2021).

3.6.6 Redução da dimensionalidade dos dados de reflectância foliar – Componentes Principais

Nesta etapa foi realizada a técnica de redução da dimensionalidade dos dados de reflectância foliar por meio da técnica de componentes principais descritas no item 3.8.2 para cada um dos arquivos obtidos no item 3.8.5.2.

3.6.7 Classificação dos tratamentos pelo Modelo Logístico Multinomial e Função Linear/Quadrática Discriminante

Após a obtenção dos componentes principais do item anterior 3.8.6, duas técnicas de classificação dos tratamentos foram utilizadas:

a) Modelo Logístico Multinomial: As respostas foram caracterizadas pelo número de categorias dos tratamentos considerados no item 3.8.5.1 anterior, e as covariáveis os dois primeiros componentes principais.

Foi utilizado o procedimento *proc logistic* do programa estatístico SAS (SAS® Ondemand for Academics Dashboard, 2021), com *score data* que permite validar um arquivo de dados e, conseqüentemente, gerar a tabela de confusão com a medida de acurácia

b) Função Linear/Quadrática Discriminante: Esta técnica é fundamentada na função discriminante linear e quadrática canônica (JOHNSON; WICHERN, 2015), que está baseada na classificação de k grupos utilizando-se de funções lineares ou quadráticas no espaço multidimensional, utilizando-se de métricas como distância euclidianas e distância de Mahalanobis.

Foi utilizado o procedimento *proc discrim* do programa estatístico SAS (SAS® Ondemand for Academics Dashboard, 2021), com as opções *method=normal* e *pool=test*, os quais foram testadas a normalidade dos dados, uso da matriz de correlação ou de variância/covariância e o uso da função linear ou quadrática discriminante.

Desta forma, obteve-se a validação cruzada – probabilidade de má classificação, obtendo a acurácia do modelo testado.

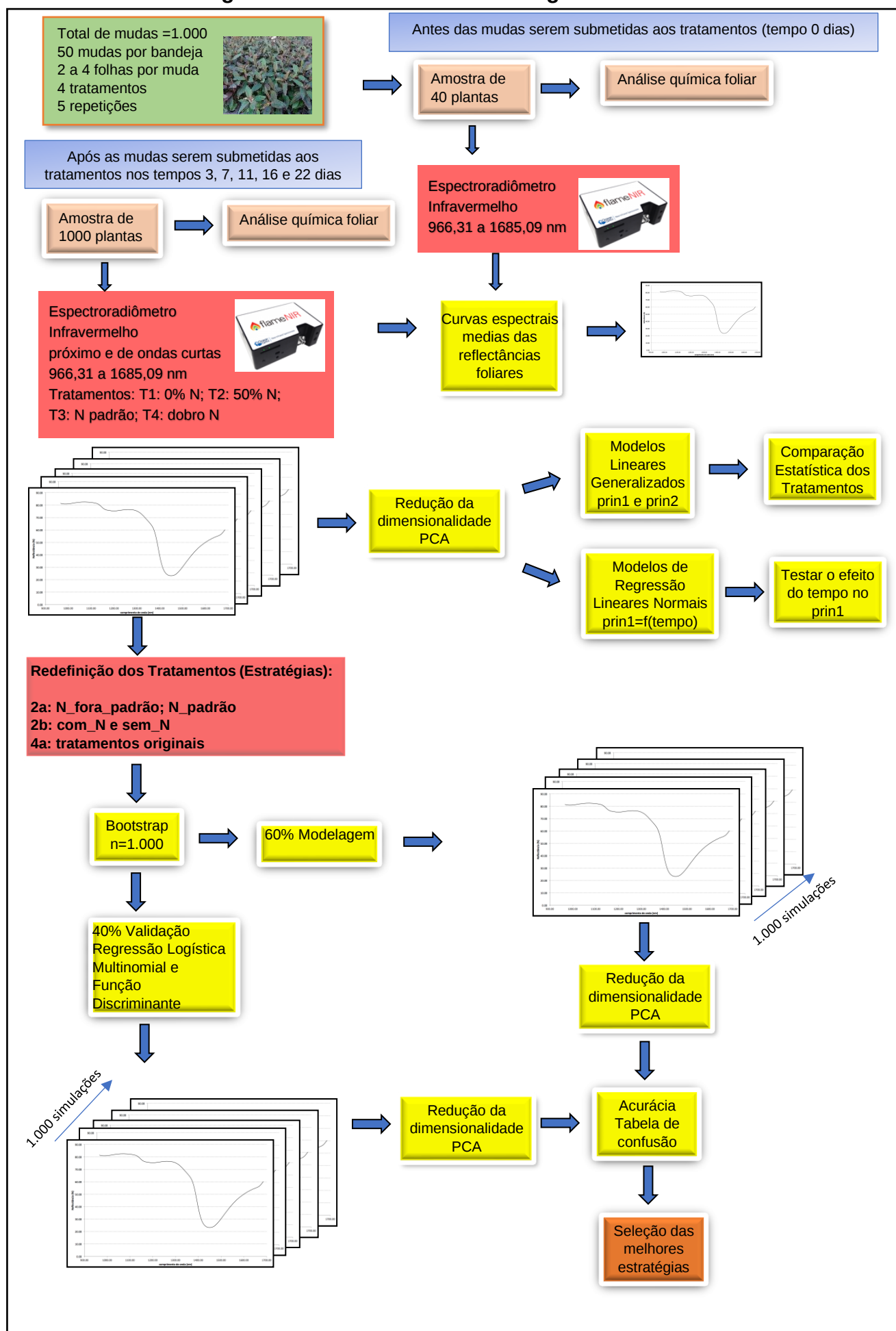
3.6.8 Seleção dos melhores modelos

Nesta etapa, foi realizada a seleção dos melhores modelos considerando as estratégias dos tratamentos definidos no item 3.8.5.1 e as técnicas de classificação descritas no item 3.8.7 anterior.

3.7 Resumo da metodologia estatística

Na Figura 12, está representado um resumo da metodologia estatística.

Figura 12 – Resumo da metodologia estatística

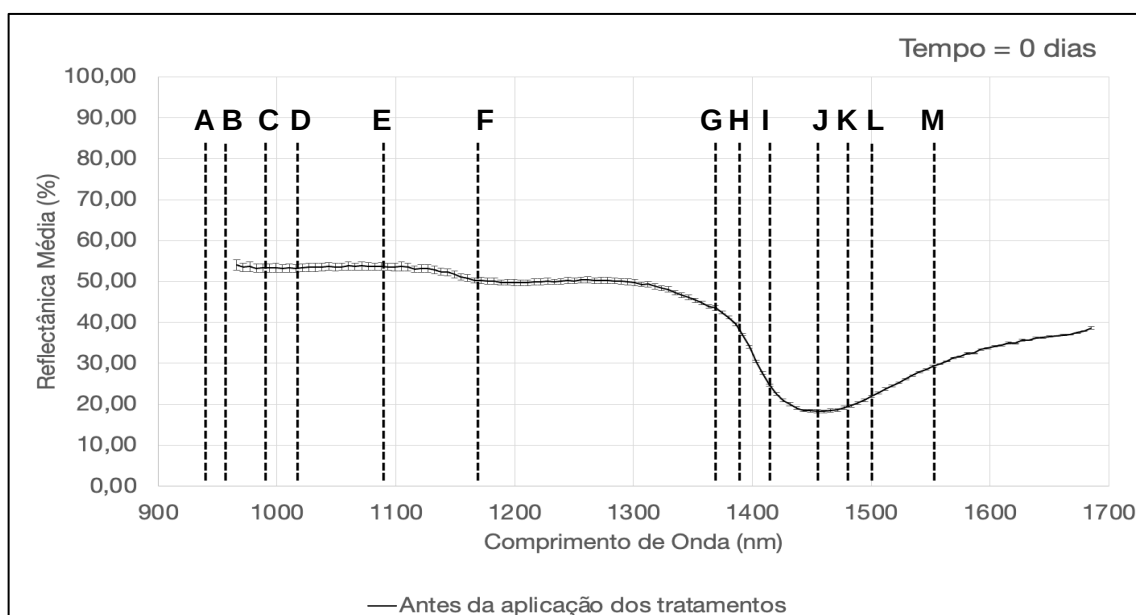


4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo descritivo dos dados de reflectância foliar

A reflectância foliar média das mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) antes de serem submetidas aos tratamentos (tempo zero dias), foi acima de 50% na faixa espectral de 970nm (início da curva) a 1120nm, com uma leve queda em 1200nm, e uma queda acentuada entre 1320 a 1420nm próximo a 20%, e uma leve subida de 20% para 40% na faixa entre 1490 e 1580nm (Figura 13).

Figura 13 – Reflectâncias foliares médias (%) de 40 mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144), no infravermelho próximo e de ondas curtas considerando os comprimentos de onda (nm), segundo o efeito do tempo (dias) antes das mudas serem submetidas aos tratamentos

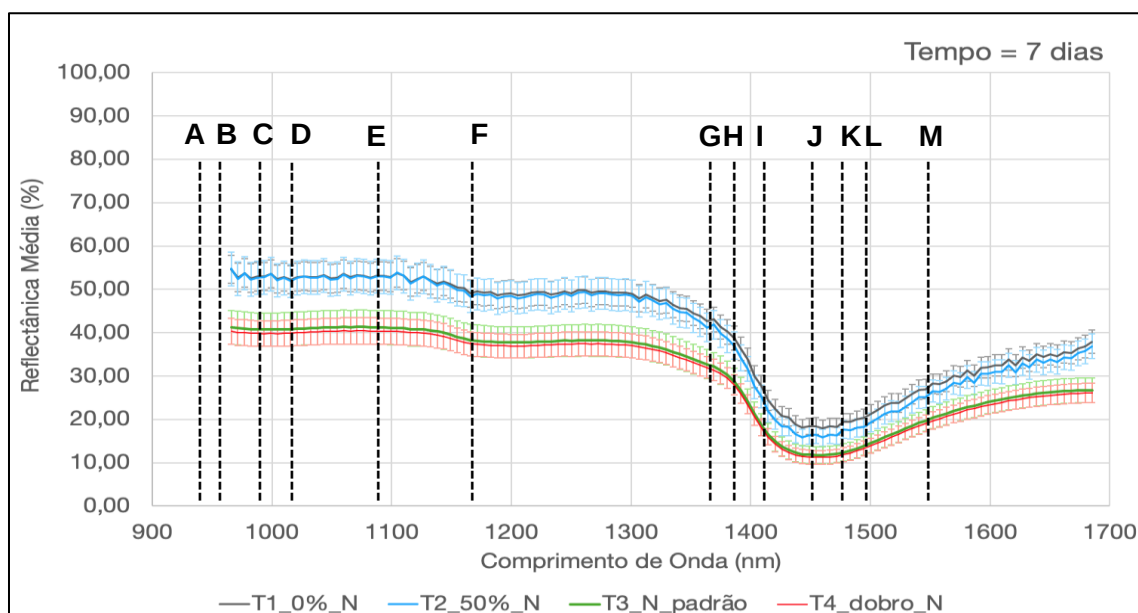


Nota: Nas barras de erro estão representados os desvios padrões. Os principais fatores que controlam a reflectância foliar estão localizados nas faixas espectrais (nm) de 970 (água e amido - **A**); 990 (amido - **B**); 1020 (proteína - **C**); 1040 (ácidos graxos - **D**); 1120 (lignina - **E**); 1200 (água, celulose, amido e lignina - **F**); 1400 (água - **G**); 1420 (lignina - **H**); 1450 (amido, açúcar, lignina e água - **I**); 1490 (celulose e açúcar - **J**); 1510 (proteína e nitrato - **K**); 1530 (amido - **L**); 1580 (amido e açúcar - **M**).

Nessas faixas espectrais, a reflectância foliar é controlada principalmente pela água (970 e 1200nm), amido (970, 990, 1200, 1450, 1530 e 1580nm), proteína (1020 e 1510nm), ácidos graxos (1040nm), lignina (1120, 1200, 1420 e 1450nm), celulose (1200 e 1490nm), açúcar (1450, 1490 e 1580nm) e nitrato (1510nm) (CURRAN, 1989).

Aos 7 dias após as mudas terem sido submetidas aos tratamentos, pôde-se observar dois agrupamentos das curvas médias foliares, um com as mudas submetidas aos tratamentos T1 (0% de nitrogênio) e T2 (50% de nitrogênio), e outro com as mudas submetidas aos tratamentos T3 (dose padrão de nitrogênio) e T4 (dobro da dose padrão de nitrogênio) (Figura 14).

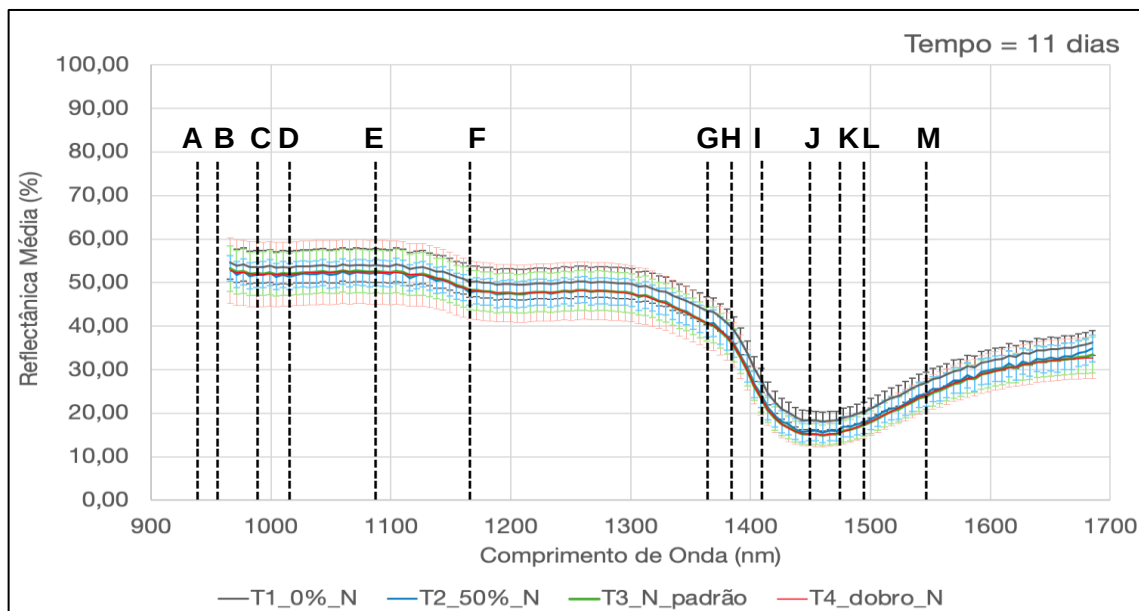
Figura 14 – Reflectâncias foliares médias (%) de 200 mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144), no infravermelho próximo e de ondas curtas considerando os comprimentos de onda (nm), segundo o efeito dos tratamentos e do tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos



Nota: Nas barras de erro estão representados os desvios padrões. Os principais fatores que controlam a reflectância foliar estão localizados nas faixas espectrais (nm) de 970 (água e amido - **A**); 990 (amido - **B**); 1020 (proteína - **C**); 1040 (ácidos graxos - **D**); 1120 (lignina - **E**); 1200 (água, celulose, amido e lignina - **F**); 1400 (água - **G**); 1420 (lignina - **H**); 1450 (amido, açúcar, lignina e água - **I**); 1490 (celulose e açúcar - **J**); 1510 (proteína e nitrato - **K**); 1530 (amido - **L**); 1580 (amido e açúcar - **M**).

Após 11 dias das mudas terem sido submetidas aos tratamentos, ao longo de todo o espectro avaliado, as curvas médias de reflectância de todos os tratamentos ficaram muito próximas. Entretanto, foi possível identificar dois grupamentos distintos, um com a curva das mudas submetidas ao tratamento T1 (0% de nitrogênio), e outro com as mudas submetidas a diferentes concentrações de nitrogênio (Figura 15).

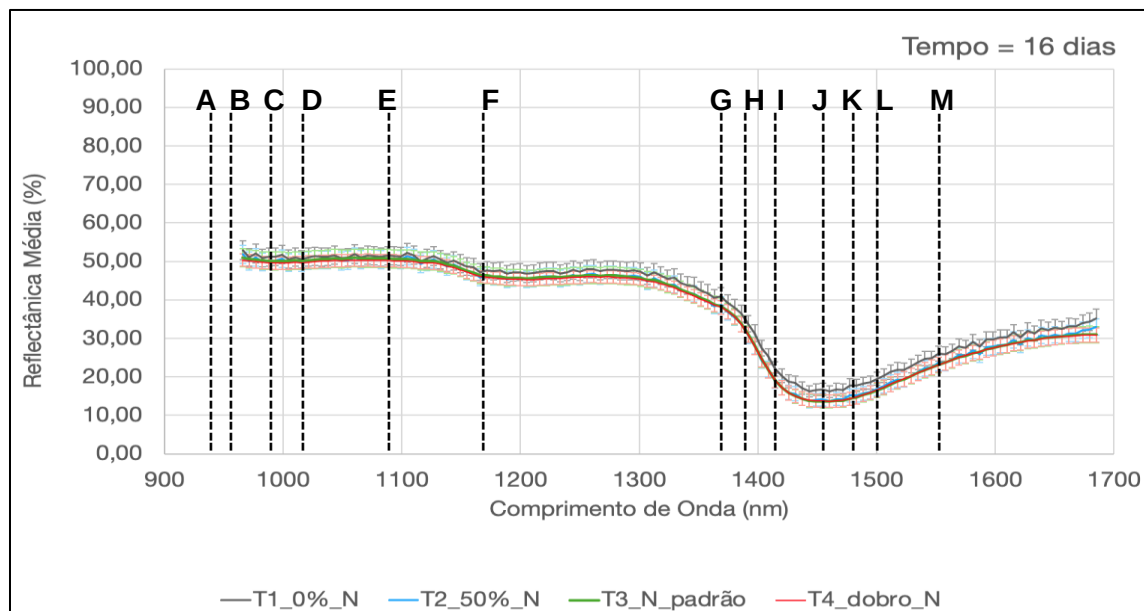
Figura 15 – Reflectâncias foliares médias (%) de 200 mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144), no infravermelho próximo e de ondas curtas considerando os comprimentos de onda (nm), segundo o efeito dos tratamentos e do tempo 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos



Nota: Nas barras de erro estão representados os desvios padrões. Os principais fatores que controlam a reflectância foliar estão localizados nas faixas espectrais (nm) de 970 (água e amido - **A**); 990 (amido - **B**); 1020 (proteína - **C**); 1040 (ácidos graxos - **D**); 1120 (lignina - **E**); 1200 (água, celulose, amido e lignina - **F**); 1400 (água - **G**); 1420 (lignina - **H**); 1450 (amido, açúcar, lignina e água - **I**); 1490 (celulose e açúcar - **J**); 1510 (proteína e nitrato - **K**); 1530 (amido - **L**); 1580 (amido e açúcar - **M**).

Aos 16 dias após as mudas terem sido submetidas aos tratamentos, as curvas médias de todos os tratamentos ficaram muito próximas (Figura 16). Entretanto, nas faixas espectrais entre 1400 e 1580nm houve uma leve separação entre as mudas submetidas ao tratamento T1 (0% de N) e as mudas submetidas aos demais tratamentos (diferentes concentrações de N).

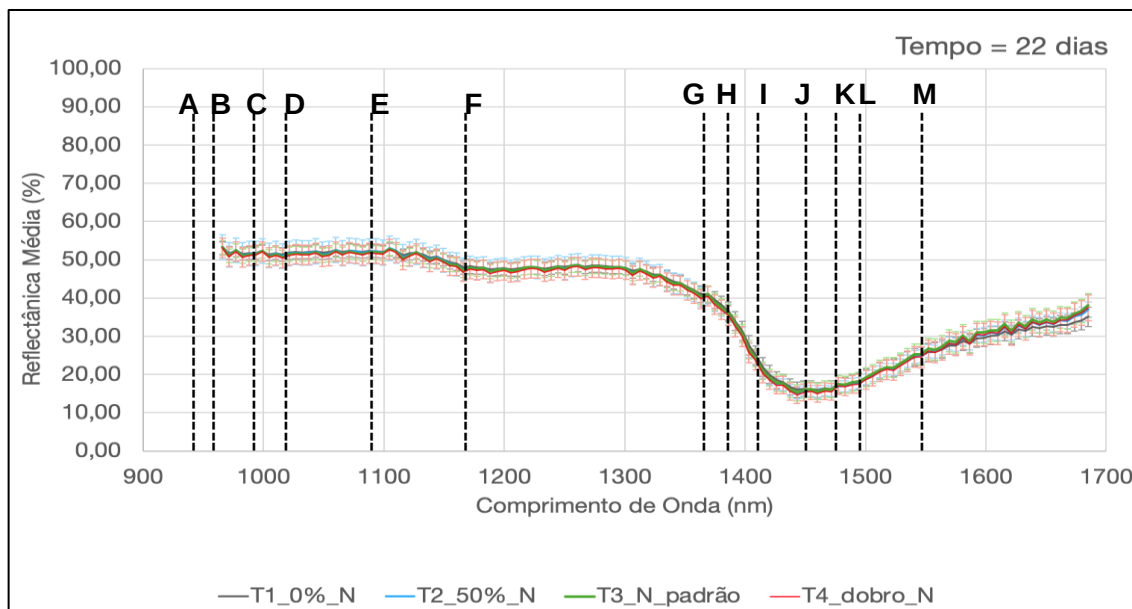
Figura 16 - Reflectâncias foliares médias (%) de 200 mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144), no infravermelho próximo e de ondas curtas considerando os comprimentos de onda (nm), segundo o efeito dos tratamentos e do tempo 16 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos



Nota: Nas barras de erro estão representados os desvios padrões. Os principais fatores que controlam a reflectância foliar estão localizados nas faixas espectrais (nm) de 970 (água e amido - **A**); 990 (amido - **B**); 1020 (proteína - **C**); 1040 (ácidos graxos - **D**); 1120 (lignina - **E**); 1200 (água, celulose, amido e lignina - **F**); 1400 (água - **G**); 1420 (lignina - **H**); 1450 (amido, açúcar, lignina e água - **I**); 1490 (celulose e açúcar - **J**); 1510 (proteína e nitrato - **K**); 1530 (amido - **L**); 1580 (amido e açúcar - **M**).

Aos 22 dias após as mudas terem sido submetidas aos tratamentos, as curvas médias de todos os tratamentos ficaram muito próximas (Figura 17) não sendo possível diferenciar visualmente as curvas espectrais médias dos diferentes tratamentos.

Figura 17 - Reflectâncias foliares médias (%) de 200 mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144), no infravermelho próximo e de ondas curtas considerando os comprimentos de onda (nm), segundo o efeito dos tratamentos e do tempo 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos



Nota: Nas barras de erro estão representados os desvios padrões. Os principais fatores que controlam a reflectância foliar estão localizados nas faixas espectrais (nm) de 970 (água e amido - **A**); 990 (amido - **B**); 1020 (proteína - **C**); 1040 (ácidos graxos - **D**); 1120 (lignina - **E**); 1200 (água, celulose, amido e lignina - **F**); 1400 (água - **G**); 1420 (lignina - **H**); 1450 (amido, açúcar, lignina e água - **I**); 1490 (celulose e açúcar - **J**); 1510 (proteína e nitrato - **K**); 1530 (amido - **L**); 1580 (amido e açúcar - **M**).

4.2 Redução da dimensionalidade dos dados de reflectância – Componentes Principais

Ao analisarmos os valores da proporção da variância acumulada (%) dos dois componentes principais gerados a partir da redução da dimensionalidade dos 128 dados da reflectância foliar (comprimentos de onda do infravermelho próximo e de ondas curtas) foram acima de 95% em todos os tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Entretanto, a proporção da variância (%) do primeiro componente principal (prin1) foi o que melhor explicou a combinação linear dos 128 comprimentos de onda, com valores acima de 80% em todos os tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1 – Autovalores da matriz de correlação dos dois primeiros componentes principais (prin1 e prin2) com base na matriz de correlação, proporção explicada (%) e proporção acumulada (%) da redução da dimensionalidade dos 128 comprimentos de onda na faixa do infravermelho próximo (NIR) e de ondas curtas (SWIR) referentes à reflectância foliar de mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) submetidos a 4 tratamentos

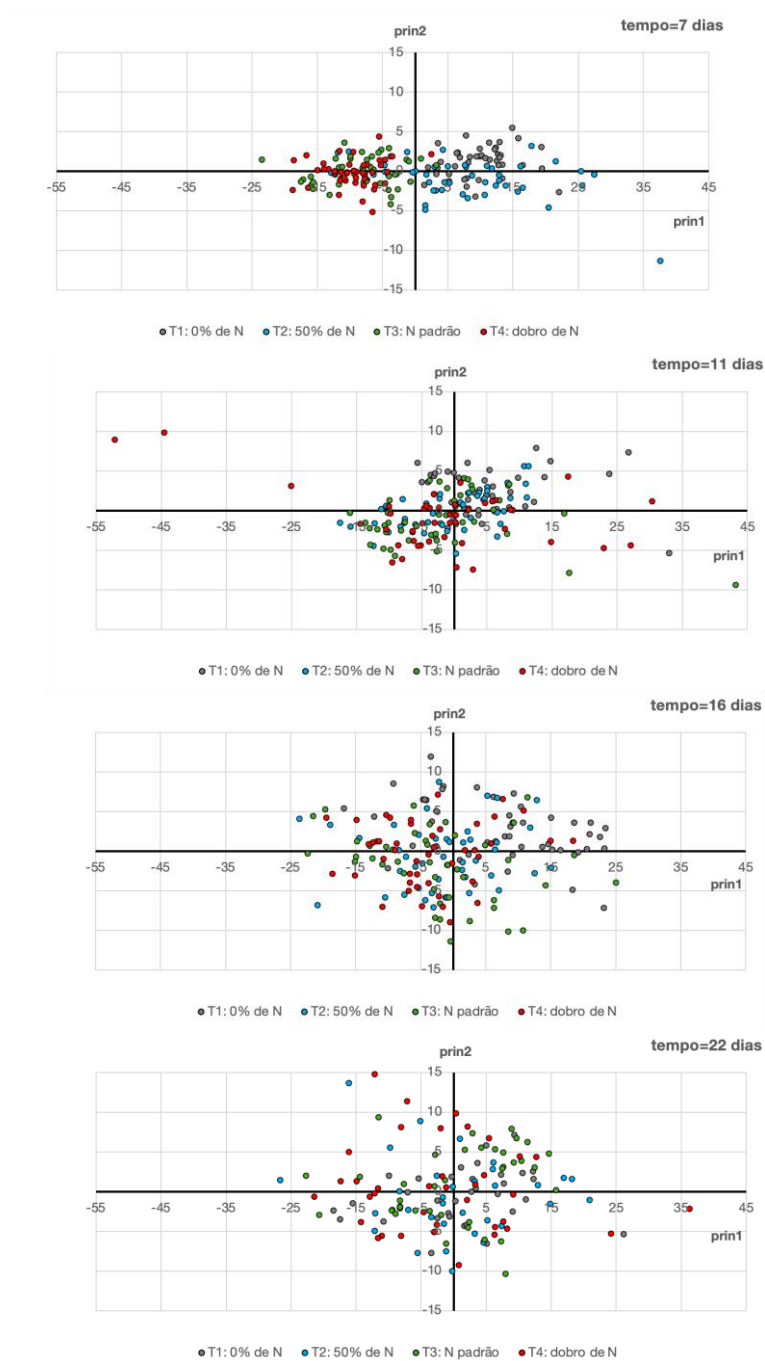
Tempo (dias)*	Componentes	Autovalores	Diferença	Proporção da variância (%)	Proporção da variância acumulada (%)
7	prin1	123,16	118,60	96,22	92,22
	prin2	4,56		3,57	99,78
11	prin1	116,41	105,42	90,05	90,05
	prin2	10,99		8,59	99,53
16	prin1	106,06	86,73	82,86	82,86
	prin2	19,34		15,11	97,97
22	prin1	103,13	80,78	80,57	80,57
	prin2	22,35		17,46	98,03

(*) Tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Aos 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos, a distribuição dos valores das reflectâncias foliares das mudas submetidas aos tratamentos T1 (0% de nitrogênio) e T2 (50% de nitrogênio) ficaram agrupados e separados dos demais tratamentos T3 (concentração padrão de nitrogênio) e T4 (dobro da concentração padrão de nitrogênio) (Figura 18).

Aos 11, 16 e 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos, a distribuição dos valores de todos os tratamentos ficaram muito próximas, não sendo possível identificar um agrupamento de um tratamento específico. Os valores foram se espaçando ao longo do tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Figura 18).

Figura 18 – Os dois primeiros componentes principais (prin1 e prin2) referente à redução da dimensionalidade dos 128 comprimentos de onda referentes à reflectância foliar de mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) na região espectral do infravermelho próximo e de ondas curtas em função do tempo (dias) após serem submetidas aos tratamentos

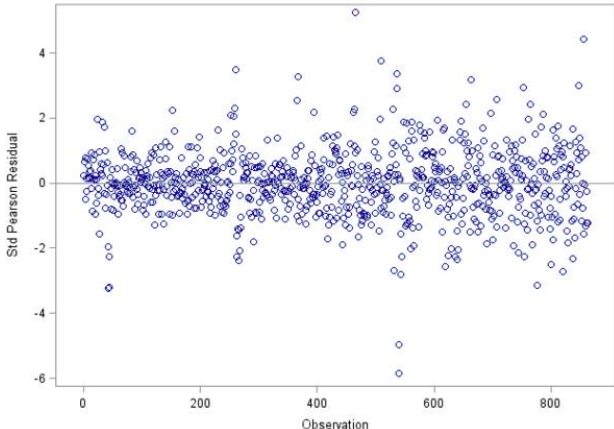


4.3 Efeito dos tratamentos no primeiro componente principal - Modelos Lineares Generalizados

O ajuste do modelo linear generalizado com distribuição normal para o primeiro componente principal, considerando como fatores os tratamentos e os tempos (dias). Em relação à qualidade de ajuste, observamos que o modelo foi bem ajustado, considerando os desvios por graus de liberdade próximos a unidade, bem como o gráfico dos resíduos padronizados que, em sua grande maioria, estão dispostos no intervalo $[-2, +2]$ (Tabela 2).

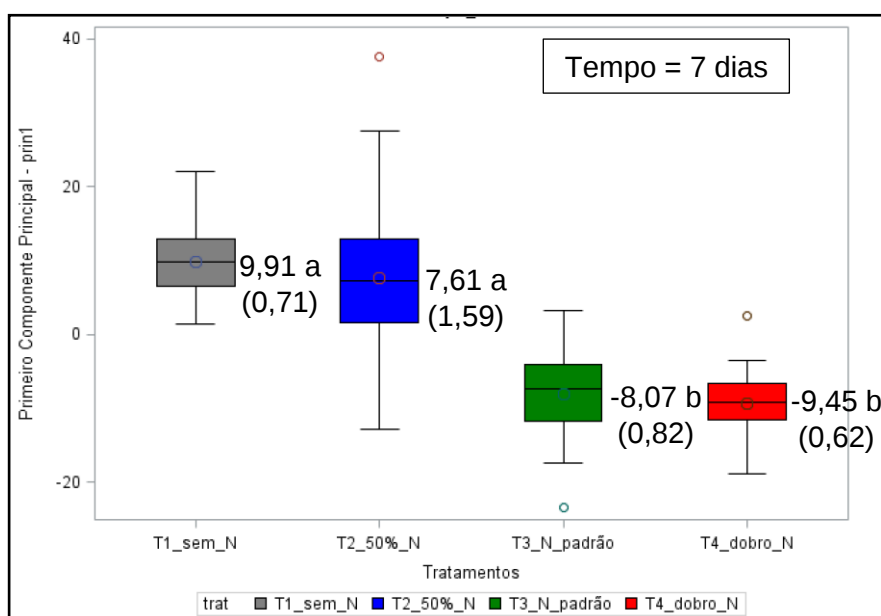
A interação entre os efeitos principais foi significativa a 5% de significância, indicando que as comparações entre os níveis de um fator devem ser feitas dentro dos níveis do outro fator (Tabela 2).

Tabela 2 – Ajuste do modelo linear generalizado com distribuição normal e função de ligação de identidade para o primeiro componente principal (prin1), considerando como fatores principais os tratamentos e o tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos, (a) significância dos fatores principais e interação; (b) qualidade de ajuste: resíduos padronizados de *Pearson* e desvios por graus de liberdade (dgl)

Significância dos fatores principais e interação (a)		Qualidade do ajuste (b)
		Desvios por graus de Liberdade = 1,0240
Efeitos fixos	valores-p (a)	Resíduos padronizados de <i>Pearson</i> 
tratamentos	<0,0001	
tempos (dias)	1,000	
Interação entre Tratamentos e Tempos (dias)	<0,0001	

Aos 7 dias após a aplicação dos tratamentos (Figura 19), com relação ao primeiro componente médio, observamos a formação de dois grupos cujas médias não diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$): um formado pelos tratamentos T1 (0% de N) e por T2 (50% de N); e outro formado pelos tratamentos T3 (dose padrão de N) e T4 (dobro da dose padrão de N).

Figura 19 – Ajuste do modelo linear generalizado com distribuição normal e função de ligação de identidade para o primeiro componente principal (prin1), considerando como fatores principais os tratamentos e o tempo (dias), segundo o tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Teste de Tukey-Kramer)



Nota: Médias seguidas de mesma letra minúsculas não diferem pelo Teste de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

Esse resultado pode ter sido devido ao fato de que plantas submetidas a diferentes variações na concentração de nitrogênio possuem algumas características espectrais diferentes em relação as plantas verdes sadias.

Em plantas com falta de nitrogênio, há um aumento nas concentrações de carotenoides (pigmento fotossintetizante de coloração amarelada) e redução na produção de clorofila (pigmento fotossintetizante de coloração verde), conseqüentemente uma menor absorção da radiação eletromagnética por esses pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas das plantas (JANSEN, 2009).

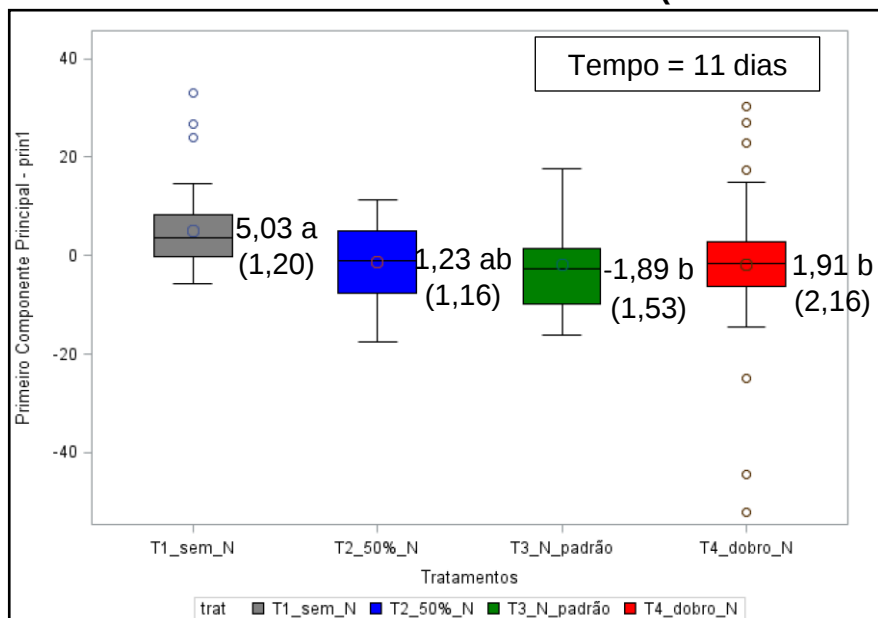
Com a redução desses pigmentos há uma menor absorção da radiação eletromagnética, consequentemente maior reflectância na região espectral do visível, resultando em um maior aumento da reflectância foliar na região do infravermelho (JANSEN, 2009).

Esse aumento da reflectância na região espectral do infravermelho próximo (NIR) pode ser explicado pelas mudanças causadas nas estruturas internas das folhas (BAUER et al., 1980; RIPPLE, 1985), devido a reflectância na região NIR ser controlada pela estrutura celular interna e pela morfologia das folhas das plantas (SANO et al., 2019) e o nitrogênio por ser um nutriente que compõe a estrutura celular das plantas, seu excesso ou sua deficiência causam modificações nessas estruturas (FAQUIN, 2005).

Nessa região espectral (NIR), quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar do parênquima lacunoso, maior será o espalhamento interno da radiação eletromagnética, e como resultado dessa interação, maior será a reflectância foliar (PONZONI, 2002).

Aos 11 dias após a aplicação dos tratamentos (Figura 20) com relação ao primeiro componente médio, observamos a formação de dois grupos cujas médias não diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$): um formado pelos tratamentos T1 (0% de N) e por T2 (50% de N); e outro formado pelos tratamentos T2 (50% de N), T3 (dose padrão de N) e T4 (dobro da dose recomendada da N). Observamos que, neste caso, o tratamento T1 (0% de N) difere estatisticamente ($p < 0,05$) dos tratamentos T3 (dose padrão de N) e T4 (dobro da dose recomendada de N).

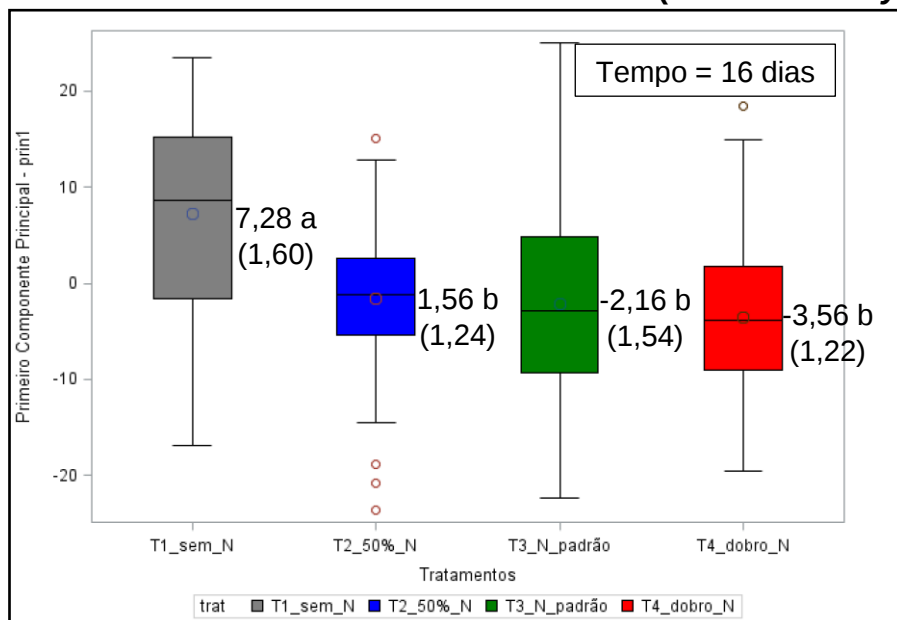
Figura 20 – Ajuste do modelo linear generalizado com distribuição normal e função de ligação de identidade para o primeiro componente principal (prin1), considerando como fatores principais os tratamentos e o tempo 11 dias, segundo o tempo 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Teste de *Tukey-Kramer*)



Nota: Médias seguidas de mesma letra minúsculas não diferem pelo Teste de *Tukey-Kramer* ($p < 0,05$).

Aos 16 dias após a aplicação dos tratamentos (Figura 21), com relação ao primeiro componente médio, observamos a formação de dois grupos: um formado pelo tratamento T1 (0% de N) e outro formado pelos tratamentos T2 (50% de N), T3 (dose padrão de N) e T4 (dobro da dose recomendada da N), cujas médias não diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Figura 21 – Ajuste do modelo linear generalizado com distribuição normal e função de ligação de identidade para o primeiro componente principal (prin1), considerando como fatores principais os tratamentos e o tempo (dias), segundo o tempo 16 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Teste de *Tukey-Kramer*)

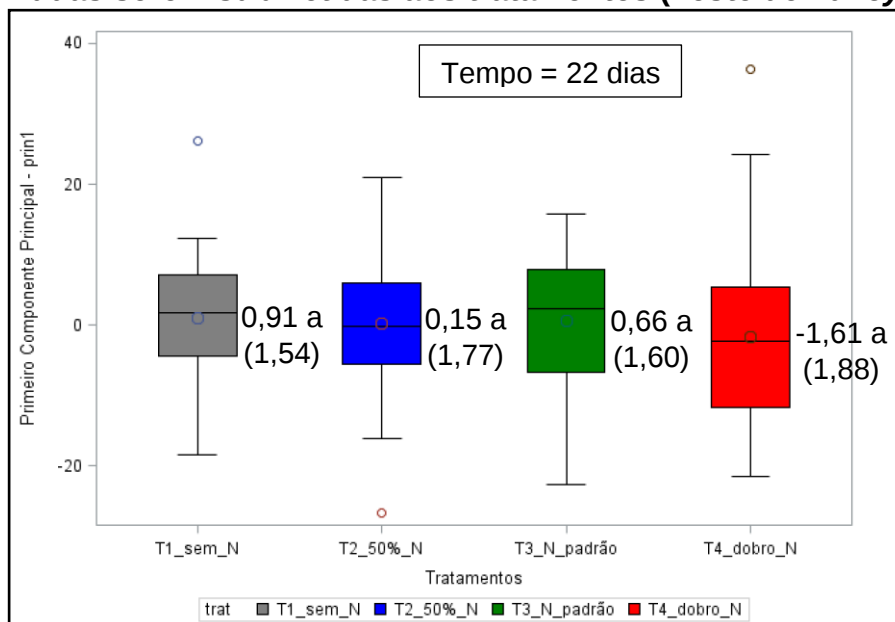


Nota: Médias seguidas de mesma letra minúsculas não diferem pelo Teste de *Tukey-Kramer* ($p < 0,05$).

Aos 22 dias após a aplicação dos tratamentos (Figura 22), com relação aos primeiros componentes médios, observamos a formação de um grupo único formado por todos os tratamentos: T1 (0% de N), T2 (50% de N), T3 (dose padrão de N) e T4 (dobro da dose recomendada da N), cujas médias não diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial para as plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004), pois participa de muitos processos fisiológicos e metabólicos das plantas. Porém, quando as doses de fertilizantes aplicadas nas plantas são insuficientes (MALAVOLTA et al., 1989; CAMARGO, 2012; FAQUIN, 2012) ou excessivas (MALAVOLTA et al., 1989; FAQUIN, 2012), as plantas não conseguem completar seu ciclo de vida (CAMARGO, 2012), ocorrendo danos ao crescimento, consequentemente perda em sua produtividade (MALAVOLTA et al., 1989) e sua qualidade é comprometida, podendo acarretar em sua morte (CAMARGO, 2012).

Figura 22 – Ajuste do modelo linear generalizado com distribuição normal e função de ligação de identidade para o primeiro componente principal (prin1), considerando como fatores principais os tratamentos e o tempo (dias), segundo o tempo 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Teste de *Tukey-Kramer*)



Nota: Médias seguidas de mesma letra minúsculas não diferem pelo Teste de *Tukey-Kramer* ($p < 0,05$).

Essas alterações fisiológicas e metabólicas que ocorrem nas plantas, resultam na forma com que as plantas absorvem e refletem a radiação eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda (PONZONI et al., 2015).

Na faixa espectral do infravermelho próximo e de ondas curtas, a interação da radiação eletromagnética ocorre no parênquima lacunoso da estrutura foliar das plantas (JENSEN, 2009) e nessa região, a absorvância e a reflectância foliar são controladas principalmente pela água (970, 1200 e 1400nm) amido (970, 990, 1200, 1450, 1530 e 1580nm), proteína (1020 e 1510nm), ácidos graxos (1040nm), lignina (1120, 1200, 1420 e 1450nm), celulose (1200 e 1490nm), açúcar (1450, 1490 e 1580nm) e nitrato (1510nm) (CURRAN, 1989).

Ao observar os valores médios das reflectâncias foliares das mudas de eucalipto, foi possível identificar que a curva das mudas submetidas aos tratamentos com e sem nitrogênio foram diferentes aos 3, 7 e 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Isso se deve pelo fato da região espectral do infravermelho estar diretamente relacionada à estrutura celular das folhas e o nitrogênio ser um elemento que participa de diversas funções essenciais para o desenvolvimento e sobrevivência das plantas.

As diferentes concentrações de nitrogênio causaram mudanças na reflectância espectral das mudas de eucalipto.

As curvas médias das mudas sem nitrogênio estão acima das curvas dos tratamentos com nitrogênio, ou seja, evidenciaram que quando as mudas são submetidas a tratamentos sem nitrogênio, a curva aumenta em relação as curvas das plantas submetidas aos tratamentos com nitrogênio, que diminuem sua reflectância.

A reflectância está identificando a consequência da falta ou do excesso de nitrogênio nessa faixa espectral, e quem controla essa reflectância no infravermelho próximo é a estrutura celular da folha da planta.

4.4 Efeito dos tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos no primeiro componente principal (prin1) - Modelos de Regressão Lineares Generalizados

O comportamento médio dos primeiros componentes principais no tempo, segundo tratamentos, não fica muito claro um possível efeito do tempo, sendo necessário o ajuste de modelos de regressão linear simples na sequência (Figura 23).

Após o ajuste dos modelos de regressão linear normal para o efeito do tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos no primeiro componente principal, observamos: a) tendência de diminuição do primeiro componente principal no tempo para os tratamentos T1 (0% de N) e T2 (50% de N), caracterizados pelas estimativas de β_2 negativas e com $p < 0,05$; b) tendência de aumento significativo do primeiro componente principal no tempo para os tratamentos T3 (dose padrão de N) e T4 (dobro da dose padrão de N), caracterizados pelas estimativas de β_2 positivas e com $p < 0,05$ (Tabela 3).

Figura 23 – Médias do primeiro componente principal, segundo tratamentos e tempos (dias) após as mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) serem submetidas aos tratamentos

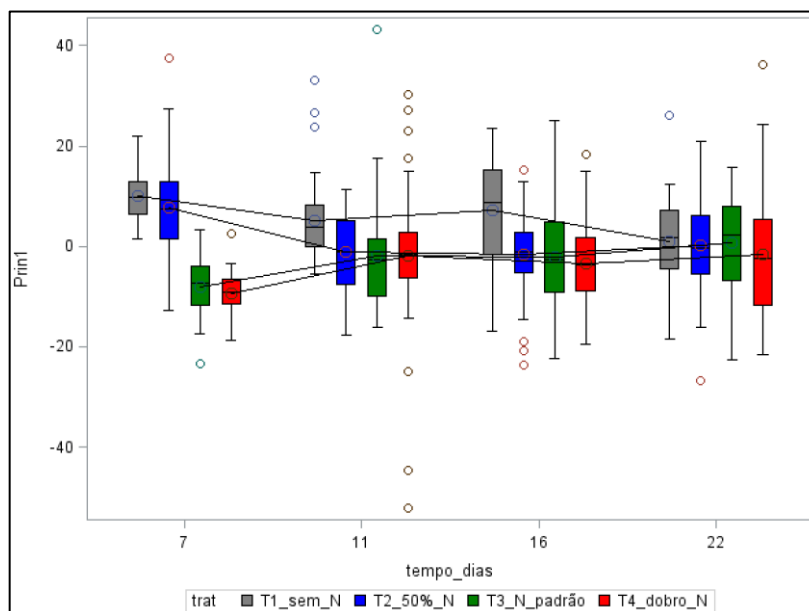


Tabela 3 – Ajuste do modelo linear de regressão para o primeiro componente principal (prin1) em função do tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos

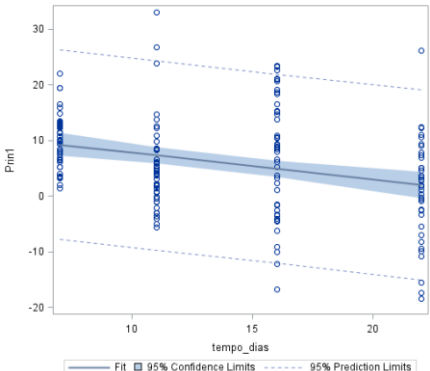
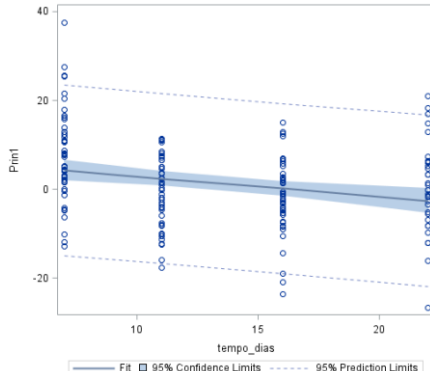
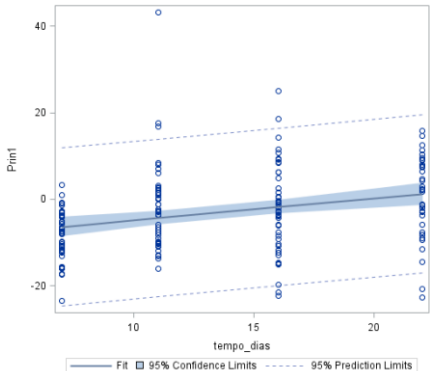
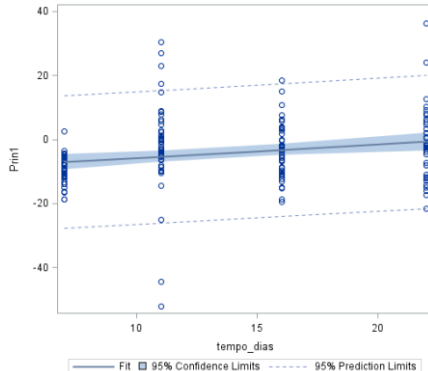
Tratamentos	
T1 – 0% de Nitrogênio	T2 - 50% de Nitrogênio
Modelo Ajustado $\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1(tempo)$	Modelo Ajustado $\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1(tempo)$
	
Parâmetros estimados (valor-p)	Parâmetros estimados (valor-p)
$\hat{\beta}_0 = 12,60417 (< 0,0001)$	$\hat{\beta}_0 = 7,43566 (0,0003)$
$\hat{\beta}_1 = -0,48365 (< 0,0001)$	$\hat{\beta}_1 = -0,45539 (0,0013)$
Qualidade do ajuste	Qualidade do ajuste
$R^2_{aj} = 8,19 \%$	$R^2_{aj} = 5,53 \%$

Tabela 3 (continuação) – Ajuste do modelo linear de regressão para o primeiro componente principal (prin1) em função do tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Tratamentos	
T3 - concentração padrão de Nitrogênio	T4 – dobro da concentração de Nitrogênio
Modelo Ajustado $\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1(\text{tempo})$	Modelo Ajustado $\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1(\text{tempo})$
	
Parâmetros estimados (valor-p)	Parâmetros estimados (valor-p)
$\hat{\beta}_0 = -9,94406 (< 0,0001)$	$\hat{\beta}_0 = -9,99072 (0,0001)$
$\hat{\beta}_1 = 0,50792 (< 0,0001)$	$\hat{\beta}_1 = 0,42068 (0,0042)$
Qualidade do ajuste	Qualidade do ajuste
$R^2_{aj} = 7,83 \%$	$R^2_{aj} = 4,13 \%$

4.5 Classificação dos tratamentos pelo Modelo Logístico Multinomial e Função Linear/Quadrática Discriminante

Na Tabela 4 são apresentadas as acurácias ou percentual médio de acertos (%), seguidos das estatísticas desvio padrão mínimo, mediana e máximo das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo os modelos logístico multinomial e função linear quadrática discriminante, número de categorias de tratamentos e tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Os melhores resultados de acurácia puderam ser observados no modelo logístico multinomial em todas as categorias de tratamentos e tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Tabela 4 – Acurácia ou percentual médio de acertos (%), seguidos das estatísticas desvio padrão mínimo (mín.), mediana (med.) e máximo (máx.) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo modelo, número de categorias de tratamentos (*) e tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Modelo	Tratamentos	Tempo (dias)	Acurácia	Desvio padrão	Mín.	Med.	Máx.
Logístico Multinomial	2a	7	93,12	1,58	88,89	93,52	98,15
Função Discriminante	2a	7	92,45	2,67	83,33	93,06	98,61
Logístico Multinomial	4	7	59,57	3,83	49,07	59,72	72,22
Logístico Multinomial	2b	7	58,54	3,35	47,22	58,33	68,52
Função Discriminante	2b	7	57,93	4,67	43,06	58,33	75,00
Função Discriminante	4	7	56,93	4,70	43,06	56,94	73,61
Logístico Multinomial	2a	11	67,53	3,08	55,56	67,59	76,85
Função Discriminante	2a	11	64,09	4,87	45,83	63,89	81,94
Logístico Multinomial	2b	11	60,82	2,90	50,93	61,11	69,44
Função Discriminante	2b	11	57,40	5,12	36,11	58,33	72,22
Logístico Multinomial	4	11	40,32	3,27	31,48	40,28	50,93
Função Discriminante	4	11	35,88	5,20	19,44	36,11	51,39
Logístico Multinomial	2a	16	66,83	3,21	56,48	66,67	76,85
Função Discriminante	2a	16	66,34	4,56	54,17	66,67	80,56
Logístico Multinomial	2b	16	64,21	2,82	55,56	63,89	73,15
Função Discriminante	2b	16	62,85	4,47	48,61	62,50	75,00
Logístico Multinomial	4	16	43,52	3,30	33,33	43,52	54,63
Função Discriminante	4	16	39,81	4,50	25,00	40,28	52,78
Logístico Multinomial	2a	22	56,53	4,31	43,68	56,32	70,11
Logístico Multinomial	2b	22	54,99	3,26	44,83	55,17	65,52
Função Discriminante	2a	22	54,24	6,23	21,43	53,57	73,21
Função Discriminante	2b	22	46,61	5,07	30,36	46,43	60,71
Logístico Multinomial	4	22	32,93	3,71	21,84	33,33	44,83
Função Discriminante	4	22	26,13	5,09	12,50	26,79	42,86

Nota: Valores médios ordenados decrescentes por tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

(*)Categorias de tratamentos: **2a (2 categorias): N fora de padrão (Tratamentos T1 (0% de N); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e N padrão (Tratamento T3); 2b (2 categorias): Com N (Tratamentos T3 (N padrão); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e Sem N (Tratamento T1); 4 (4 categorias): 0% de N (Tratamento T1), 50% de N (Tratamento T2), N padrão (Tratamento T3) e dobro de N (Tratamento T4).**

4.5.1 Seleção dos melhores modelos

Dentre os modelos estatísticos ajustados para os valores das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, o modelo logístico multinomial foi o que obteve os melhores percentuais médios de acertos (acurácia) por dia de avaliação após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Apêndices A a D).

No tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos, os percentuais médios de todas as estratégias com duas e quatro categorias de

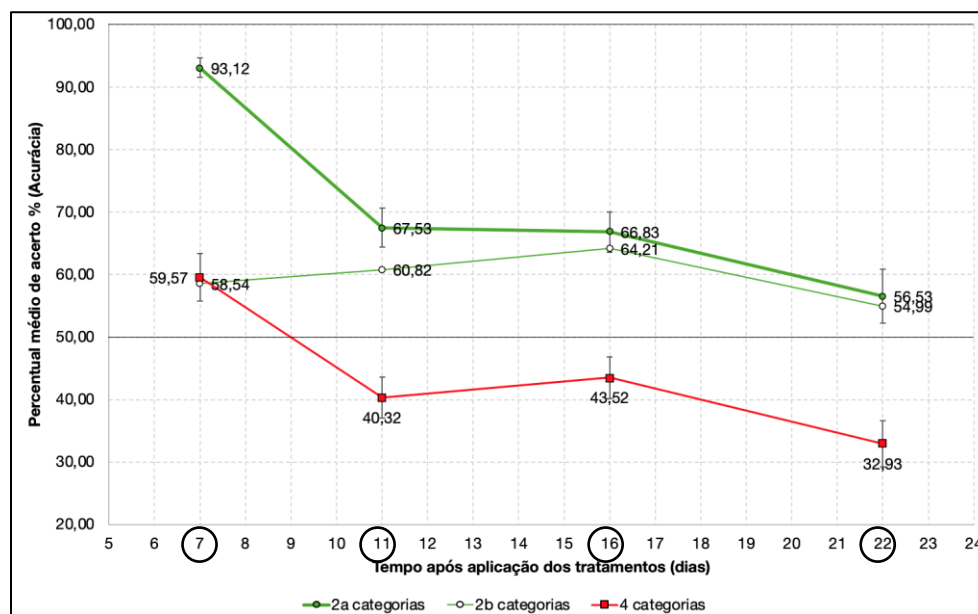
tratamentos foram acima de 50%, chegando a mais de 90% com duas categorias de tratamentos.

Ao longo do tempo (dias), os percentuais médios de todas as estratégias foram diminuindo, mas permaneceram acima de 50%.

Entretanto, a estratégia com 4 categorias de tratamentos foi a que apresentou os piores percentuais médios, chegando a pouco mais de 30% aos 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos.

Os melhores percentuais médios foram identificados nas estratégias com duas categorias de tratamentos em todos os tempos (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos (Figura 24).

Figura 24 – Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) do modelo de regressão logística multinomial segundo o tempo (dias) após as mudas serem submetidas aos tratamentos para cada categoria de tratamentos



(*)Categorias de tratamentos: **2a (2 categorias): N fora de padrão (Tratamentos T1 (0% de N); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e N padrão (Tratamento T3); 2b (2 categorias): Com N (Tratamentos T3 (N padrão); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e Sem N (Tratamento T1); 4 (4 categorias): 0% de N (Tratamento T1), 50% de N (Tratamento T2), N padrão (Tratamento T3) e dobro de N (Tratamento T4).**

CONCLUSÕES

De modo geral, a espectrometria na região espectral do infravermelho próximo e de ondas curtas foi capaz de identificar os tratamentos das mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144) submetidas ao tratamento sem nitrogênio (T1) das mudas submetidas aos tratamentos com a dose recomendada e o dobro da dose recomendada de nitrogênio (tratamentos T3 e T4, respectivamente).

Dessa forma, a técnica de espectrometria de infravermelho próximo e de ondas curtas aliada ao modelo de regressão logística multinomial foi eficiente para detectar diferentes concentrações de nitrogênio em mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone I144).

Portanto, é uma técnica promissora a ser empregada em viveiros florestais que necessitem de um suporte para um melhor manejo nutricional na fase de mudas, visando mudas de qualidade em quantidade e uma produção de mudas mais sustentável, minimizando o uso excessivo de fertilizantes em sua produção.

Salientamos que a espectrometria de infravermelho próximo e de ondas curtas não substitui as técnicas tradicionais de identificação de estresse nutricional. Esses métodos tradicionais são fundamentais para a modelagem de novas tecnologias em métodos supervisionados (como o utilizado neste trabalho).

Estudos posteriores a esse, utilizando outras espécies florestais e o efeito da interação eletromagnética na região espectral do infravermelho próximo e de ondas curtas com outros nutrientes e aliados aos aspectos morfofisiológicos das espécies, se tornam importantes ferramentas para o emprego dessa técnica em larga escala, para que essa técnica seja difundida não apenas na literatura acadêmica e científica, mas que possa estar presente na rotina dos viveiros florestais.

REFERÊNCIAS

- ACQUAH, G. E.; VIA, B. K.; FASINA, O. O.; ECKHARDT, L. G. **Non-Destructive Prediction of the Properties of Forest Biomass for Chemical and Bioenergy Applications Using near Infrared Spectroscopy**. Journal of Near Infrared Spectroscopy, v. 23, n. 2, 2015.
- ALBA, J. M. F.; CRUZ, L. E. C.; DUCATI, J. R.; DOMINGUES, J. M. M.; MORAES, J. O.; CUNHA, H. N. **Espectrorradiometria na agricultura de precisão: estudo de caso em solos de terras baixas, Capão do Leão, RS, Brasil**. In: OLIVEIRA, R. J. de (Org.). Agricultura em foco: tópicos em manejo, fertilidade do solo e impactos ambientais. Guarujá: Científica, v. 1, cap. 27, p. 193-202, 2020.
- ANDRADE, A. C.; FONSECA, D. M.; QUEIROZ, D. S.; SALGADO, L.T.; CECON, P. R. **Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier)**. Ci. Agrotec., p.1643-1651, 2003.
- ARNON, D.I.; STOUT, P.R. **The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper**. Plant physiology, v. 14, n. 2, p. 371, 1939.
- AYALA-SILVA, T.; BEYL, C. A. **Use of neural networks to discriminate between control leaves of wheat or those deficient in nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium using spectral data**. Proceedings of the 5th Biannual World Automation Congress, Orlando, FL, USA, pp. 49-57, 2002.
- BALDIN, T.; TALGATTI, M.; DA SILVEIRA, A. G.; DOS SANTOS, G. A.; DOS SANTOS, O. P.; VALENTE, B. M. dos R. T. **Modelos NIRS para as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage**. Caderno de Ciências Agrárias, v. 12, 2020.
- BAPTISTA, G. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.15087123>. Acesso em 22 set. 2023.
- BATAGLIA, O. C.; DECHEN, A. R.; SANTOS, W. R. dos. **Princípios da diagnose foliar**. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). O solo nos grandes domínios morfológicos do Brasil e o desenvolvimento sustentável. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Universidade Federal de Viçosa, p. 647-660, 1996.
- BRASIL, E. C.; VIÉGAS, I. de J. M.; SILVA, E. S. A.; GATO, R. F. **Nutrição e adubação: conceitos e aplicações na formação de mudas de pimenta longa**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 23p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 13), 1999.
- BRUUN, S.; STENBERG, B.; BRELAND, T. A.; GUDMUNDSSON, J.; HENRIKSEN, T. M.; JENSEN, L. S.; KORSÆTH, A.; LUXHOI, J.; PÁLMASON, F.; PEDERSEN, A.; SALO, T. **Empirical predictions of plant material C and N mineralization patterns from near infrared spectroscopy, stepwise chemical digestion and C/N ratios**. Soil Biology and Biochemistry, v. 37, n. 12, 2005.
- CAMARGO, M. S. A. **Importância do uso de fertilizantes para o meio ambiente**. Pesquisa & Tecnologia, Campinas, vol. 9, n. 2, 2012.

CARVALHO NETO, J. P.; SILVA, E. B.; SANTANA, R. C.; GRAZZIOTTI, P. H.; FERNANDES, J. S. C.; FREITAS, J. P. X. de; SOUZA, C. V. de. **Partição de biomassa seca e nutriente em minicepas de eucalipto influenciada pela adubação NPK**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 467-476, jul.-set., 2012.

CHAVES, C. M. M. B. **Diagnose nutricional de enxofre em eucalipto por análise não destrutiva**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-MG, 2017.

CIB, CONSELHO DE INFORMAÇÃO SOBRE BIOTECNOLOGIA. **Guia do Eucalipto: oportunidade para um desenvolvimento sustentável**. 2014.

COSTA, B. S.; OLIVEIRA, M. L. **Florestas plantadas de eucalipto no Brasil: uma cultura nociva aos recursos hídricos?** Veredas do Direito, Belo Horizonte, v.16, n.36, 2019.

COSTA, M. C. G.; TONINI, H.; SCHWENGBER, J. A. M. **Aspectos sobre nutrição e adubação do eucalipto: fundamentos para pesquisas em Roraima**. Boa Vista, RR: Embrapa Roraima, 29p. (Embrapa Roraima. Documentos, 03), 2008.

CURRAN, P. J. **Remote sensing of foliar chemistry**. Remote Sensing of Environment, v.30, n.3, 1989.

DA SILVA, R. B. G.; SIMÕES, D.; DA SILVA, C. R. R.; DELGADO, L. G. M.; DOS SANTOS, R. L.; MUNIS, R. A. **Produção de mudas clonais de Eucalyptus em viveiros florestais**. In: DA SILVA, M. C. A. C. (Org.). Tópicos especiais sobre a cultura do eucalipto. SP: Bauru, Spessoto, 2022.

DELL, B.; MALAJCZUK, N.; GROVE, T. S. **Nutrients disorders in plantation eucalypts**. Camberra: Australian Center for International Agriculture Research, 104p., 1995.

DE AMORIM, V. da S. S.; MONTEIRO, K. M. S.; SOUSA, G. O.; DAMASCENA, J. F.; PEREIRA, J. A.; MORAES, W. dos S. **Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura**. Research, Society and Development, v.10, n.11, 2021.

DE OLIVEIRA, M. A.; LEITE, R. S.; MANDARINO, J. M. G. Avaliação de Indicadores de Qualidade Tecnológica da Soja por Espectroscopia no Infravermelho Próximo. In: TIBOLA, C. S.; DE MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; DE OLIVEIRA, M. A. (Editores técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2018.

DE PAULA, M. A.; VIEIRA, O. V.; MENOSSI, S.; CARVALHO, J. E.; ABUCÁTER, C. R. V. Aplicações da Espectroscopia no Infravermelho Próximo na Cadeia Produtiva de Grãos. In: TIBOLA, C. S.; DE MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; DE OLIVEIRA, M. A. (Editores técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2018.

DEL QUIQUI, E. M.; MARTINS, S. S.; PINTO, J. C.; PARAZZI, P. J.; MUNIZ, A. S. **Crescimento e composição mineral de mudas de eucalipto cultivadas sob condições de diferentes fontes de fertilizantes**. Acta Scientiarum. Agronomy. Maringá, v. 26, n. 3, p. 293-299, 2004.

DOS SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETTI JÚNIOR, A. **Doenças do eucalipto no sul do Brasil: identificação e controle**. Embrapa: Circular Técnica, n.45, Colombo, PR, 2001.

DURYEA, M. L. Evaluating seedling quality importance to reforestation. In: DURYEA, M. L. **Evaluating seedling quality principles, procedures, and predictive abilities of major tests** Corvallis: Forest Research Laboratory Oregon State University, p. 1-6, 1985.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Transferência de Tecnologia Florestal. Brasília, DF: Embrapa, 138 p., 2014.

EPSTEIN, E; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Ed. Plantas, p. 42-65, 2006.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. Monografia (Especialização em Fertilidade do solo e Nutrição de plantas no agronegócio), Universidade Federal de Lavras, MG, 2002.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Monografia (Especialização em solos e meio ambiente). Universidade Federal de Lavras, MG, 2005.

FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L. da; MARTIN NETO, L.; SILVEIRA, P. M. da; MADARI, B. E. **Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1769-1777, 2012.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê**. 3.ed. Passo fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006.

FOELKEL, C. E. B. **Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo**. Visão Agrícola, n.4, 2005.

FOLEY, W., MCILWEE, A., LAWLER, I.; ARAGONÉS, L.; WOOLNOUGH, A. P.; BERDING, N. **Ecological applications of near infrared reflectance spectroscopy – a tool for rapid, cost-effective prediction of the composition of plant and animal tissues and aspects of animal performance**. Oecologia, v.116, 1998.

FORATO, L. A.; BERNARDES FILHO, R.; OSIRO, D.; BICUDO, T. de C.; COLNAGO, L. A. A Espectroscopia na região do Infravermelho e algumas aplicações. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2010.

FREITAG, A. S. **Frequências de irrigação para *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* em viveiro**. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

GONÇALVES, J. L. M. **Recomendações de Adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e Espécies Típicas da Mata Atlântica**. Documentos Florestais, Piracicaba, v. 15, p. 1-23, 1995.

GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. G.; MORAES NETTO, S. P. de; MANARA, M. P.; STAPE, J. L. **Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização**. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETI, V. (Eds.). Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, p. 309-350, 2000.

GONZÁLEZ, E. R. **Transformação genética de *Eucalyptus grandis* e do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* via *Agrobacterium***. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agronomia “Luis de Queiroz”, 2002.

GOULART, I. C. G. R.; MARTINS, G.; SANTAROSA, E.; PENTEADO, J. F.; DERETI, R. M.; IEDE, E. T. **Diagnóstico preliminar das demandas por tecnologias florestais em cooperativas agropecuárias do estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas, Documentos, 234.

GRATTAPAGLIA, D. **Genômica aplicada à genética e melhoramento de Eucalyptus na Embrapa: 25 anos de avanços e as perspectivas para o futuro**. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

GUO, T.-T.; GUO, L.; WANG, X.-W.; LI, M. **Application of NIR Spectroscopy in Classification of Plant Species**. First International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2009.

GUO, T.-T.; ZHANG, B.; GHU, L.; LI, D.-S.; WU, Y.; WU, J.-J.; ZHAO, L. **Classification of Plant Leaves by Near-infrared Spectroscopy using ANN and Wavelet**. Second International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2010.

HARPER, J. E. **Nitrogen metabolism**. In: BOOTE, K. J.; BENNETT, J. M.; SINCLAIR, T. R. (Ed.). Physiology and determination of crop yield. Madison: American Society of Agronomy: Crop Science Society of America: Soil Science Society of America, p. 285-302, 1994.

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. A. **Fertirrigação em viveiros de mudas de Eucalyptus e Pinus**. In: Fertirrigação: teoria e prática. BOARETTO, A. E.; VILLAS BOAS, R. L.; SOUZA, W. F. PARRA, L. R. V. (Eds.) 1ed. Piracicaba, v.1, p.677-725, 2004 (CD-Rom).

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R.L.A. **Fertirrigação em viveiros de mudas de Eucalyptus e Pinus**. In: BOARETTO, A. E.; VILLAS BOAS, R. L.; SOUZA, V. F.; PARRA, I. R. V. (Eds.). Fertirrigação: teoria e prática. Piracicaba, 2006.

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. V. A.; GONÇALVES, A. N. **A evolução do jardim clonal na produção de mudas**. IPEF notícias, v. 24, n. 148, p. 4-6, 2000.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados. 80p. (Documentos/Embrapa Soja, ISSN 1516-781X; n.283), 2007.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Ibá 2016**. Brasília, DF, 2016.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Ibá 2022**. Brasília, DF, 2022.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

JIN, C.; HUANG, M. LIU, F.; HE, Y.; LI, X. **Estimating Nitrogen Status of Plant by Vis/NIR Spectroscopy and Mathematical Model**. Fifth International Conference on Natural Computation, Tianjian, China, 2009.

JOHNSON, R.; WICHERN, D. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6 ed. Prentice Hall, New Jersey, 2014.

KÄFER, P., S., REX, F. E., SANTOS, M.; SEBEM, E. **Caracterização espectral e NDVI de espécies florestais das famílias Fabaceae, Myrtaceae, Rutaceae e Salicaceae.** ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.23; p. 2016.

KREZHOVA, D.; KIROVA, E. **Hyperspectral remote sensing of the impact of environmental stresses on nitrogen fixing soybean plants (*Glycine max L.*).** Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Turkey, pp. 172-177, 2011.

LEBLON, B.; ADEDIPE, O.; HANS, G.; HADDADI, A.; TSUCHIKAWA, S.; BURGER, J.; STIRLING, R.; PIROUZ, Z.; GROVES, K.; NADER, J.; LAROCQUE, A. **A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood.** The Forestry Chronicle, v. 89, n. 5, 2013.

LESTARI, W. A.; HERDIYENI, Y.; PRASETYO, L. B.; HASBI, W.; ARAI, K.; OKUMURA, H. **Nitrogen estimation of paddy based on leaf reflectance using Artificial Neural Network.** 7th International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Fukuoka, Japan, pp. 224-229, 2015.

LI, J.; SUN, L. **Non-destructive Detection the Content of Acid Detergent Fiber in Corn Stalk Using NIRS.** 4th International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC), p.89-92, 2019. doi: 10.1109/ICMIC48233.2019.9068554.

LIEW, O. W.; CHONG, P. C. J.; LI, B.; ASSUNDI, A. K. **Optical Spectroscopic Approach for Non-Invasive Monitoring of Plant Water and Nutrient Stress.** Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim, 2007.

LIMA FILHO, O. F. de. **Desordens nutricionais em plantas.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. (Comunicado técnico, n.257), 2020.

LIU, K.; ZHAO, W.; GUO, X.; WANG, Y.; MIAO, Q. **Determination the nitrogen status of wetlands using emergent macrophytes leaf spectral reflectance.** International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canadá, pp. 2161-2164, 2011.

LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C.; DA SILVA, M. R. **Nutrição mineral de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e substratos.** Revista Brasileira Ciência do Solo, 31:713-722, 2007.

MA, H.; JI, H. **Development of Portable Plant Components Measurement Instrument Based on Near-infrared Spectroscopy.** 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012.

MAGALHÃES, W. L. E.; ZANGISKI, F.; KLEIN, C. H.; HIGA, A. R. **Uso da Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para Predição Não-Destrutiva de Densidade Básica da Madeira de *Pinus taeda*.** Comunicado Técnico, 159. Embrapa Florestas: Colombo, PR, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e Aplicação.** Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fósforo. Piracicaba, 1989.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações** Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. **Diagnose foliar**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação*. Viçosa: UFV, 1999.

MARTINI, A. J. O plantador de eucaliptos: A questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade. Dissertação (Mestrado em História Social). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MARTINS, J. A.; SARGENTELLI, V. **Infravermelho próximo na avaliação quantitativa foliar**. Revista Prospectus, v. 3, n. 1, p. 33-55, Fev/Ago, 2021.

MCMURTREY, J. E.; MIDDLETON, E. M.; CORP, L. A.; CAMPBELL, P. K. E.; BUTCHE, L. M.; DAUGHTRY, C. S. T. **Optical reflectance and fluorescence for detecting nitrogen needs in Zea mays L.** International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France, pp. 4602-4604 v.7, 2003.

MEERT, L. **Propriedades ópticas de folhas de milho em função de diferentes teores de pigmentos e estimativa não destrutiva do teor foliar de fósforo e da produtividade**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual do Centro-Oeste, Santa Cruz, PR, 2020.

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

MIFLIN, B. J., LEA, P. J. **The pathway of nitrogen assimilation in plants**. Phytochemistry, New York, v.15, p.873-885, 1976.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. In: MORAES, E. C.; RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, F.; PONZONI, F. J.; CAMARGO JÚNIOR, H.; CONFORTE, J. C.; MOREIRA, J. C.; EPINHANIO, J. C. N.; KAMPEL, M.; DE ALBUQUERQUE, P. C. G.; MARTINI, P. R.; DOS SANTOS, V. M. N.; SAUSEN, T. M. *Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente*. INPE: São José dos Campos, 2002.

MORAES NETO, S. P.; GONÇALVES, J. L. M.; RODRIGUES, C. J.; GERES, W. L. A.; DUCATTI, F.; AGUIRRE JUNIOR, J. A. de. **Produção de mudas de espécies arbóreas nativas com combinações de adubos de liberação controlada e prontamente solúveis**. Revista Árvore, Viçosa, v.27, n.6, p.779-789, 2003.

MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Lavras: Editora UFLA, 2002.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

MROCZYK, W. B.; MICHALSKI, K. M. **Quantitative and qualitative in near infrared analysis of basic compounds in sugar beet leaf**. Computers Chemistry, v.19, n.3, p.299-301, 1995.

OCEAN OPTICS, Inc. **Flame-NIR Miniature Spectrometer**: User Manual. 2016. Disponível em: <<https://www.oceaninsight.com/globalassets/catalog-blocks-and-images/manuals--instruction-ocean-optics/spectrometer/flamenir.pdf>>.

ORDÓÑEZ, C.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R.; MOREIRA, J. J.; SANZ, E. Using Hyperspectral Spectrometry and Functional Models to Characterize Vine-Leaf Composition. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 5, pp. 2610-2618, 2013.

PAIVA, H. N. de; GOMES, J. M. **Viveiros Florestais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 56 p., 1993.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia vegetal**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Rede e-Tec Brasil, 2015.

PINTO JÚNIOR, J. E.; SANTAROSA, E.; GOULART, I. C. G. R. **Histórico do cultivo de eucalipto**. In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. R. (editores técnicos). *Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda* – Brasília, DF: Embrapa, 138 p., 2014.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação: Diagnosticando a Mata Atlântica**. In: MORAES et al. *Curso de uso de Sensoriamento Remoto no estudo do meio ambiente*. INPE: São José dos Campos, 2002.

PORTENGEN, L. **Classifying mangroves in vietnam using radar and optical satellite remote sensing: processing sentinel-1 and sentinel-2 imagery in google earth engine**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra Aplicadas). Delft University of Technology, 2017.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Ceres, Piracicaba: POTAFOS, 343 p., 1991.

RAJESH, P. K. S.; KUMARAVELU, C.; GOPAL, A.; SUGANTHI, S. **Studies on identification of medicinal plant variety based on NIR spectroscopy using plant leaves**. 15th International Conference on Advanced Computing Technologies (ICACT), Rajampet, India, pp. 1-4, 2013.

RAMALHO, F. M. G.; ANDRADE, J. M.; HEIN, P. R. G. **Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy**. *Forest Systems*, v. 27, n. 2, 2018.

RAMOS, M. J. M.; MONNERAT, P. H.; DE CARVALHO, A. J. C.; PINTO, J. L. A.; DA SILVA, J. A. **Caracterização de sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro cultivar imperial**. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, SP, v. 31, n. 1, p. 252-256, 2009.

RECH, A. F.; WERNER, S. S. **Utilização da tecnologia NIRS para predição dos valores nutricionais de forrageiras**. *Agropecuária Catarinense*, v.33, n.1, 2020.

REIS, A.; LOPES, C. A.; MORETTI, C. L.; RIBEIRO, C. S. da C.; CARVALHO, C. M. M.; FRANÇA, F. H.; VILLAS BÓAS, G. L.; HENZ, G. P.; DA SILVA, H. R.; BIANCHETTI, L. de B.; VILELA, N. J.; MAKISHIMA, N.; DE FREITAS, R. A.; DE SOUZA, R. B.; DE CARVALHO, S. I. C.; BRUNE, S.; MAROUELLI, W. A.; NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, W.; DE MELO, W. F. **Berinjela (*Solanum***

melongena L.). Embrapa Hortaliças. Sistemas de Produção, 3. ISSN 1678-880x Versão Eletrônica. Nov. / 2007

RIBEIRO, G. T.; PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A. G.; TRINDADE, C. **Produção de mudas de Eucalipto.** Viçosa: Aprenda Fácil, 112p., 2001.

RODRIGUES, G. S. de S. C. **A expansão da eucaliptocultura no Brasil.** In: RODRIGUES, G. S. de S. C.; ROSS, J. L. S.; TEIXEIRA, G.; SANTIAGO, O. R. P. L.; FRANCO, C. Eucalipto no Brasil: expansão geográfica e impactos ambientais. Uberlândia: Composer, 2021.

SALVADOR, J. O; MOREIRA, A; MURAOKA, T. **Sintomas Visuais de Deficiências de Micronutrientes e Composição Mineral de Folhas em Mudas de Goiabeira.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.9, p.1655-1662, 1999.

SANCHES, I. D.; ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; OLIVEIRA, C. G. **Influência do tempo após a colheita de folhas na reflectância e transmitância.** In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 2605-2612, 2003.

SANO, E. E.; PONZONI, F. J.; MENESES, P. R.; BAPTISTA, G. M. de M.; TONIOL, A. C.; GALVÃO, L. S.; ROCHA, W. J. S. A. F. Reflectância da vegetação. In: MENESES, P. R.; DE ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. de M. Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SANTOS, G. A.; DOS SANTOS, A. P.; KORNDORFER, G. H. **Sistema por infravermelho próximo (NIR) para análises de nitrogênio foliar.** Biosci. J., Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 83-90, 2012.

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. **Potencial de melhoramento genético em *Eucalyptus urophylla* procedente da Ilha Flores.** Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 64, 2003.

SCHEER, M. B.; CARNEIRO, C.; SANTOS, K. G. **Substratos à base de lodo de esgoto compostado na produção de mudas de *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v.38, n.88, p.637-644, 2010.

SCOLFORO, J. R. **O mundo Eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura.** Mar de idéias, Rio de Janeiro, 2008.

SENAR, Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Agricultura de precisão: operação de drones.** Brasília: Senar, 2018.

SHUKLA, A.; UPADHYAY, A.; SHARMA, M.; CHINNUSANY, V.; KUMAR, S. **High-Resolution NIR Prediction from RGB Images: Application to Plant Phenotyping.** International Conference on Image Processing (ICIP), Bordeaux, France, pp. 4058-4062, 2022.

SILVA, P. H. M.; WICHERT, M. C. P. **Indicadores estatísticos sobre viveiros florestais no Brasil.** IPEF, 2008.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; GONÇALVES, A. N.; MOREIRA, A. **Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações.** In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (eds.). Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, p.80-104, 2000.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E. N.; SGARBI, F.; MUNIZ, M. R. A. **Seja doutor do seu eucalipto**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 93, 23 p., 2001.

SILVEIRA, R. L. V. A.; MOREIRA, A.; TAKASHI, E. N.; SGARBI, F.; BRANCO, E. F. **Sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla***. CERNE, v. 8, n.2, p.107-116, 2002.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N. **Aspectos nutricionais envolvidos na ocorrência de doenças com ênfase para o eucalipto**. CIRCULAR TÉCNICA IPEF, n. 200, p. 01-13, dez. 2003.

SIMEONE, M. L. F.; PIMENTEL, M. A. G. P.; GONTIJO NETO, M. M.; PAES, M. C. D.; DA SILVA, D. D. **Uso da Espectroscopia no Infravermelho Próximo e Calibração Multivariada para Avaliar a Composição Química do Milho**. In: TIBOLA, C. S.; DE MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; DE OLIVEIRA, M. A. (Editores técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SOUZA, R. J; CARVALHO, J. G. **Efeito de doses de nitrogênio aplicadas no solo e níveis de cálcio aplicados via foliar sobre o teor e o acúmulo de micronutrientes em alface americana**. Ciência Agrotécnica, Lavras, v.24, n.4, p.905-916, 2000.

STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M.; GONÇALVES, A. N. **Relationships between nursery practices and field performance for Eucalyptus plantations in Brazil**. New Forests, n. 22, 2001.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed., Porto Alegre: Artmed, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

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

TERHOEVEN-URSELMANS, T.; MICHEL, K.; HELFRICH, M.; FLESSA, H.; LUDWIG, B. **Near-infrared spectroscopy can predict the composition of organic matter in soil and litter**. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006.

TIBOLA, C. S.; DE MIRANDA, M. Z.; GUARIENTI, E. M. **Avaliação de Parâmetros de Qualidade de Trigo por Espectroscopia no Infravermelho Próximo**. In: TIBOLA, C. S.; DE MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; DE OLIVEIRA, M. A. (Editores técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2018.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. **Soil fertility and fertilizers**. 5.ed. New York: Macmillan, 634 p., 1993.

TORRES, I.; SÁNCHEZ, M.-T.; BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; PÉREZ-MARÍN, D. **Irrigation decision support based on leaf relative water content determination in olive grove using near infrared spectroscopy**.

ULSON, J. A. C.; BENEZ, S. H.; DE SILVA, E. M.; DE SOUZA, A. M. **Nitrogen content identification in crop plants using spectral reflectance and artificial neural networks**. International Joint Conference on Neural Networks. Washington, DC, USA, pp. 2088-2092, v.3, 2001.

VALINGER, D. et al. Development of near infrared spectroscopy models for quantitative prediction of the content of bioactive compounds in olive leaves. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 32, n. 4, p. 535-543, 2018.

VELOSO, C. A. C.; ARAUJO, S. M. B.; VIÉGAS, I. J. M.; RODRIGUES, J. E. L. F. **Amostragem e diagnose foliar**. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIEGAS, I. de J. M. (Ed.). Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

VIANA, M. B. **O eucalipto e os efeitos ambientais do seu plantio em escala**. Brasília: DF, Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, Anexo III, 2004.

VIEIRA, C. R. **Crescimento inicial de espécies florestais na omissão de macronutrientes**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais), Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

VITTI, A. M. S.; BRITO, J. O. **Óleo essencial de eucalipto**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo (Documentos Florestais), n.17, 2003.

WANG, D.- J.; ZHOU, X. - Y.; JIN, T. - M.; HU, X. N.; ZHONG, J. - E.; WU, Q. - T. **Application of near-infrared spectroscopy to agriculture and food analysis**. Spectroscopy and Spectral Analysis, v. 24, n. 4, p. 447-450, 2004.

WENDLING, I.; DUTRA, L. F.; GABIRA, M. M.; VIEIRA, L. M.; DEGENHARDT, J. Produção de mudas de eucalipto. In: O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. 2021.

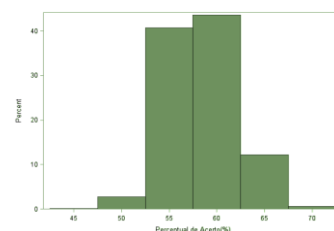
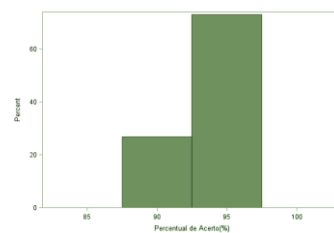
WESTFALL, P. H.; TOBIAS, R. D.; ROM, D.; WOLFINGER, R. D.; HOCHBERG, Y. **Multiple comparisons and multiple tests using the SAS System**. Cary, NC: SAS Institute, 1999.

WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FERREIRA FILHO, P. J.; DAL POGETTO, M. H. F. do A. Guia Prático de Manejo de Plantações de Eucalipto. Botucatu: FEPAF, 2008.

YINKUN, L.; XUEPING, W.; XURONG, M. **Analysis of the Reflectance Spectral Characteristics of the Greenhouse Cucumber under Different Water and Nitrogen Conditions**. Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Shenzhen, China, pp. 463-467, 2011.

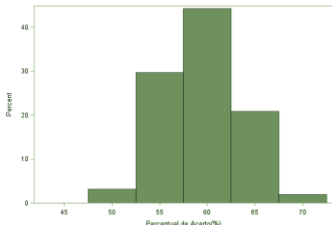
APÊNDICE A - Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão			Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas
2a	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos			93,12%
		T3	T	Totais	
	T3	51028	2972	54000	
		47,25	2,75	50,00	
	T	4457	49543	54000	
		4,13	45,87	50,00	
2b	Totais	55485	52515	108000	58,54%
		51,38	48,63	100,00	
		T1	T	Totais	
	T1	31156	22844	54000	
		28,85	21,15	50,00	
	T	21931	32069	54000	
		20,31	29,69	50,00	
	Totais	53087	54913	108000	
		49,15	50,85	100,00	



(*) Categorias de tratamentos: **2a (2 categorias): N fora de padrão (Tratamentos T1 (0% de N); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e N padrão (Tratamento T3); 2b (2 categorias): Com N (Tratamentos T3 (N padrão); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e Sem N (Tratamento T1);**

APÊNDICE A (continuação) - Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 7 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão					Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas	
4	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos						
		T1	T2	T3	T4	Totais		
	T1	18910	8090	0	0	27000	59,57%	
		17,51	7,49	0,00	0,00	25,00		
	T2	6911	15625	3160	1304	27000		
		6,40	14,47	2,93	1,21	25,00		
	T3	986	1565	13710	10739	27000		
		0,91	1,45	12,69	9,94	25,00		
	T4	622	5	10282	16091	27000		
		0,58	0,00	9,52	14,90	25,00		
Totais	27429	25285	27152	28134	108000			
	25,40	23,41	25,14	28,05	100,00			

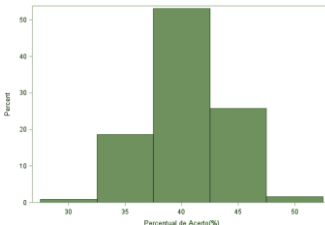
(*) Categorias de tratamentos: 4 (4 categorias): 0% de N (Tratamento T1), 50% de N (Tratamento T2), N padrão (Tratamento T3) e dobro de N (Tratamento T4).

APÊNDICE B – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão			Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas
	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos			
		T3	T	Totais	
2a	T3	36768	17232	54000	67,53%
		34,04	15,96	50,00	
	T	17840	36160	54000	
		16,52	33,48	50,00	
	Totais	54608	53392	108000	
2b	T1	50,56	49,44	100,00	60,82%
		32873	21127	54000	
	T	30,44	19,56	50,00	
		21192	32808	54000	
	Totais	19,62	30,38	50,00	
		54065	53935	108000	
		50,06	49,94	100,00	

(*) Categorias de tratamentos: **2a (2 categorias): N fora de padrão (Tratamentos T1 (0% de N); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e N padrão (Tratamento T3); 2b (2 categorias): Com N (Tratamentos T3 (N padrão); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e Sem N (Tratamento T1).**

APÊNDICE B (continuação) – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 11 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão					Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas
4	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos				Totais	40,32% 
		T1	T2	T3	T4		
	T1	19224	4317	1825	1634	27000	
		17,80	4,00	1,69	1,51	25,00	
	T2	8057	5959	7043	5942	27000	
		7,46	5,52	6,52	5,50	25,00	
	T3	6760	2801	10639	6800	27000	
		6,26	2,59	9,85	6,30	25,00	
	T4	4837	6248	8195	7720	27000	
		4,48	5,79	7,59	7,15	25,00	
Totais	38878	19324	27702	22096	108000		
	36,00	17,89	25,65	20,46	100,00		

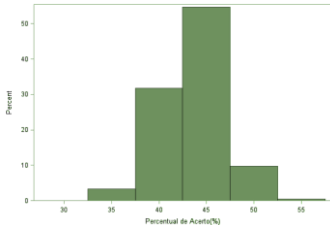
(*) Categorias de tratamentos: 4 (4 categorias): 0% de N (Tratamento T1), 50% de N (Tratamento T2), N padrão (Tratamento T3) e dobro de N (Tratamento T4).

APÊNDICE C – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 16 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão			Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas
2a	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos			66,83%
		T3	T	Totais	
	T3	37946	16054	54000	
		35,14	14,86	50,00	
	T	19768	34232	54000	
2b	T	18,30	31,70	50,00	64,21%
	Totais	57714	50286	108000	
		53,44	46,56	100,00	
	T1	33957	20043	54000	
	T1	31,44	18,56	50,00	
	T	18613	35387	54000	
		17,23	32,77	50,00	
	Totais	52579	55430	108000	
		48,68	51,32	100,00	

(*) Categorias de tratamentos: **2a (2 categorias): N fora de padrão (Tratamentos T1 (0% de N); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e N padrão (Tratamento T3); 2b (2 categorias): Com N (Tratamentos T3 (N padrão); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e Sem N (Tratamento T1).**

APÊNDICE C (continuação) – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 16 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão					Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas	
4	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos					43,52% 	
		T1	T2	T3	T4	Totais		
	T1	20846	1938	1630	2586	27000		
		19,30	1,79	1,51	2,39	25,00		
	T2	6266	5494	9273	5967	27000		
		5,80	5,09	8,59	5,53	25,00		
	T3	4861	3228	10370	8541	27000		
		4,50	2,99	9,60	7,91	25,00		
	T4	4859	4021	7830	10290	27000		
		4,50	3,72	7,25	9,53	25,00		
	Totais	36832	14681	29103	27384	108000		
		34,10	13,59	26,95	25,36	100,00		

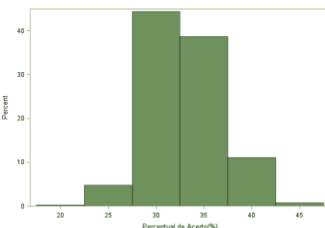
(*) Categorias de tratamentos: **4 (4 categorias): 0% de N (Tratamento T1), 50% de N (Tratamento T2), N padrão (Tratamento T3) e dobro de N (Tratamento T4).**

APÊNDICE D – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão			Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas
	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos			
		T3	T	Totais	
2a	T3	29059	15941	45000	56,53%
		33,40	18,32	51,72	
	T	21879	20121	42000	
		25,15	23,13	48,28	
	Totais	50938	36062	87000	
2b	T1	32346	12654	45000	54,99%
		37,18	14,54	51,72	
	T	26507	15493	42000	
		30,47	17,81	48,28	
	Totais	58853	28147	87000	
		67,65	32,35	100,00	

(*) Categorias de tratamentos: **2a (2 categorias): N fora de padrão (Tratamentos T1 (0% de N); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e N padrão (Tratamento T3); 2b (2 categorias): Com N (Tratamentos T3 (N padrão); T2 (50% de N) e T4 (dobro de N) e Sem N (Tratamento T1).**

APÊNDICE D (continuação) – Tabela de confusão e melhores percentuais médios de acerto (acurácia) das 1.000 simulações pelo método de reamostragem *bootstrap*, segundo categorias de tratamentos e do modelo logístico multinomial para o tempo 22 dias após as mudas serem submetidas aos tratamentos

Categorias de tratamentos		Tabela de confusão					Melhores percentuais médios de acerto (acurácia) e Histogramas	
4	Origem dos Tratamentos	Classificação dos Tratamentos						
		T1	T2	T3	T4	Totais		
	T1	7893	1597	5708	6802	22000	32,93% 	
		9,07	1,84	6,56	7,82	25,29		
	T2	6367	2544	4621	6468	20000		
		7,32	2,92	5,31	7,43	22,99		
	T3	4471	1554	8812	7163	22000		
		5,14	1,79	10,13	8,23	25,29		
	T4	6044	2235	5319	9402	23000		
		6,95	2,57	6,11	10,81	26,44		
Totais	24775	7930	24460	29835	87000			
		28,48	9,11	28,11	34,29	100,00		

(*) Categorias de tratamentos: **4 (4 categorias): 0% de N (Tratamento T1), 50% de N (Tratamento T2), N padrão (Tratamento T3) e dobro de N (Tratamento T4).**