

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

Mateus Felipe Quintino Sarmiento

**Estimativa de nutrientes foliares em mudas de eucalipto pelo uso de mini
espectrômetro**

Diamantina

2017

Mateus Felipe Quintino Sarmento

**Estimativa de nutrientes foliares em mudas de eucalipto pelo uso de mini
espectrômetro**

Dissertação apresentada ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL - STRICTO SENSU, nível de MESTRADO como parte dos requisitos para obtenção do título de MAGISTER SCIENTIAE EM CIÊNCIA FLORESTAL

Orientador: Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana

Diamantina

2017

Ficha Catalográfica – Serviço de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecário Anderson César de Oliveira Silva, CRB6 – 2618.

S246e	<p>Sarmento, Mateus Felipe Quintino Estimativa de nutrientes foliares em mudas de eucalipto pelo uso de mini espectrômetro / Mateus Felipe Quintino Sarmento. – Diamantina, 2017. 71 p. : il.</p> <p>Orientador: Reynaldo Campos Santana</p> <p>Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.</p> <p>1. Análise foliar. 2. Estimativa indireta. 3. Reflectância foliar. 4. Viveiro Florestal. I. Título. II. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.</p> <p style="text-align: right;">CDD 634.973</p>
-------	---

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mateus Felipe Quintino Sarmiento

**Estimativa de nutrientes foliares em mudas de eucalipto pelo uso de mini
espectrômetro**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana

Data de aprovação 10/03/2017.

Profª. Dra. Danielle Piuzana Mucida
Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal - UFVJM

Prof. Dr. Enilson de Barros Silva
Departamento de Agronomia/Faculdade de Ciências Agrárias - UFVJM

Prof. Dr. Ronaldo Medeiros dos Santos
Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - *Câmpus* Salinas - IFNMG

Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana
Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal - UFVJM

**Diamantina
2017**

Dedico a minha família que em todos os momentos de minha vida, sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pelas oportunidades concedidas nessa longa caminhada, chamada VIDA. Essa força Divina me iluminou a cada momento difícil que passei, com palavras pontuais.

À minha família, primeiramente aos meus pais, carinhosamente chamados de Meyre e Son. Obrigado por todo esforço para que eu pudesse ter uma educação de qualidade, que me proporcionasse sonhar com um futuro melhor. As minhas irmãs Tathy e Ju pelo carinho, conselhos e apoio de sempre. Aos meus sobrinhos Daniel e Maria Evany. Agradeço à minha namorada Cecília, pelo amor, conselhos e apoio de sempre. Aos meus cunhados Gilvânio, Alexandre e Mariana.

Agradeço aos meus tios (as), primos (as), avó e a todos os familiares, em especial ao meu Tio Eloy Quintino, por tudo que representa. Agradeço também ao meu avô Eloy Quintino (*in memoriam*), por tudo o que me ensinou em sua passagem em nossas vidas. O Senhor representa muito pra mim e sei que onde estiver, estará torcendo e cuidando de cada passo meu.

Aos meus amigos de sempre, Tawana, Lizandra, Luis Henrique, Dedyane, Rafa Madureira, Gaby e Israel, por todo apoio na caminhada da vida. Tenho os melhores amigos.

Ao IFNMG, que considero minha segunda casa. Tenho muito orgulho de ter vivido nessa família por oito formidáveis anos, dedico a glória alcançada a cada membro, aos professores, funcionários e colaboradores, em especial, aos professores Tiago e Marília, que sempre foram mais que orientadores, são grandes amigos. Agradeço pelas oportunidades, confiança, conselhos e apoio desde os primeiros anos de convivência. Os Senhores sempre foram fonte de inspiração, tanto profissional quanto pessoal. Essa glória também é fruto do esforço de vocês para poder me ensinar a cada dia.

Ao Professor Ronaldo Medeiros, com quem aprendi muito durante minha formação, sempre com sábias palavras. Agradeço por ter aceitado o convite para participar da banca e representar toda família IFNMG, nesse grande momento de minha vida.

À UFVJM, cada funcionário e colaborador dessa instituição que participou de forma direta ou indireta do meu dia-a-dia, em especial, aos professores do programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal e de Produção Vegetal, pelos conhecimentos.

Ao professor Reynaldo Santana, pela oportunidade no mestrado e conselhos. Aprendi muito e levarei muitos conselhos para a vida, além do amadurecimento pessoal. Só tenho a agradecer.

Ao professor Enilson Silva por aceitar o convite para participar da banca, e pelos conhecimentos transmitidos por meio da disciplina de Fertilidade.

A professora Danielle Piuzana por aceitar o convite em poder contribuir com essa importante data.

Aos colegas de mestrado e doutorado, pelos momentos de alegria e conversa. Ao Luiz Felipe, pelos momentos no laboratório de Silvicultura. A Tamires, Clara, Lomanto, Bruno Lafeté e Paulo Henrique, pelos momentos de descontração.

A CAPES, UFVJM, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro direta ou indiretamente proporcionado.

A APERAM BioEneriga, que contribui imensamente com a pesquisa, em especial a pessoa do Nivaldo, o meu muito obrigado e eterno agradecimento.

Só me resta agradecer, foi difícil, árduo, mas gratificante...

"...No fim da viagem; No fim desse rio; Um oceano nos espera; No fim desse rio.." - Paraíso - Nenhum de Nós.

A frase representa os meus dois anos de mestrado, conhecimento profissional e principalmente pessoal. Por mais tortuoso, cheio de obstáculos e pedras que um rio tenha, ele contorna todos os seus problemas, e no fim das contas, deságua em exuberante e imenso oceano, que não sabemos onde começa e/ou termina, deixando em nossa mente apenas sonhos relativos à sua imensidão.

Agradeço por tudo e a todos. Foi um capítulo glorioso em minha VIDA.

BIOGRAFIA

Mateus Felipe Quintino Sarmiento, nascido no dia 23 de outubro de 1990, filho de Edson Sarmiento e Luzimary Quintino Sarmiento, natural de Salinas - Minas Gerais. Em 2008 concluiu o ensino médio integrado ao técnico na Escola Agrotécnica Federal de Salinas (EAFSAL) no curso Técnico em Agropecuária. Em 2010 ingressou na primeira turma de Bacharel em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, *Câmpus* Salinas (Antiga EAFSAL). No início de janeiro de 2015 concluiu o curso superior, e no referente ano iniciou os estudos no Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Na presente data, o pós-graduando apresenta a sua defesa de dissertação almejando o título de Mestre em Ciência Florestal.

"Eu lutei tantos anos para chegar a isso, e hoje eu lutei tanto, vai ter que dá, vai ter que dá, vai ter que chegar em primeiro, pois Ele é maior do que todos" - Ayrton Senna - 1º vitória de Senna no GP do Brasil em 1991, Interlagos.

RESUMO

SARMENTO, M. F. Q. **ESTIMATIVA DE NUTRIENTES FOLIARES EM MUDAS DE EUCALIPTO PELO USO DE MINI ESPECTRÔMETRO**. 2017. 71 pg. (Dissertação - Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2017.

A dissertação foi dividida em dois capítulos, o primeiro referente ao embasamento teórico da resposta vegetal a radiação eletromagnética na região do visível e infravermelho próximo e a relação da reflectância com a estimativa de características de maneira não destrutiva por meio do uso de índices de vegetação. O segundo sobre o uso de novos índices de vegetação NI, PI, KI, CaI, MgI, SI, MnI, FeI, ZnI, CuI e BI na estimativa do teor de macro e micronutrientes em eucalipto nas condições de viveiro, por meio do uso da reflectância espectral. No trabalho foram coletados dados de reflectância espectral, em folhas isoladas, nos materiais genéticos AEC 2034 ((*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh x *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden)) x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake) e AEC 2475 (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus pellita* F. Muell) em minijardim clonal e produção de mudas aos 65 dias de idade. Os dados espectrais foram coletados com o mini espectrômetro foliar portátil CI-710 (CID, Inc., Camas, Washington, USA). As curvas espectrais no minijardim clonal foram estatisticamente iguais na faixa de 400 a 900, e estatisticamente diferentes na região do violeta e azul e infravermelho próximo. Na produção de mudas às curvas espectrais foram estatisticamente diferentes na faixa de 400 a 900 nm e em todas as regiões avaliadas. Os índices de vegetação apresentaram boas estimativas nas condições de minijardim clonal e produção de mudas, sendo possíveis as estimativas por meio de índices de vegetação no minijardim clonal e produção de mudas. Os índices de vegetação que apresentaram as melhores estimativas do teor de nutrientes nas condições de minijardim clonal e produção de mudas foram os que atuam na região do *red edge*.

Palavras chave: Análise foliar. Estimativa indireta. Reflectância foliar. Viveiro Florestal

ABSTRACT

SARMENTO, M. F. Q. **FOLIAR NUTRIENTS ESTIMATES IN EUCALYPTUS SEEDLING USING MINI SPECTROMETER**. 2017. 71 pg. (Dissertation - Master of Forest Science) - Federal University of Jequitinhonha and Mucuri Valleys, Dimantina, 2017.

This work has been divided into two chapters, the first one refers to theoretical support regarding vegetation's reaction to electromagnetic radiation in the area of visibility and infrared surrounding it, and the relation of reflectance with an estimate of non-destructive characteristics by using vegetation indices. The second chapter is about the usage of new vegetal indices NI, PI, KI, CaI, MgI, SI, MnI, FeI, ZnI, CuI and BI in the estimate of macro and micronutrients level in eucalyptus under nursery tree conditions by using spectral reflectance. During the research, data from spectral reflectance was collected from isolated leaves, in the genetical material AEC 2034 ((*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh x *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden)) x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake) and AEC 2475 (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus pellita* F. Muell) in clonal mini-garden and seedlings production of 65 days old. Spectral data was collected using a portable foliar spectrometer CI-710 (CID, Inc., Camas, Washington, USA). The spectral curves in the clonal mini-garden were statistically equal from 400 to 900 length, and statistically different in the violet, blue and infrared surrounding area. In the seedlings production the spectral curves were statistically different from 400 to 900 nm and in all evaluated area. The vegetation indices presented good estimates under the conditions of clonal mini-garden and seedlings production, considering that the estimates were possible due to the vegetation indices in the clonal mini-garden and seedling production. The vegetation indices that showed the best estimate of nutrients content under clonal mini-garden conditions and seedlings production were the ones situated in the red edge area.

Key words: Foliar analysis. Indirect Estimate. Foliar Reflectance. Tree nursery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

FIGURA 1 - Espectro eletromagnético.....	23
FIGURA 2 - Corte transversal de uma folha hipotética, para caracterização das estruturas foliares.....	25
FIGURA 3 - Interação dos feixes luminosos e a folha verde: Radiação Incidente (I), fenômenos da Reflectância (R), Absorbância (A) e Transmitância (T).....	26
FIGURA 4 - Espectro de absorção de cada pigmento fotossintetizante.....	28
FIGURA 5 - Reflectância de uma folha verde sadia e a interação entre REM e os pigmentos, estrutura foliar e água.....	31
FIGURA 6 - Corte transversal da folha de <i>Mimulus cardinalis</i> e a dispersão do feixe luminoso ocasionada pela parede celular no interior da folha.....	32
FIGURA 7 - Curvas de reflectância espectral para folhas de milho em diferentes teores de água.....	33

CAPÍTULO II

FIGURA 1 - Caracterização do local de estudo.....	41
FIGURA 2 - Minijardim clonal.....	42
FIGURA 3 - Folhas aptas para a coleta das miniestacas referentes ao material genético AEC 2034 (a) e AEC 2475 (b).....	43
FIGURA 4 - Produção de mudas a céu aberto.....	44
FIGURA 5 - Folhas localizadas no terço médio das mudas dos clones AEC 2034 (a) e AEC 2475 (b) aos 65 DAE.....	45
FIGURA 6 - Mini espectrômetro foliar CI-710 (CID, INC., Camas, Washington, USA).....	46
FIGURA 7 - Curva espectral sem aplicar o procedimento de Savitzky-golay.....	47
FIGURA 8 - Curvas espectrais no minijardim clonal.....	50
FIGURA 9 - Curvas espectrais na produção de mudas.....	50
FIGURA 10 - Relação entre os índices de vegetação NI, PI, KI, SI, CaI, CuI, FeI, e BI e teor dos nutrientes, coeficiente de determinação (R^2), Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e porcentual da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSEP) no minijardim clonal.....	53
FIGURA 11 - Relação entre os índices de vegetação NI, PI, KI, MgI, SI, CuI, FeI, MnI, BI e ZnI e teor dos nutrientes, coeficiente de determinação (R^2), Raiz quadrada do erro médio	

quadrático (RMSE) e porcentual da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSEP) na produção de mudas.....	55
FIGURA 12 - Relações entre os teores de macro e micronutrientes observados em laboratório e estimados pelos índices de vegetação no minijardim clonal.....	57
FIGURA 13 - Relações entre os teores de macro e micronutrientes observados em laboratório e estimados pelos índices de vegetação na produção de mudas.....	59

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1 - Pigmentos encontrados nos cloroplastos das plantas superiores e algumas algas.....	28
---	----

CAPÍTULO II

TABELA 1 - Índices de vegetação (IV) para a estimativa do teor de nutrientes.....	48
TABELA 2 - Média e desvio padrão (\hat{y} (σ)) dos teores de nutrientes pela análise química foliar, para os clones AEC 2475 e AEC 2034.....	51
TABELA 3 - Média e desvio padrão dos índices de vegetação (\bar{x} (σ)) e teor de nutrientes (\bar{y} (σ)), correlação de Pearson (r_{xy}) e teste t da correlação (ρ -value) no minijardim clonal e produção de mudas.....	52

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTERAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E A VEGETAÇÃO.....	21
1 - Espectro eletromagnético	23
1.1 - Região espectral do visível e infravermelho	24
2 - Interação da radiação eletromagnética e vegetação, influência das estruturas e condições da planta	25
2.1 - Interação da radiação eletromagnética e vegetação	25
2.2 - Fotossíntese - conversão da energia luminosa em energia química	30
2.3 - Comportamento espectral da vegetação.....	31
2.4 - A importância dos nutrientes essenciais no metabolismo vegetal.....	33
3 - Índice de vegetação e estimativa do teor de nutrientes.....	34
3.1 - Índices de vegetação e o uso na estimativa do teor de nutrientes por meio de técnicas de sensoriamento	34
4 - Considerações finais	36
CAPÍTULO II - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE NUTRIENTES EM MUDAS DE EUCALIPTO.....	37
1 - Introdução.....	39
2 - Material e métodos	40
2.1 - Época e local.....	40
2.2 - Material genético	41
2.3 - Amostragem	41
2.3.1 - Caracterização do minijardim clonal	42
2.3.2 - Amostragem foliar e leitura espectral no minijardim clonal	42
2.3.3 - Caracterização da fase produção de mudas	43
2.3.4 - Amostragem foliar e leitura espectral na produção de mudas.....	44
2.4 – Leitura espectral.....	45
2.5 - Análise de nutrientes.....	46
2.6 - Processamento dos dados de reflectância foliar	46
2.7 - Índices de vegetação	47
2.8 - Análise estatística	48
3 - Resultados	49

3.1 - Curvas espectrais	49
3.2 - Teor de nutrientes e índice de vegetação	51
3.3 - Modelos ajustados no minijardim clonal	53
3.4 - Modelos ajustados na produção de mudas	54
3.5 - Teor de nutrientes estimados por índices de vegetação	56
4 - Discussão.....	60
5 - Conclusões.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE	71

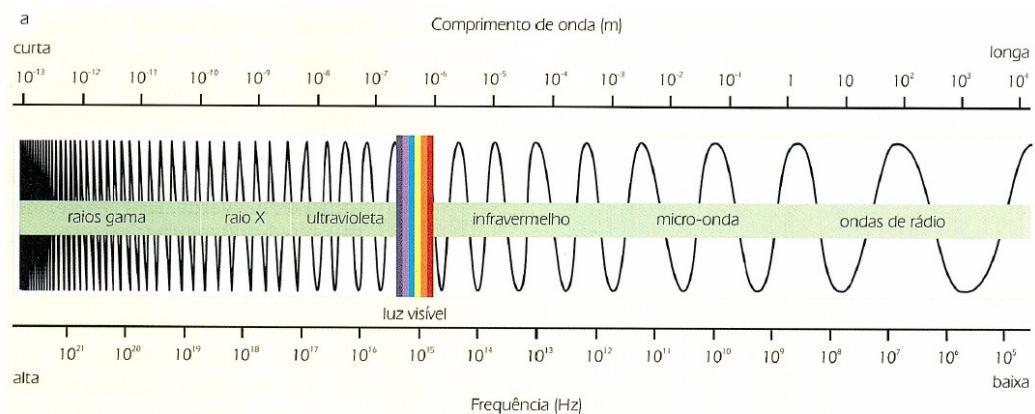
**CAPÍTULO I - INTERAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E A
VEGETAÇÃO**

1 - Espectro eletromagnético

O sol é a principal fonte da radiação eletromagnética (REM). A REM é produto das reações termonucleares na superfície solar, sendo a resultante propagada pelo espaço na velocidade da luz, em diversos comprimentos de onda (MARTINS et al., 2004), denominada radiação global.

A REM emitida (FIGURA 1) é dividida em raios cósmicos, raios gama (< 0,03 nm), raios X (0,03 - 3,0 nm), ultravioleta (0,003 - 0,4 μm), visível (0,4 - 0,70 μm), infravermelho próximo (0,70 - 1,3 μm), infravermelho médio (1,3 - 4,0 μm), infravermelho distante (4,0 - 300 μm), microonda (1,0 - 100 cm) e ondas de rádio (> 100cm), sendo o espectro considerado uma chuva de *quanta* nas mais diferentes frequências (ROSA, 2007; JENSEN, 2011; PONZONI et al., 2012).

Figura 1 - Espectro Eletromagnético.



Fonte: Florenzano (2011). p. 11. Adaptado

A REM, ao percorrer a trajetória Sol-Terra, perde intensidade até entrar em contato com a atmosfera terrestre, onde parte da radiação global é refletida, principalmente em comprimentos de onda mais curtos, que são nocivos ao desenvolvimento biológico.

Outra maneira de desviar a luz do traçado original é por meio do fenômeno da refração, que consiste no desvio da REM ao transpor meios de diferentes densidades. O índice de refração (n) é a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e no meio (c_n), e apresenta valor sempre superior a 1.

$$n = \frac{c}{c_n}$$

Da REM incidente na atmosfera, apenas 19% atingem a superfície terrestre (MOREIRA, 2011), e apenas a região do visível (VIS) é perceptível ao olho humano, sendo a região utilizada pelos pigmentos vegetais nos processos fotossintéticos.

No processo evolutivo do reino vegetal, as plantas adaptaram-se para utilizar a faixa espectral do visível em seus processos metabólicos, de maneira a não proporcionar danos para sua própria existência.

Apesar de utilizar somente a região do VIS nos processos metabólicos, há interação da planta com outras regiões do espectro eletromagnético e determinadas características físico-químicas dos vegetais (TAIZ e ZEIGER, 2013). Dentre as regiões espectrais, destaca-se o infravermelho (IR, do inglês *Infrared*), dividida em infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infrared*), médio (MIR, do inglês *Middle Infrared*) e distante (FIR, do inglês: *Far Infrared*) (OLIVEIRA, 2015).

1.1 - Região espectral do visível e infravermelho

A região espectral do visível (VIS) corresponde aproximadamente à faixa dos comprimentos de onda de 400 a 700 nm. A luz branca ao ser decomposta é formada pelas cores violeta (400 a 446 nm), azul (446 a 500 nm), verde (500 a 578 nm), amarela (578 a 592 nm), laranja (592 a 620 nm) e vermelha (620 a 700 nm), sendo que não há limites fixos entre as cores, apenas uma faixa espectral de transição que possibilita a identificação da troca cromática, algo notório no arco-íris (ROSA, 2007; MOREIRA, 2011).

A faixa espectral acima dos 700 nm (0,70 μm) e próxima a valores de 300 μm é denominada a região do infravermelho (IR), que apresenta menor frequência se comparada à região vermelha do espectro eletromagnético visível. O infravermelho próximo varia entre os comprimentos de onda de 700 a 1100 nm e o infravermelho médio entre 1100 e 3200 nm (PONZONI et al., 2012)

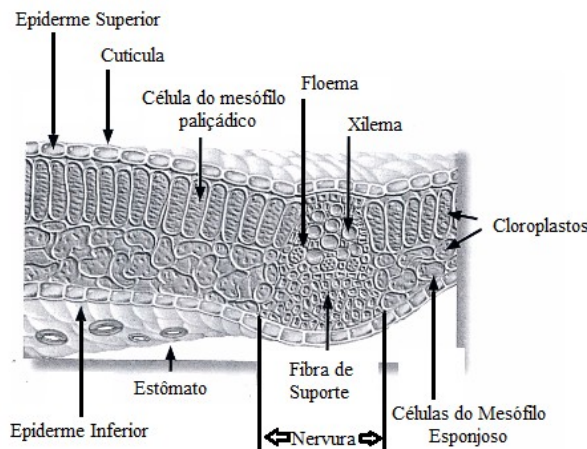
2 - Interação da radiação eletromagnética e vegetação, influência das estruturas e condições da planta

2.1 - Interação da radiação eletromagnética e vegetação

A folha é o principal órgão fotossintetizante, e as características espectrais da vegetação variam em função dos teores de pigmentos fotossintetizantes, estruturas internas e externas e características peculiares de cada espécie (SANTOS et al., 2014).

No decorrer do processo evolutivo dos vegetais, cada espécie desenvolveu estruturas internas e externas (FIGURA 2) específicas com o objetivo de aproveitar ao máximo a incidência solar, de maneira a potencializar os processos fotossintéticos e fisiológicos que são ativados com a ação da luz, em determinados comprimentos de onda (GATES et al., 1965).

Figura 2 - Corte transversal de uma folha hipotética, para caracterização das estruturas foliares.



Fonte: Jesen (2011). p. 360. Adaptado

Os feixes luminosos, ao tocarem as estruturas foliares são fracionados, e conseqüentemente, ocasionam os fenômenos de absorvância, transmitância e reflectância (FIGURA 3), fenômenos que influenciam a resposta espectral da vegetação. A absorvância é a capacidade dos materiais em absorver a REM em um determinado comprimento de onda. Em decorrência do fenômeno, o material pode sofrer efeito térmico, que ocasiona o aquecimento e, em conseqüência a liberação de calor, ou sofrer o efeito não térmico, caso a energia não atue de maneira significativa. O fenômeno de transmitância consiste na passagem

da REM em um meio, sem que ocorra a alteração na frequência da radiação monocromática. Já o terceiro fenômeno, o de reflectância, consiste na propriedade que um determinado objeto possui de refletir a REM incidente em sua superfície, sendo o fenômeno mais utilizado nas pesquisas, devido a sua gama de informações (JENSEN, 2011; MOREIRA, 2011).

Figura 3 - Interação entre os feixes luminosos e a folha verde: Radiação Incidente (I), fenômenos da Reflectância (R), Absorbância (A) e Transmitância (T).



Fonte: Moreira (2011). p. 73

Segundo Carriello et al. (2003), os feixes luminosos, ao incidirem na folha verde, de maneira direta ou difusa, interagem com pigmentos, água, epiderme e espaços intercelulares preenchidos com ar e, ou água, de maneira a moldar a identidade espectral de cada espécie.

Dessa maneira os fenômenos citados são explicados por meio da equação de balanço da radiação (1) (JENSEN, 2011):

$$\Phi i\lambda = \Phi \rho\lambda + \Phi \alpha\lambda + \Phi \tau\lambda \quad (1)$$

Ao dividir as variáveis pelo fluxo incidente (Φ), conclui-se que (2):

$$i\lambda = \rho\lambda + \alpha\lambda + \tau\lambda \quad (2)$$

onde:

$i\lambda$ = fluxo total incidente

$\rho\lambda$ = reflectância hemisférica espectral da folha

$\alpha\lambda$ = absorvância hemisférica espectral

$\tau\lambda$ = transmitância hemisférica da folha

Por se tratar de um material biológico, as folhas possuem diversas estruturas, organelas e meios que ao interagirem com a REM, respondem de maneira distinta aos fenômenos de absorvância, transmitância e reflectância. Ao incidir nas estruturas foliares, parte da REM é refletida pela cutícula, mesófilo superior e pêlos, que atuam como mecanismo de defesa dos vegetais. O principal objetivo dessas estruturas é filtrar o potencial energético que irá transpor a barreira superior da folha, em sentido aos órgãos internos. O mecanismo tem como objetivo, evitar possíveis danos às estruturas internas da folha. A energia que transpõem os órgãos externos é difundida e espalhada para o mesófilo e cavidades no interior da folha. Ao transpor as membranas superiores a REM destinam-se ao mesófilo foliar, sendo absorvida pelos cloroplastos e utilizada nos processos fotossintéticos (PONZONI et al., 2012).

A maior concentração dos cloroplastos encontra-se no mesófilo foliar, na parte superior (CHEN et al., 2015), por ser a região que recebe maior incidência solar, o que potencializa o processo de conversão da energia luminosa em química. Os cloroplastos são organelas pigmentadas, formadas basicamente por clorofila (65%), xantofilas (29%) e carotenoides (9%), e cada pigmento atua em uma faixa espectral específica (GATES et. al., 1965; PONZONI et al., 2012), ou de maneira conjunta em determinadas regiões.

A energia luminosa absorvida é convertida em energia química, sendo as reações realizadas em unidades denominadas fotossistemas. A clorofila é responsável na absorção de cerca de 50% de toda a energia que incide na folha, sendo utilizada nos processos de transferência de elétrons (TAIZ e ZEIGER, 2013).

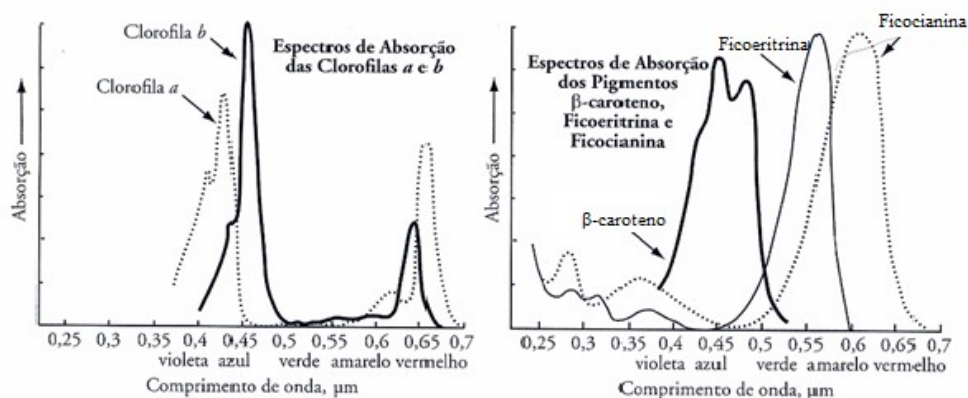
Folhas com maior teor de pigmentos fotossintetizantes apresentam uma maior interação com os comprimentos de onda do espectro visível, resultando em uma maior absorvância e conseqüentemente menores valores de reflectância e transmitância (CANAVESI e KIRCHNER, 2005).

Dessa maneira, os pigmentos fotossintetizantes apresentam comprimentos de onda específicos para absorção da radiação eletromagnética, como demonstrado na Tabela 1 e Figura 4.

Tabela 1. Pigmentos encontrados nos cloroplastos das plantas superiores e algumas algas.

Máxima absorção de		
Pigmentos	luz (nm)	Ocorrência
Clorofila "a"	430 e 660	Todas as plantas superiores
Clorofila "b"	453 e 643	Plantas superiores e algas verdes
α - Caroteno	420, 440 e 470	Plantas superiores e algumas algas
β - Caroteno	425, 450, e 480	Todas as plantas superiores
Xantofila	Lutol	425, 445 e 475
	Violoxanto	425, 450 e 475

Fonte: Moreira (2011). p.75. Adaptado.

Figura 4 - Espectro de absorção de cada pigmento fotossintetizante.

Fonte: Jesen (2011). p. 362

Os acentuados picos de absorção (FIGURA 4) resultam consequentemente em valores inferiores de reflectância foliar. As clorofilas "a" e "b" e o β -caroteno possuem forte absorção na região do azul, já na região do vermelho, ocorre apenas a atuação das clorofilas.

A região do azul do espectro visível, que compreende a faixa espectral entre 450 - 520 nm, os pigmentos clorofila, carotenoide e xantofila atuam de maneira conjunta na absorção do feixe luminoso, o que resulta em valores baixos de reflectância. Na região espectral do vermelho (620-700 nm), próximo ao comprimento de onda de 680 nm ocorre uma forte absorção da clorofila e consequentemente baixo valor de reflectância (JESSEN, 2011).

Na região do verde (495–570 nm), a vegetação apresenta uma baixa absorção das clorofilas "a" e "b" e β -caroteno (FIGURA 4) (JENSEN, 2011) e, conseqüentemente, elevados valores de reflectância, 20 e 25%, com um pico de reflectância próximo ao comprimento de onda de 550 nm (KNIPLING, 1970).

Os pigmentos absorvem determinados comprimentos de onda, e transmitem ou refletem os que não são absorvidos. A clorofila é o pigmento encontrado em maior abundância nas plantas, o que torna as folhas de cor verde. O pigmento apresenta forte absorção na região do violeta, azul e vermelho, sendo refletido a luz verde (RAVEN et al., 2013), o que proporciona aos olhos humanos a tonalidade verde das folhas saudáveis.

Apesar da ficoeritrina e ficocianina, que atuam somente em algas, apresentarem alta absorção na região do verde, considerados pigmentos acessórios, e apresentam baixa intensidade de absorção, se comparado à clorofila "a" e "b". Dessa maneira, a ação dos pigmentos acessórios não influencia de maneira significativa na absorção total e, conseqüentemente, não influenciam no resultado espectral (JENSEN, 2011).

Na região vermelha do espectro de absorção, a vegetação interage apenas com as clorofilas "a" (pigmento essencial) e "b" (pigmento acessório), próximo ao comprimento de onda de 680 nm. A região citada, não sofre influência de carotenoides e outros pigmentos (pigmento acessório) (RAVEN et al., 2013).

Na região do infravermelho próximo não há interação entre a vegetação e a absorção pigmentar, ocorrendo interação apenas com a parte estrutural do vegetal. De acordo com Ponzoni et al. (2012) e Carriello et al. (2003), quanto maior as lacunas do mesófilo foliar, maior será a reflexão da radiação incidente na região do infravermelho próximo. Outros fatores que contribuem para a elevação dos valores de reflectância consistem na não interação da região com o teor de água e pigmentos fotossintetizantes (LIPPERT et al., 2015). O espalhamento dos feixes de luz no mesófilo foliar (SHIMABUKURO et al., 2009), resulta em valores de reflectância que variam entre 40 a 60% da radiação incidente (CARRIELO et al., 2003).

Entre a região do VIS e NIR, há uma região denominada *red-edge* ou borda do vermelho, e compreende o intervalo de 680 a 750 nm. O fenômeno é caracterizado por uma elevação brusca nos valores de reflectância foliar, seguido de uma constância na resposta espectral (HORLER et al., 1983b; CURRAN et al., 1991; TIAN et al., 2011)

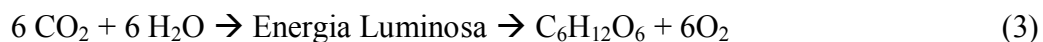
Ao analisar o infravermelho médio (MIR), há interação da região com o teor de água na folha (FIGURA 7), sendo a região utilizada na estimativa indireta dessa característica.

A região do MIR apresenta valores de máxima absorção do espectro próximo ao comprimento de onda de 1400, 1900 e 2500 nm, conseqüentemente baixos valores de reflectância espectral, sendo o local indicado para estimativa do teor de água na folha (CANAVESI e KIRCHNER, 2005).

Portanto, a quantidade de radiação absorvida, transmitida e refletida é devida a atuação de diversos fatores que influenciam na resposta espectral, e os fatores não atuam de maneira isolada (FORMAGGIO et al., 1989; SHIMABUKURO et al., 2009).

2.2 - Fotossíntese - conversão da energia luminosa em energia química

A energia luminosa absorvida pelos pigmentos é utilizada na fotossíntese (3), processo fisiológico responsável pelo armazenamento energético no reino vegetal. O processo de captação energética é iniciado nos pigmentos antena presente nos cloroplastos, responsáveis pela absorção da radiação eletromagnética, sendo a energia transferida por meio de ressonância aos centros de reação dos pigmentos, liberando elétrons que mantêm o processo fotoquímico (RICHARDSON et al., 2002).



Os fatores que influenciam os processos fotossintéticos são divididos em internos e externos. Os internos são os que englobam características da genética, como espessura da lâmina foliar, teor de pigmentos fotossintetizantes, fatores endógenos (hormonais) e idade da folha. Os fatores considerados externos são relacionados à conversão luminosa, condição ambiental e nutricional, como a disponibilidade de nutrientes, irradiância, temperatura e concentração de CO_2 (MARENCO et al., 2014).

A energia armazenada é consumida na manutenção e sobrevivência dos vegetais superiores e algumas algas, sendo aplicada posteriormente em diversos processos vitais, de forma a garantir o equilíbrio entre energia e carbono dos compostos orgânicos (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Dessa maneira, a conversão da energia luminosa em química, por meio do processo fotossintético pode ser influenciada pelos distúrbios nutricionais, sejam pela falta ou excesso dos nutrientes essenciais.

Plantas afetadas por distúrbios apresentam danos nos teores de pigmentos, e sofrem modificações em sua estrutura interna, o que acarreta complicações nos processos fisiológicos, e influencia a resposta espectral dos vegetais (GRAEFF et al., 2001).

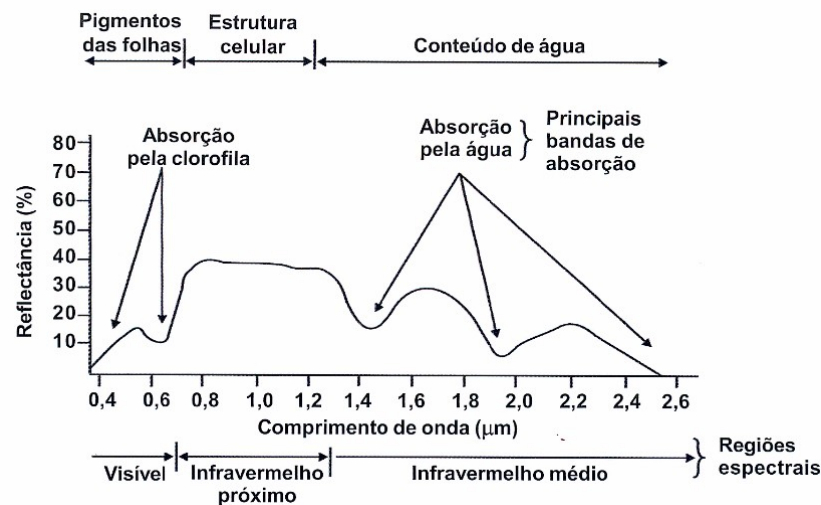
2.3 - Comportamento espectral da vegetação

O comportamento espectral da vegetação é influenciado por alterações fenológicas e morfológicas, sendo influenciada por pigmentos fotossintetizantes, água, celulose, lignina, região do espectro a ser analisado, tipo de espécie e suas peculiaridades (DAWSON et al., 1998; DATT, 1999a; MORAN et al., 2000; USTIN et al., 2009), sendo que todos os fatores citados modelam as curvas espectrais em uma folha isolada.

Para demonstrar o comportamento espectral de uma folha isolada faz-se necessário analisar três regiões espectrais a região visível, infravermelho próximo e infravermelho médio (FIGURA 5).

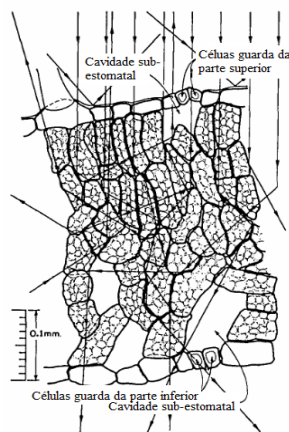
Ao incidir no bordo superior da folha, parte da radiação eletromagnética é refletida pela cutícula e epiderme superior (PEÑUELAS e FILELLA, 1998), a outra porção adentra ao tecido foliar e sofre reflexões múltiplas e refrações, devido aos diversos meios presentes no material biológico vegetal (KNIPLING, 1970).

Figura 5 - Reflectância de uma folha verde sadia e a interação entre REM e os pigmentos, estrutura foliar e água.



No interior da folha, os feixes luminosos sofrem alterações em seu eixo original (FIGURA 6), influenciados por diversos índices de refração, dentre os quais podem ser citados a parede celular hidratada ($n = 1,4$), água ($n = 1,33$) e o ar ($n = 1$) (KNIPLING, 1970; JACQUEMOUND e BARET, 1990).

Figura 6 - Corte transversal da folha de *Mimulus cardinalis* e a dispersão do feixe luminoso ocasionada pela parede celular no interior da folha.

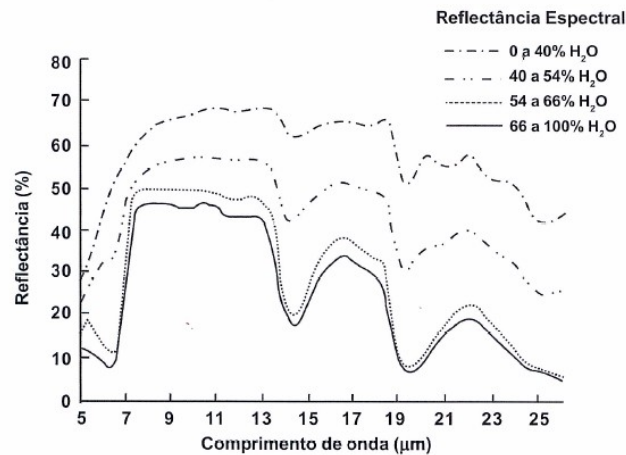


Fonte: Gates et. al. (1965). p. 13. Adaptado.

A resposta da reflectância espectral na região do visível (VIS) é decorrente da interação entre a REM e pigmentos fotossintetizantes, dentre os quais se destacam os carotenóides, antocianinas e, principalmente, a clorofila (SHIMABUKURO et al., 2009).

Outro fator que pode contribuir para essa resposta é o turgor das folhas (FIGURA 7), que influencia de maneira significativa na resposta espectral. Elevados teores de água na folha, apresentam valores inferiores de reflectância (MOREIRA, 2011). A forte absorção dos pigmentos fotossintetizantes e a interferência decorrente do teor de água na folha reduz a reflectância foliar na região do VIS.

Figura 7 - Curvas de reflectância espectral para folhas de milho em diferentes teores de água



Fonte: Moreira (2011). p. 88

2.4 - A importância dos nutrientes essenciais no metabolismo vegetal

Os macronutrientes (nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S)) e os micronutrientes (zinco (Zn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn)) são essenciais para a formação das estruturas e no metabolismo vegetal, com funções enzimáticas, regulatórias e iônicas (RAVEN et al., 2013). O fornecimento adequado de nutrientes é essencial para que a planta possa assegurar que o metabolismo vegetal se desenvolva dentro de faixas consideradas ótimas para se maximizar o potencial produtivo da espécie. Os nutrientes desempenham diferentes funções nos vegetais. O N e S são nutrientes requeridos nos compostos de carbono. O N atua na formação da clorofila, enzimas, aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos dentre outros componentes orgânicos. O S é importante constituinte de aminoácidos, proteínas, dentre outros componentes orgânicos, sendo sua deficiência às vezes até confundida com a do N, devido (GOMES e PAIVA, 2006) a atuação conjunta dos nutrientes na planta.

O P e B são nutrientes importantes na armazenagem de energia ou na integridade estrutural. O P é formador de açúcares-fosfato, ácidos nucleicos, nucleotídeos dentre outros compostos orgânicos, sendo de suma importância nas reações que envolvem ATP. O B é constituinte das paredes celulares, atuando no alongamento e no metabolismo de ácidos nucleicos (TAIZ e ZEIGER, 2013).

O K, Ca, Mg e Mn são elementos que permanecem na forma iônica (TAIZ e ZEIGER, 2013). O K está envolvido na osmose, equilíbrio iônico, abertura e fechamento de estômatos, além de ser ativador de diversas enzimas. O Ca é componente da parede celular,

está envolvido na permeabilidade da membrana celular, além de ser regulador da membrana celular e da atividade enzimática. O Mg é um dos nutrientes que constituem a molécula de clorofila, também sendo requerido como ativador de diversas enzimas importantes para o processo de transferência de fosfato na planta. O Mn atua em diversas enzimas e também está envolvida na evolução fotossintética do O₂ (RAVEN et al., 2013).

O Fe, Zn e Cu são nutrientes envolvidos em reações redox. O Fe é constituinte de ferro-proteínas que não estão envolvidas na fotossíntese, também atuam na fixação de N₂ e na respiração. O Zn é componente do álcool desidrogenase, desidrogenase glutâmica, anidrase carbônica dentre outros compostos. Já o Cu está na constituição do ácido ascórbico oxidase, tirosinase, uricase, citocromo oxidase dentre outras enzimas (TAIZ e ZEIGER, 2013).

3 - Índice de vegetação e estimativa do teor de nutrientes

3.1 - Índices de vegetação e o uso na estimativa do teor de nutrientes por meio de técnicas de sensoriamento

No setor agrícola e florestal estão sendo desenvolvidas pesquisas que utilizam de técnicas de sensoriamento, na predição e estimativa de diversas características. A adoção de técnicas de sensoriamento contribui para uma rápida diagnose e conseqüente aumento de produtividade (PONZONI et al., 2012). São utilizados dados sensoriais no prognóstico e diagnose de distúrbios nutricionais, condições físico-químicas do solo, pragas, doenças, estimativa da produtividade, dentre outras características de interesse dos setores do agronegócio.

O uso de técnicas de sensoriamento contribui para uma rápida diagnose e tomada de decisão em setores que necessitam de constante monitoramento, possibilitando aos produtores e empresas uma rápida tomada de decisão, de maneira a evitar o surgimento dos primeiros sinais de distúrbios (SHIMABUKURO et al., 2009; PAJARES et al., 2013), sendo uma maneira alternativa aos métodos tradicionais de análise.

Um das formas de utilizar os dados obtidos nas leituras espectrais são por meio índices de vegetação (IV's). Os índices de vegetação consistem em um número, que é obtido por meio de modelos ou equações matemáticas. Os IV's utilizam de dados de reflectância espectral principalmente na região do VIS e NIR, e os pontos de coleta espectral devem apresentar alta correlação com a variável em que se deseja aferir (HORLER et al., 1983a)

Posteriormente, os dados espectrais são correlacionadas com as características na qual deseje-se pesquisar.

As características pesquisadas nos setores agrônômicos e florestais consistem em mensurações indiretas dos teores nutricionais, teor de água, condições físico-químicas do solo, índice de área foliar (IAF), taxas fotossintéticas, teores de pigmentos, estimativa de produtividade, biomassa, ataques de pragas e doenças, desenvolvimento da cultura, estado fenológico, dentre outros monitoramentos importantes que potencializam o processo produtivo. Diversas foram as pesquisas realizadas utilizando-se de índices de vegetação para estimar características em diversas espécies. Dentre as espécies pode-se citar o milho (*Zea mays* L.) (GRAEFF et al., 2001; GRAEFF e CLAUPEIN, 2003; ZHAO et al., 2003), *Pinus spp.* (CURRAN et al., 1990; MORAN et al., 2000), *Eucalyptus spp.* (DATT, 1999a; DATT, 1999b; OLIVEIRA, 2015), algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (TARPLEY et al., 2000), soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (ADAMS et al., 2000), manejo de pastagens (ABRAHÃO et al., 2009; SCHUT et al., 2005), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (PICOLI et al., 2009; MOLIN et al. 2010), café (*Coffea spp.*) (ROSA et al., 2010; COLTRI, et al., 2011), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) (EPIPHANIO et al., 1996; MONTEIRO et al., 2013), dentre outras culturas de interesse no setor agrícola e florestal.

De maneira a encontrar tecnologias que venham a agregar no setor agrônômico e florestal, estão sendo desenvolvidas pesquisas que utilizam de técnicas de sensoriamento para garantir uma maior precisão nas tomadas de decisão. A adoção de técnicas de sensoriamento consiste em um método não destrutivo, *in situ*, de resposta rápida, com menor valor agregado por amostras se comparado ao método convencional, e não necessita do uso de reagentes químicos e equipamentos laboratoriais para obtenção dos resultados (RICHARDSON et al., 2002; FONSECA, et al., 2012; GOTTARDO et al., 2016). Contudo, o método de estimativa indireta não é algo comum para alguns produtores e empresas.

O pleno uso da tecnologia de estimativa indireta requer uma metodologia confiável, sendo necessária a calibração e validação nas mais diversas espécies de interesse, condições de cultivo e regiões climáticas. Porém é necessário o uso de índices de vegetação confiáveis que expressem a realidade desejada (PONZONI et. al., 2015; GOTTARDO et al., 2016).

Portanto a calibração de índices de vegetação e modelos que visem estimar características agrícolas e florestais por meio do uso de dados espectrais, é de suma importância para um monitoramento preciso e eficaz.

4 - Considerações finais

Diversas foram as pesquisas realizadas com o intuito de desvendar e entender as propriedades e natureza da luz. Os avanços possibilitaram o desenvolvimento de diversos equipamentos, que a partir da interação entre radiação eletromagnética e sensores, fornecem uma gama de informações úteis, que se bem trabalhadas, proporcionam informações importantes.

Atualmente, várias informações podem ser acessadas via internet no caso de monitoramento orbital ou por meio de equipamentos que utilizam de tecnologias sensoriais para seu funcionamento. As técnicas de sensoriamento estão evoluindo a cada dia, apresentando como uma alternativa na predição de variáveis de interesse, o que pode contribuir para a ampliação da produtividade agrícola e florestal, devido às rápidas respostas, que influencia no tempo de tomada de decisão.

As técnicas de sensoriamento remoto, na predição de características vegetais, são fundamentadas no teor de pigmentos fotossintetizantes, estruturas e teor de água na folha, variáveis que influenciam diretamente a resposta espectral. Consequentemente, os distúrbios são acusados primeiramente na resposta espectral, antes mesmo de se tornarem visíveis que o estágio mais avançado, e às vezes irreversível.

Portanto, estudos que visem entender o comportamento espectral do vegetal de maneira a caracterizar as condições fisiológicas e morfológicas, são de suma importância, para contribuir com monitoramento de culturas agrícolas e florestais. As informações são geradas *in situ* de maneira rápida e com baixo custo, mas requerem o uso de índices de vegetação e modelos bem calibrados para obtenção de dados precisos.

**CAPÍTULO II - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE NUTRIENTES
EM MUDAS DE EUCALIPTO**

1 - Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias em plantios de *Eucalyptus* proporcionou um salto na produtividade de valores próximos a 10 m³/ha/ano na década de 70 (IBÁ, 2015) para 36 m³/ha/ano em 2015 (IBÁ, 2016). Porém, ao analisar os incrementos dos últimos anos, observa-se que os números encontram-se estagnados, sendo difícil manter a produtividade média de alguns anos atrás, mesmo com o surgimento de novos materiais genéticos adaptados a diversas condições edafoclimáticas.

Dentre as novas pesquisas geradas, diversas foram direcionadas aos viveiros de produção de mudas, que são responsáveis por propagar materiais genéticos superiores, tanto em qualidade quanto em quantidade para implantação e manutenção dos empreendimentos florestais (MARQUES et al., 2009).

As mudas destinadas a campo devem apresentar qualidade biométrica e fisiológica, sem danos físicos e/ou doenças, substrato firme e raízes ativas prontas para absorção de nutrientes (TRINDADE et al., 2012). O início do êxito dos plantios florestais está relacionado principalmente ao padrão de qualidade das mudas, pois devem suportar condições adversas encontradas no campo, de maneira a evitar falhas no plantio e conseqüentemente ônus ao processo produtivo (GOMES e PAIVA, 2006).

O monitoramento nutricional em viveiro de produção de mudas é uma prática essencial para se garantir mudas de qualidade. Os distúrbios nutricionais são geralmente identificados de maneira empírica, por meio de avaliações visuais, pois as análises químicas dos nutrientes possuem elevado custo e demandam vários dias para ter em mãos os resultados analíticos. Monitorar os efeitos deletérios dos distúrbios nutricionais na fase de viveiro é necessário, pois quando se tornam visíveis, a eficiência dos processos fisiológicos já está comprometida. O manejo inadequado dos nutrientes causam efeitos fitotóxicos, e a sua deficiência influencia diretamente no desenvolvimento pleno da muda (GOMES e PAIVA, 2006).

Uma das maneiras de contornar o problema e garantir o monitoramento nutricional pleno das mudas de eucalipto em viveiro seria a adoção de técnicas de estimativa indireta não destrutiva, por meio de leituras espectrais. As leituras espectrais permitem a obtenção de uma gama de informações que se bem trabalhadas podem determinar o estresse fisiológico do vegetal (SCHRODER et al., 2015).

Os dados espectrais coletados são processados e aplicados a índices de vegetação específicos, e consiste em uma medida semi-analítica da vegetação. A interpretação dos seus valores em vista ao fenômeno estudado pode explicar sinais estresse e distúrbios do vegetal, sendo úteis ao reconhecimento de deficiências nutricionais, presença de pragas, sazonalidade e diversos distúrbios botânicos. Os índices de vegetação são gerados a partir da utilização de uma ou mais bandas espectrais em sua composição (HORLER et al., 1983a; FERREIRA et al., 2008; VIÑA et al., 2011).

Os dados espectrais são aplicados aos índices de vegetação, e posteriormente utilizados em conjunto com dados de interesse aferidos por meio dos métodos convencionais, sendo calibradas modelos que serão utilizados para estimativa do teor de nutrientes de maneira indireta, como uma alternativa ao procedimento convencional. A adequação da tecnologia de sensoriamento pode possibilitar uma rápida obtenção de dados de maneira não destrutiva, auxiliando os viveiristas na tomada de decisão.

Portanto, métodos que identifiquem o estado nutricional de mudas de eucalipto em etapas de viveiro de maneira rápida e prática são fundamentais para auxiliar no monitoramento nutricional e na tomada de decisão. Um monitoramento pleno possibilita o fornecimento de mudas bem nutridas à etapa de campo.

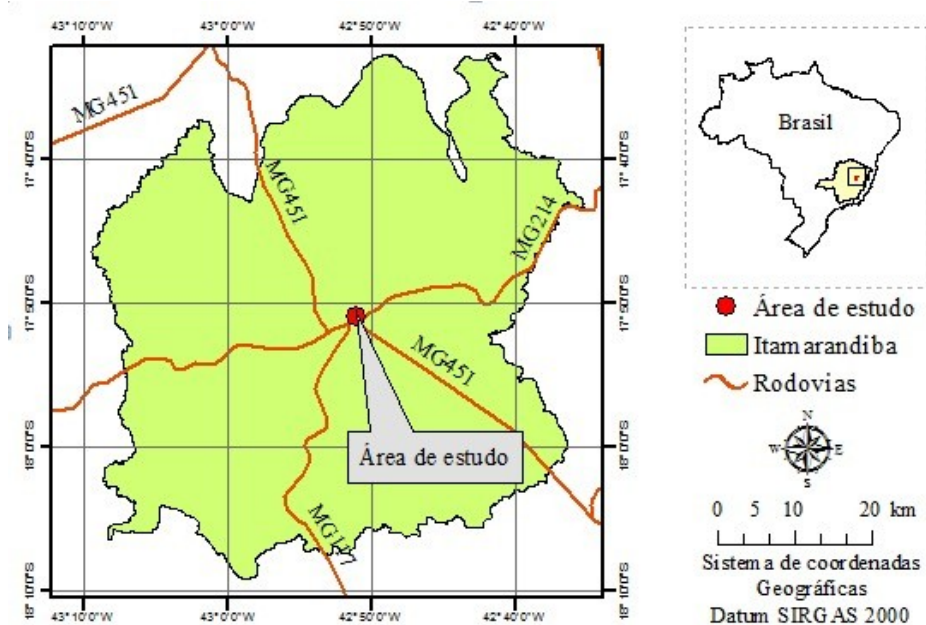
Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de índices que utilizam de respostas espectrais na estimativa do teor de nutrientes em viveiro de produção de mudas de eucalipto.

2 - Material e métodos

2.1 - Época e local

A coleta do material foliar e dados espectrais foi realizada no mês de abril de 2016, no viveiro de produção de mudas pertencente à empresa Aperam BioEnergia (FIGURA 1), localizado nas coordenadas geográficas 17,50°S de latitude e 42,51°W de longitude, 988 m de altitude, na cidade de Itamarandiba - Minas Gerais – Brasil.

Figura 1 - Caracterização do local de estudo



2.2 - Material genético

Foram avaliados dois clones de polinização controlada, AEC 2475 (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus pellita* F. Muell) e AEC 2034 [(*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh x *Eucalyptus grandis* Hill - ex Maiden) x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake].

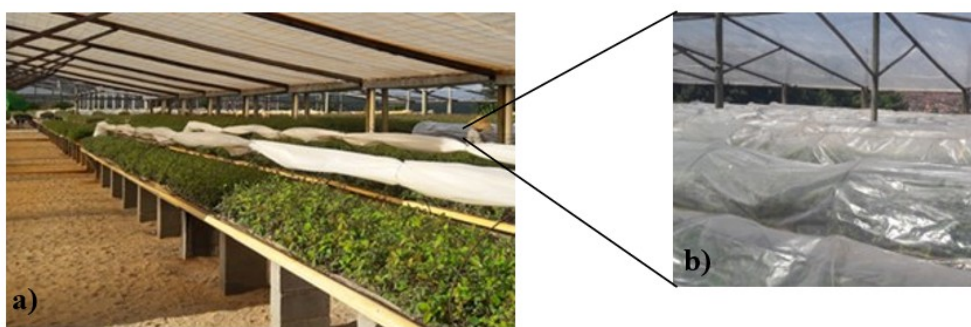
2.3 - Amostragem

A amostragem foliar foi realizada nos clones supracitados, em duas condições de viveiro de produção de mudas: plantas provenientes de minijardim com idade média de dois anos, material formador das futuras mudas clonais, e na produção de mudas em plataforma a céu aberto aos 65 dias após o estaqueamento (DAE), pois nesta fase ainda é possível a correção nutricional se detectada, uma vez que as mudas são destinadas a campo entre os 90 a 110 dias, a depender da demanda da empresa.

2.3.1 - Caracterização do minijardim clonal

O minijardim clonal é composto por canaletões (FIGURA 2a) que contêm areia como substrato com 16 m de comprimento e 0,90 m de largura, contendo oito linhas de minicepas no espaçamento de 0,1 m. Diariamente são aplicadas seis fertirrigações de sete minutos em intervalos de 90 min, por meio de bicos com vazão de $1,8 \text{ L.h}^{-1}$ com 24 gotejos por m^2 , mantendo-se uma eletrocondutividade entre 1,8 a $2,0 \text{ ms.cm}^{-1}$ e pH entre a faixa de 5,2 a 5,7.

Figura 2 - Minijardim clonal

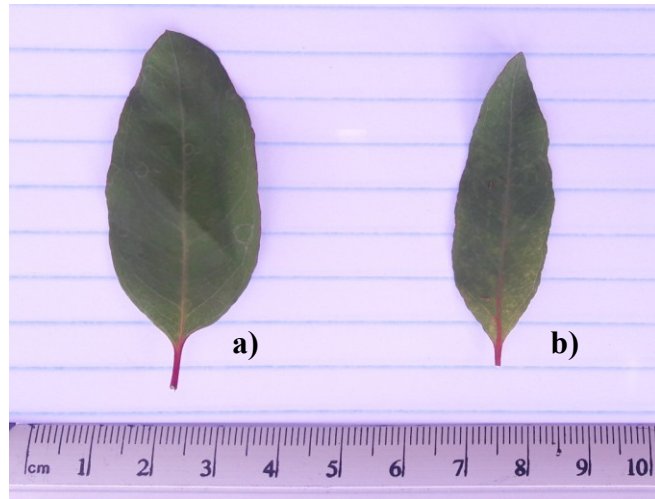


Os canaletões possuem coberturas de lonas plásticas brancas a 4 m de altura para proteger da chuva e diretamente sobre as mudas tem-se o "estufim", cobertura com plástico transparente arqueada sobre o canaletão (FIGURA 2b) para favorecer o enraizamento e o controle de *Oidium spp.*. A estrutura é retirada apenas para a coleta das miniestacas, que ocorre semanalmente.

2.3.2 - Amostragem foliar e leitura espectral no minijardim clonal

A amostragem foliar e a leitura espectral foram realizadas em 900 folhas, por clone, provenientes de minicepas de três canaletões com matrizes de cada material genético. A leitura espectral foi realizada na parte basal e abaxial das folhas, antes de se proceder a coleta para a análise química dos nutrientes (FIGURA 3). O conjunto de 30 folhas coletadas constituiu uma amostra composta. As folhas provenientes de cada amostra composta foram acondicionadas em sacos de papel e encaminhadas para análise química em laboratório. As 30 leituras espectrais de cada amostra composta foram utilizadas para se calcular a média destas leituras para se formar uma amostra espectral composta.

Figura 3 - Folhas aptas para coleta das miniestacas clonais referentes ao material genético AEC 2034 (a) e AEC 2475 (b).



2.3.3 - Caracterização da fase produção de mudas

Miniestacas contendo três pares de folhas bem formadas, sem redução foliar, com aplicação basal de 1.000 mg.L^{-1} de ácido indolbutírico foram estaqueadas em tubetes contendo 50 cm^3 de substrato (50 % vermiculita + 25 % de casca de arroz carbonizada + 25 % de fibra de coco neutra + $0,5 \text{ kg.m}^{-3}$ de osmocote 19-06-10 - 3 a 4 meses). Os tubetes encontravam-se em bandejas de 176 células com espaçamento de 50 %.

Após o estaqueamento, as estacas permaneceram por 30 dias em casa de vegetação de 800 m^2 , e receberam nebulização (82 L.h^{-1} de vazão) durante 30 segundos a cada 15 min nos primeiros 15 dias. A partir do 15º dia, o intervalo de irrigação foi ampliado em 10 min a cada 5 dias, sempre mantendo a nebulização por 30 segundos.

Após a etapa em casa de vegetação as mudas foram destinadas para o crescimento a céu aberto (FIGURA 4). As bandejas foram locadas em plataformas de 20 m de comprimento e 1,2 m de largura, suspensas a 1,5 m do solo. A irrigação foi realizada por microaspersores com vazão de 350 L.h^{-1} , três vezes ao dia com duração de 20 min por aplicação.

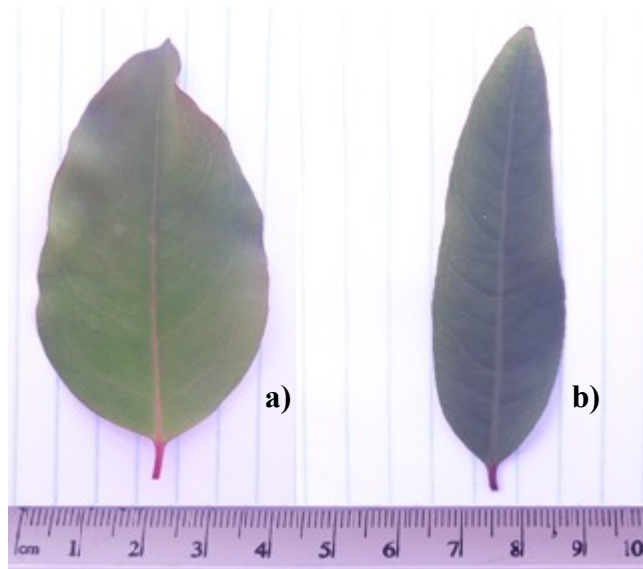
Figura 4 - Produção de mudas a céu aberto

Durante os 10 primeiros dias os canteiros foram cobertos por sombrites (50%) (FIGURA 4a) que foram colocados arqueados sobre as bandejas, em um estrutura metálica. A fertilização operacional foi realizada duas vezes por semana. A retirada de brotos laterais das mudas foi realizada com tesoura aos 50 DAE. Concomitantemente à retirada dos brotos procedeu-se o ré-espacamento das mudas nas bandejas (ocupação de 28% das células da bandeja). As plantas permanecem nesta configuração até a expedição.

2.3.4 - Amostragem foliar e leitura espectral na produção de mudas

Aos 65 DAE foram realizadas a amostragem foliar e a leitura espectral em folhas totalmente expandidas (FIGURA 5) localizadas no terço médio da muda realizada de acordo a metodologia utilizada no minijardim clonal. As mudas amostradas apresentavam altura média de $18,8 \pm 1,1$ cm (AEC 2475) e $26,9 \pm 4,2$ cm (AEC 2034) e diâmetro médio do coleto de $2,7 \pm 0,37$ mm (AEC 2475) e $3,2 \pm 0,54$ mm (AEC 2034).

Figura 5 - Folhas localizadas no terço médio das mudas dos clones AEC 2034 (a) e AEC 2475 (b) aos 65 DAE.



2.4 – Leitura espectral

Utilizou-se o mini espectrômetro foliar portátil CI-710 (CID, Inc., Camas, Washington, USA) (FIGURA 6). O aparelho realiza mensurações de absorvância, transmitância e reflectância, na região do visível e infravermelho próximo nos comprimentos de onda entre 400 e 1000 nm, sendo a faixa espectral fornecida por meio de uma luz de LED azul e lâmpada incandescente.

A captura do feixe luminoso é realizada pelo sensor Toshiba TCD1304AP Linear CCD, que apresenta resolução de 3648 pixels com comprimento de 8 x 200 μm por pixel, e relação sinal/ruído de 300:1 com sinal cheio. Antes de se proceder a leitura foliar com o CI-710, foi realizada a leitura do padrão branco que o acompanha, no modo de reflectância, sendo o procedimento realizado de cinco em cinco amostras compostas.

Figura 6 - Mini espectrômetro foliar CI-710 (CID, Inc., Camas, Washington, USA).



A interpretação da leitura espectral foi realizada pelo software *Spectra Snap!* que acompanha o aparelho. O equipamento foi configurado de acordo o recomendado no manual que o acompanha, adotando o *Integration Time* de 300 milissegundos, fator de *Integration Time* em seu valor mais elevado, relação sinal:ruído *Scans Average 2* e valor 10 para *Boxcar Width*.

2.5 - Análise de nutrientes

O material vegetal foi destinado ao laboratório, e foram realizadas as análises químicas foliares dos macro e micronutrientes nutrientes, segundo a metodologia descrita por Silva (2009a).

2.6 - Processamento dos dados de reflectância foliar

Foram selecionados dados de reflectância na faixa espectral de 400 a 900 nm. Aplicou-se o filtro de suavização de *Savitzky-Golay* (SAVITZKY e GOLAY, 1964) em todas as curvas espectrais, no intuito de remover os ruídos (FIGURA 7) gerados nas leituras do mini espectrômetro. O procedimento foi realizado no *software R* (2016), por meio da linha de comando (1), sendo utilizado o pacote *signal* versão 0.7-6 (2013), função *sgolayfilt*, com polinômio 2 ($p=2$), janela de dados de 111 ($n=111$), suavização ($m=0$) e média a cada 3 pontos:

$$t(\text{apply}(\text{matrizdospectros}, 1, \text{sgolayfilt}, p=2, n=111, m=0)) \quad (1)$$

Onde:

Matrizdoespectro: arquivo para o procedimento

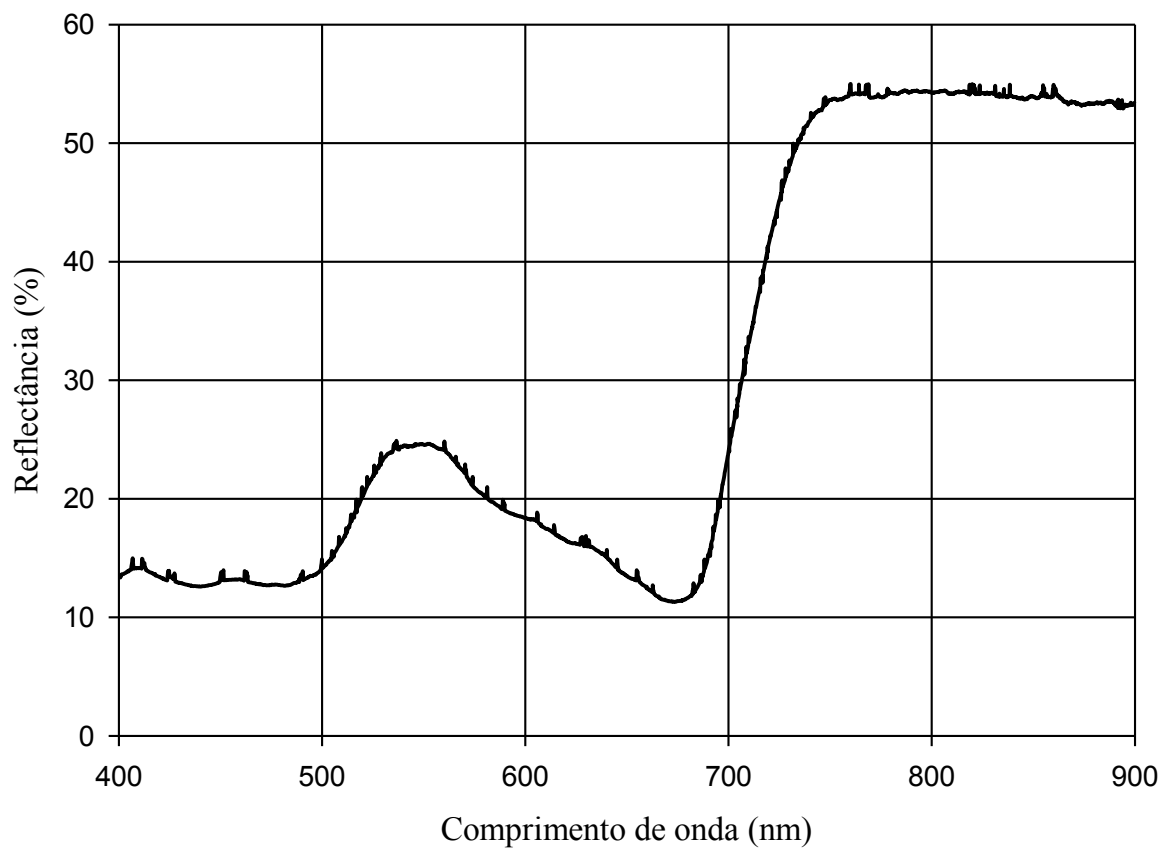
sgolayfilt: filtro de alisamento

p: grau do polinômio a ser adotado

n: janela de dados

m: suavização (0), ou n derivadas do espectro

Figura 7 - Curva espectral sem aplicar o procedimento de *Savitzky-Golay*



2.7 - Índices de vegetação

Os índices de vegetação (TABELA 1) utilizados foram construídos com base no NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), e desenvolvidos para estimativa do teor de macro e micronutrientes em condições de plantio. Os dados utilizados para a construção dos índices foram oriundos de três clones de *Eucalyptus spp.* (OLIVEIRA et al. 2017 – em fase de publicação).

Tabela 1 - Índices de vegetação (IV) para estimativa do teor de nutrientes

Nutriente	Índices	Fórmula do IV
Nitrogênio (N)	NI (Nitrogen Index)	$(\rho733,19-\rho729,23) / (\rho733,19+\rho729,23)$
Fósforo (P)	PI (Phosphorus Index)	$(\rho723,20-\rho722,25) / (\rho723,20+\rho722,25)$
Potássio (K)	KI (Potassium Index)	$(\rho701,18-\rho416,26) / (\rho701,18+\rho416,26)$
Cálcio (Ca)	CaI (Calcium Index)	$(\rho783,23-\rho782,13) / (\rho783,23+\rho782,13)$
Magnésio (Mg)	MgI (Magnesium Index)	$(\rho886,15-\rho885,10) / (\rho886,15+\rho885,10)$
Enxofre (S)	SI (Sulfur Index)	$(\rho737,14-\rho736,20) / (\rho737,14+\rho736,20)$
Cobre (Cu)	CuI (Copper Index)	$(\rho595,13-\rho418,14) / (\rho595,13+\rho418,14)$
Zinco (Zn)	ZnI (Zinc Index)	$(\rho465,20-\rho400,29) / (\rho465,20+\rho400,29)$
Manganês (Mn)	MnI (Manganese Index)	$(\rho460,22-\rho459,19) / (\rho460,22+\rho459,19)$
Ferro (Fe)	FeI (Iron Index)	$(\rho415,00-\rho414,16) / (\rho415,00+\rho414,16)$
Boro (B)	BI (Boron Index)	$(\rho747,25-\rho746,13) / (\rho747,25+\rho746,13)$

Fonte: OLIVEIRA et al. (2017) – em fase de publicação

2.8 - Análise estatística

Foi calculada média e desvio padrão para os índices de vegetação (x) e teor de nutrientes de macro e micronutrientes (y), correlação de Pearson (r_{xy}) entre as variáveis, e foi utilizada a estatística t (ρ -value < 0,20) para observar a significância da correlação.

As curvas espectrais foram comparadas por toda a extensão dos comprimentos de ondas (400 a 900 nm) e divididas em regiões espectrais (violeta e azul, verde, vermelho, *red edge* e infravermelho próximo), entre clones e locais de estudo, pelo teste t pareado para amostras independentes. A mesma análise foi utilizada para comparar os teores de nutrientes obtidos pela análise química e os teores estimados por meio de índices.

Para os casos onde se observaram correlações significativas, foram testados os modelos linear simples, quadrático e inverso de primeira ordem entre os índices de vegetação (variável independente) e teor de nutriente (variável dependente). O modelo adotado foi o que apresentou os melhores resultados de Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrado em termos absolutos (RMSE) (1), relativos (RMSEP) (2) e coeficiente de determinação (R^2). Foram considerados ajustes de boa qualidade os que apresentaram RMSEP inferior a 20 % e de qualidade aceitável os que apresentaram na faixa de 20 a 30 % (OLIVEIRA, 2015).

$$\text{RMSE (g kg}^{-1}\text{)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Onde:

Y_i = Teor do nutriente estudado na amostra avaliada por meio dos modelos propostos

y_i = Teor do nutriente estudado proveniente da análise laboratorial na amostra avaliada

n = número total de amostras estudadas

$$\text{RMSEP (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} * 100 \quad (2)$$

Onde:

\bar{y} = média do teor do nutriente estudado estimado em laboratório

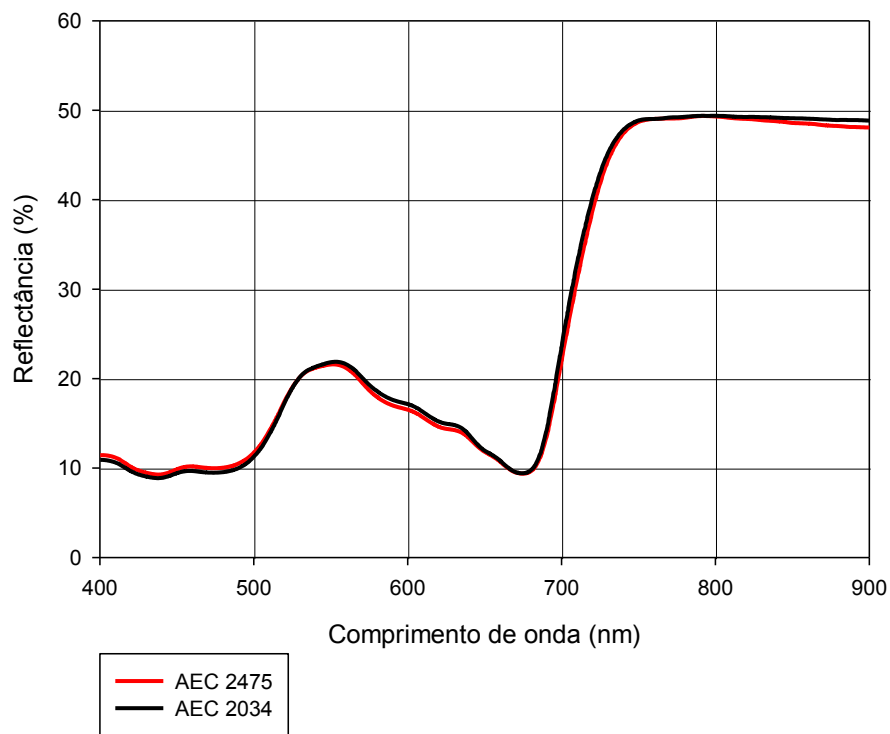
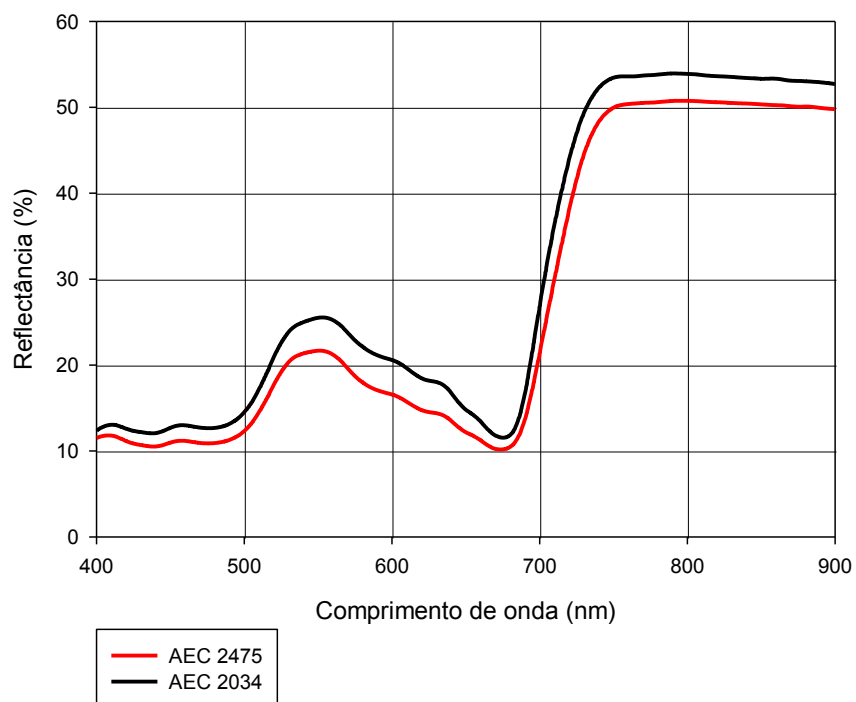
Os procedimentos estatísticos foram realizados no *software* R (2016), versão 3.3.1 com o auxílio da plataforma do R Studio versão 0.99.903.

3 - Resultados

3.1 - Curvas espectrais

Os materiais genéticos oriundos do minijardim clonal, AEC 2475 e AEC 2034, apresentaram a mesma tendência espectral na região de 400 a 900 nm, com valores estatisticamente iguais pelo teste t ($\rho = 0,58$) (Figura 8). O mesmo comportamento estatístico foi observado nas regiões do verde (500 a 578 nm; t, $\rho = 0,64$) e do *red edge* (680 a 750 nm; t, $\rho = 0,31$). Comportamento estatístico oposto foi observado nas regiões do violeta e azul (400 a 500 nm; t, $\rho = 0,00$), do vermelho (620 a 700 nm; t, $\rho = 0,06$) e infravermelho próximo (700 a 900 nm; t, $\rho = 0,02$).

Na produção de mudas os materiais genéticos AEC 2475 e AEC 2034 exibiram a mesma tendência espectral e mesmo comportamento (Figura 9). Contudo, apresentaram curvas espectrais estatisticamente diferentes (teste t, $\rho = 0,00$) tanto a região de 400 a 900 nm, como também nas regiões do violeta e azul, verde, vermelho, *red edge* e infravermelho próximo.

Figura 8 - Curvas espectrais no minijardim clonal**Figura 9 -** Curvas espectrais na produção de mudas

3.2 - Teor de nutrientes e índice de vegetação

Os resultados da análise química foliar apresentaram teores de nutrientes e curvas espectrais semelhantes, para os clones avaliados no minijardim clonal (Tabela 2). Por outro lado, na produção de mudas, o AEC 2475 apresentou teor de nutrientes superior ao AEC 2034, com exceção do Fe.

Essa diferença no teor de nutrientes entre os clones pode está relacionada com a eficiência de cada material genético na fase em estudo, uma vez que são cruzamentos distintos. Dessa maneira, teores mais elevados de nutrientes no AEC 2475, resultam em uma tonalidade de verde mais intensa, se comparado ao AEC 2034. Nessas condições o clone apresentou uma maior absorção do feixe luminoso, o que resulta em uma menor reflectância, principalmente na região do VIS, o que corrobora com o observado na Figura 9.

Tabela 2 - Média e desvio padrão (\bar{y} (σ)) dos teores de nutrientes provenientes da análise química foliar, para os clones AEC 2475 e AEC 2034.

Macronutrientes (g kg ⁻¹)					
Minijardim clonal			Produção de mudas		
	AEC 2475	AEC 2034		AEC 2475	AEC 2034
N	34,7 (3,6)	31,4 (3,3)	N	28,0 (4,3)	15,7 (1,7)
P	3,3 (0,2)	3,4 (0,3)	P	2,2 (0,3)	1,2 (0,1)
K	17,7 (1,3)	20,4 (1,3)	K	16,8 (1,3)	14,8 (0,9)
Ca	7,6 (1,2)	6,2 (0,8)	Ca	3,8 (0,4)	3,0 (0,3)
Mg	2,5 (0,2)	2,1 (0,2)	Mg	3,2 (0,3)	2,1 (0,2)
S	2,9 (0,6)	2,7 (0,4)	S	3,4 (0,5)	1,8 (0,3)
Micronutrientes (mg kg ⁻¹)					
Minijardim clonal			Produção de mudas		
	AEC 2475	AEC 2034		AEC 2475	AEC 2034
B	48,8 (11,2)	40,6 (8,9)	B	40,3 (12,0)	28,2 (6,4)
Cu	7,7 (1,8)	5,9 (1,3)	Cu	7,1 (1,9)	4,3 (1,1)
Fe	149,3 (24,1)	141,9 (36,6)	Fe	171,5 (36,3)	214,5 (51,5)
Mn	272,7 (36,1)	233,3 (43,2)	Mn	333,9 (48,2)	212,9 (26,5)
Zn	38,9 (4,6)	38,2 (3,9)	Zn	29,4 (4,4)	26,9 (6,7)

\bar{y} (σ) = média e desvio padrão

Os índices de vegetação NI, KI, CaI, MgI, SI, BI e FeI correlacionaram-se diretamente com os teores de seus respectivos nutrientes no minijardim clonal (Tabela 3).

Comportamento oposto foi observado para PI e CuI e as correlações não significativas foram observadas para Mg, Zn e Mn.

Na produção de mudas os índices de vegetação NI, PI, SI, BI e FeI correlacionaram de maneira direta com seus respectivos nutrientes (TABELA 3) e inversamente para KI, MgI, ZnI, MnI e CuI. Apenas o CaI apresentou correlação não significativa. Portanto, observou-se comportamento semelhante para as correlações de NI, SI, BI, FeI e CuI independentemente do local avaliado.

Tabela 3 - Média e desvio padrão dos índices de vegetação (\bar{x} (σ)) e teor de nutrientes (\bar{y} (σ)), correlação de Pearson (r_{xy}) e teste t da correlação (ρ -value) no minijardim clonal e produção de mudas.

Minijardim clonal					
IV	\bar{x} (σ)	Nutrientes	\bar{y} (σ)	r_{xy}	ρ -value
NI	0,0164 (0,0017)	N	33,05 (3,83)	0,28	0,03
PI	0,0068 (0,0006)	P	3,37 (0,29)	-0,44	0,00
KI	0,3970 (0,0360)	K	19,03 (1,88)	0,59	0,00
CaI	0,0002 (0,0001)	Ca	6,89 (1,26)	0,47	0,00
MgI	-0,0001 (0,0002)	Mg	2,30 (0,29)	0,14	0,27
SI	0,0030 (0,0003)	S	2,80 (0,53)	0,17	0,18
BI	0,0010 (0,0001)	B	44,73 (10,83)	0,34	0,00
ZnI	-0,0624 (0,0261)	Zn	38,53 (4,28)	-0,08	0,55
MnI	-0,0002 (0,0003)	Mn	252,97 (44,16)	-0,01	0,93
FeI	-0,0043 (0,0007)	Fe	145,60 (30,93)	0,20	0,13
CuI	0,2560 (0,0303)	Cu	6,80 (1,81)	-0,36	0,00
Produção de mudas					
IV	\bar{x} (σ)	Nutrientes	\bar{y} (σ)	r_{xy}	ρ -value
NI	0,0181 (0,0033)	N	21,85 (7,04)	0,95	0,00
PI	0,0072 (0,0011)	P	1,73 (0,54)	0,92	0,00
KI	0,3480 (0,0302)	K	15,83 (1,47)	-0,71	0,00
CaI	0,0001 (0,0001)	Ca	3,38 (0,56)	0,12	0,35
MgI	-0,0002 (0,0002)	Mg	2,67 (0,57)	-0,29	0,02
SI	0,0033 (0,0006)	S	2,60 (0,90)	0,92	0,00
BI	0,0011 (0,0003)	B	34,28 (11,34)	0,66	0,00
ZnI	-0,0006 (0,0293)	Zn	28,15 (5,76)	-0,19	0,14
MnI	-0,0004 (0,0003)	Mn	273,40 (72,21)	-0,36	0,00
FeI	-0,0021 (0,0007)	Fe	193,00 (49,20)	0,27	0,04
CuI	0,2188 (0,0039)	Cu	5,70 (2,14)	-0,63	0,00

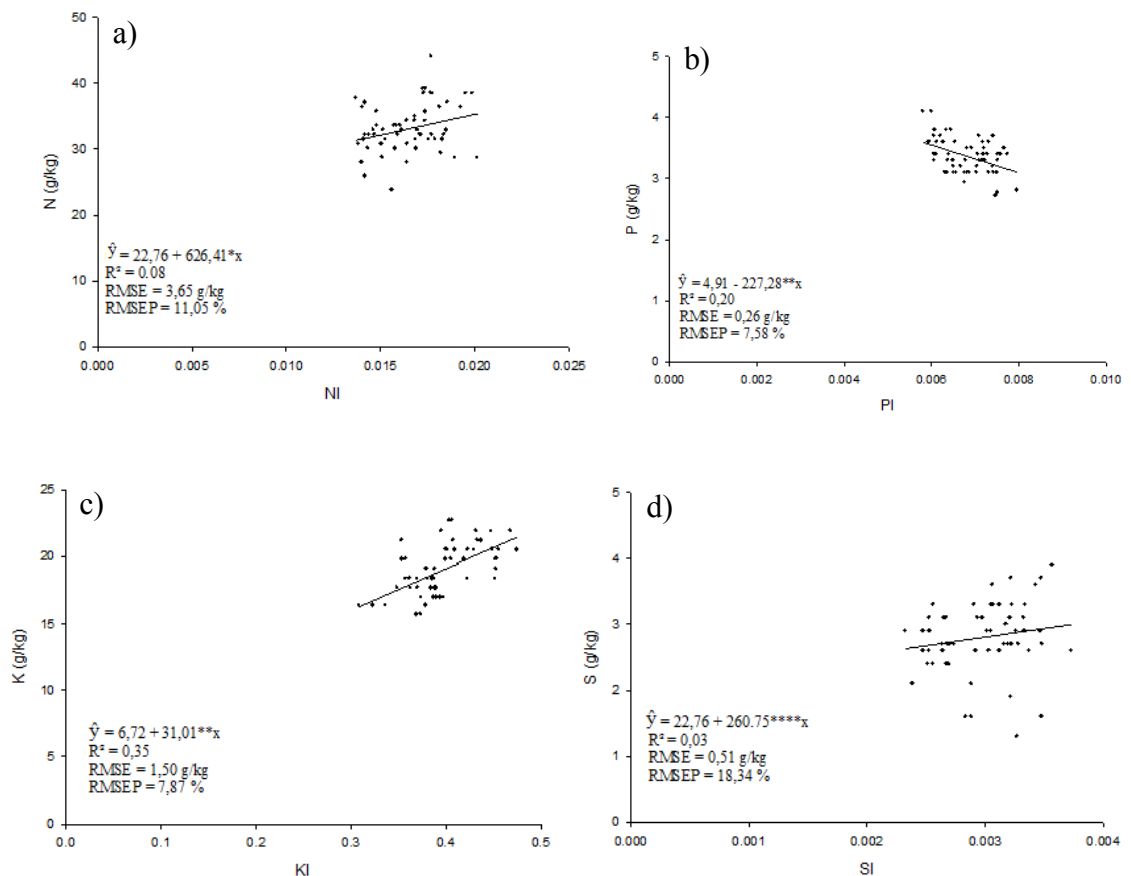
NI, PI..... FeI, CuI, índices de vegetação; \bar{x} = média do índice de vegetação; \bar{y} = média do teor do nutriente; σ = desvio padrão; N, P..... Fe, Cu, nutrientes; r_{xy} , correlação de Pearson entre as variáveis x e y; ρ -value da correlação.

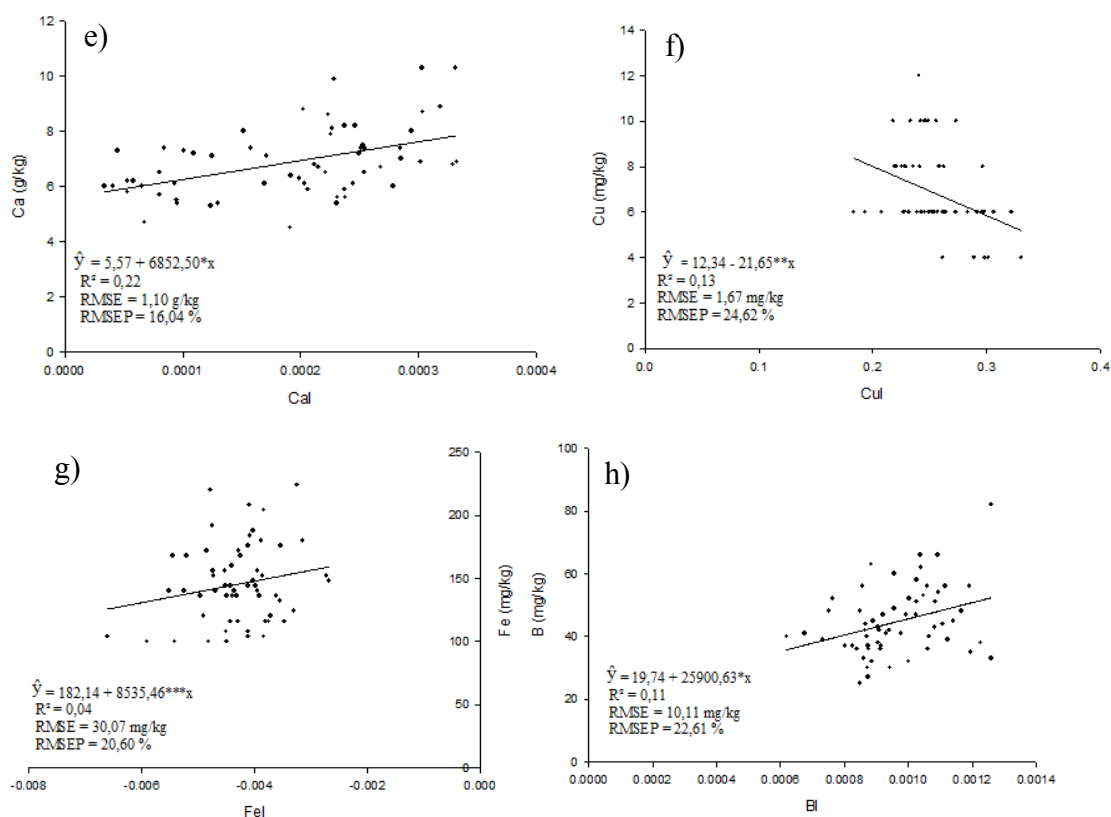
3.3 - Modelos ajustados no minijardim clonal

O modelo linear foi o mais adequado aos índices de vegetação NI, PI, KI, SI, CaI, CuI, FeI e BI (FIGURA 10 a, b, c, d, e, f, g, h), na estimativa do teor dos seus respectivos nutrientes no minijardim clonal.

Os ajustes entre os índices de vegetação NI, PI, KI, SI e CaI (FIGURA 10 a, b, c, d, e) e seus referidos nutrientes, apresentaram valores de R^2 de 0,08; 0,20; 0,35; 0,03 e 0,22, RMSE de $3,65 \text{ g.kg}^{-1}$; $0,26 \text{ g.kg}^{-1}$; $1,50 \text{ g.kg}^{-1}$; $0,51 \text{ g.kg}^{-1}$ e $1,10 \text{ g.kg}^{-1}$ e RMSEP de 11,05 %; 7,58 %; 7,87 %; 18,34 % e 16,04 %, apesar de apresentarem um baixo R^2 . Os ajustes de CuI, FeI e BI e seus respectivos nutrientes (Figura 9 f, g, h) apresentaram resultados de 0,13; 0,04 e 0,11 para R^2 , RMSE de $1,67 \text{ mg.kg}^{-1}$; $30,07 \text{ mg.kg}^{-1}$; $10,11 \text{ mg.kg}^{-1}$ e RMSEP de 24,61 %; 20,66 % e 22,61 %, mas apresentaram baixos valores de R^2 .

Figura 10 - Relação entre os índices de vegetação NI, PI, KI, SI, CaI, CuI, FeI e BI e teor dos nutrientes, coeficiente de determinação (R^2), Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e porcentual da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSEP) no minijardim clonal.





Modelos ajustados para estimativa do teor de N (a), P (b), K (c), S (d), Ca (e), Cu (f), Fe (g) e B (h); coeficiente significativo a 1 % (**); a 5 % (*); a 13 % (***) ; a 20 % (****).

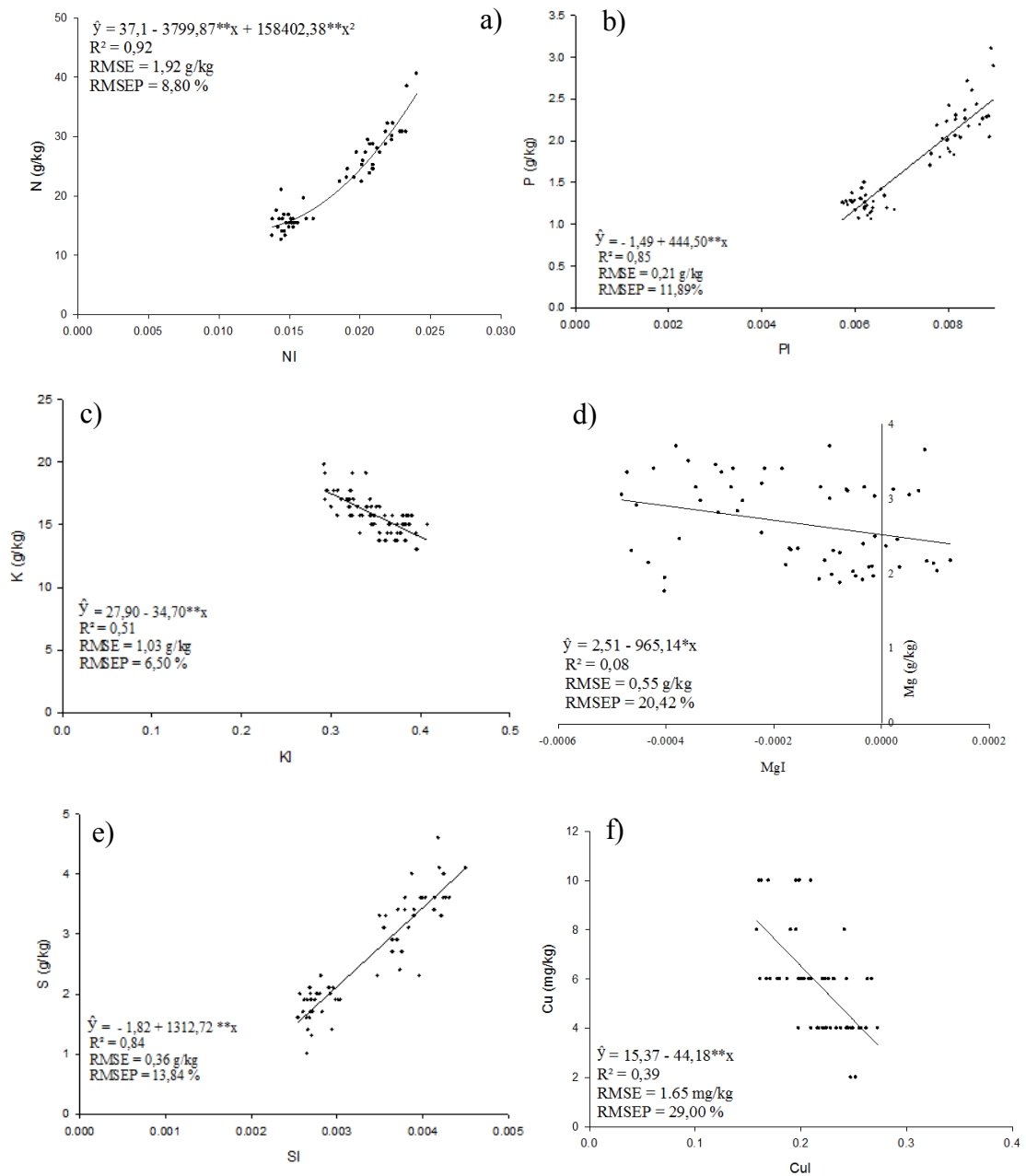
3.4 - Modelos ajustados na produção de mudas

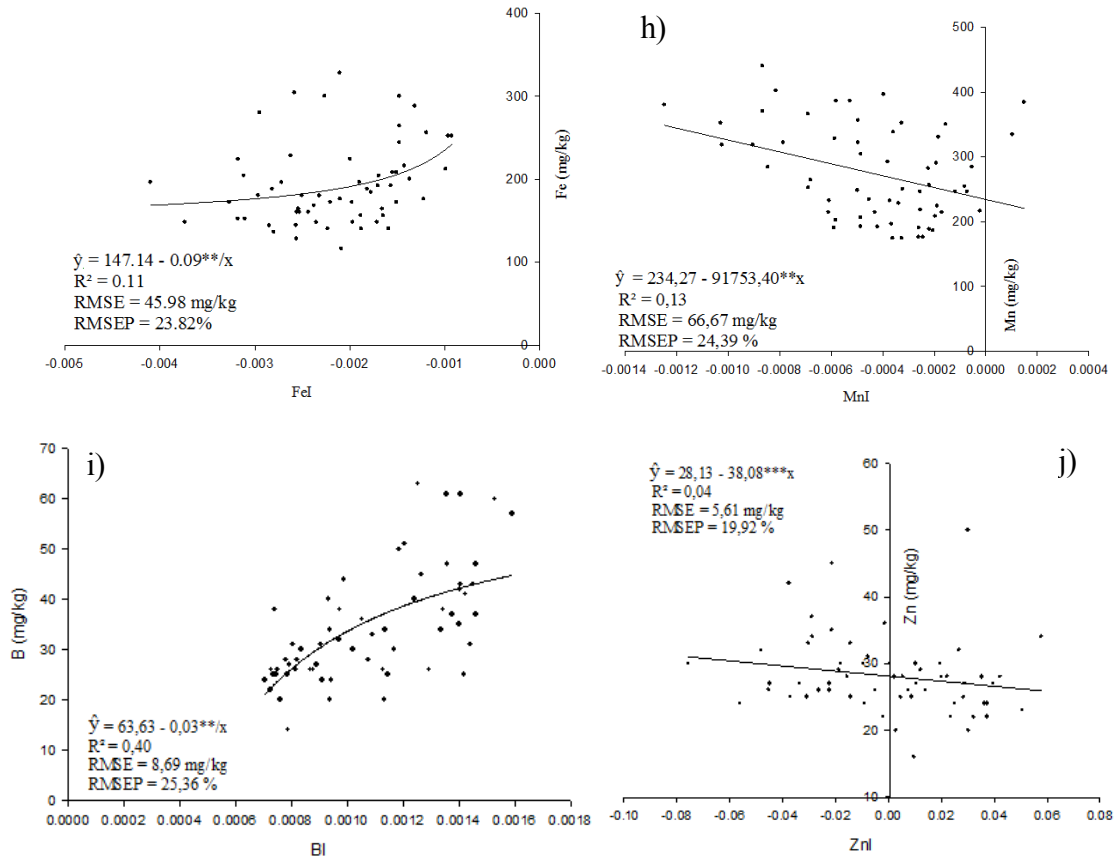
O modelo linear foi adequado aos índices PI (b), KI (c), MgI (d), SI (e), CuI (f) MnI (h), ZnI (j), o quadrático ao NI (a) e o inverso de primeira ordem ao FeI (g) e BI (i) (FIGURA 11).

Os modelos ajustados aos índices NI, PI e SI (FIGURA 10 a, b, e), e seus respectivos nutrientes, apresentaram os valores de R^2 , 0,92, 0,85 e 0,84, RMSE de $1,92 \text{ g.kg}^{-1}$; $0,21 \text{ g.kg}^{-1}$ e $0,36 \text{ g.kg}^{-1}$ e RMSEP de 8,80 %; 11,89 % e 12,32 %, considerados de boa qualidade (OLIVEIRA, 2015). Seguindo a mesma tendência a estimativa do teor de K por meio do índice KI (FIGURA 9 c) apresentou RMSE de $1,03 \text{ g.kg}^{-1}$ e RMSEP de 6,50 %, porém um R^2 de 0,51.

As equações dos teores dos micronutrientes estimados pelos índices CuI, FeI, MnI, BI e ZnI (FIGURA 11 f, j, h, i, j), apresentaram valores de R^2 de 0,39; 0,11; 0,13; 0,40 e 0,04, RMSE de $1,65 \text{ mg.kg}^{-1}$; $45,98 \text{ mg.kg}^{-1}$; $66,67 \text{ mg.kg}^{-1}$; $8,69 \text{ mg.kg}^{-1}$ e $5,61 \text{ mg.kg}^{-1}$ e RMSEP de 29,00 %; 23,82 %; 24,39 %; 25,36 % e 19,92 %, respectivamente, consideradas de qualidade aceitável, com exceção do ZnI que foi de boa qualidade.

Figura 11 - Relação entre os índices de vegetação NI, PI, KI, Mgl, SI, Cul, FeI, MnI, BI e ZnI e teor dos nutrientes, coeficiente de determinação (R^2), Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e porcentual da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSEP) na produção de mudas.



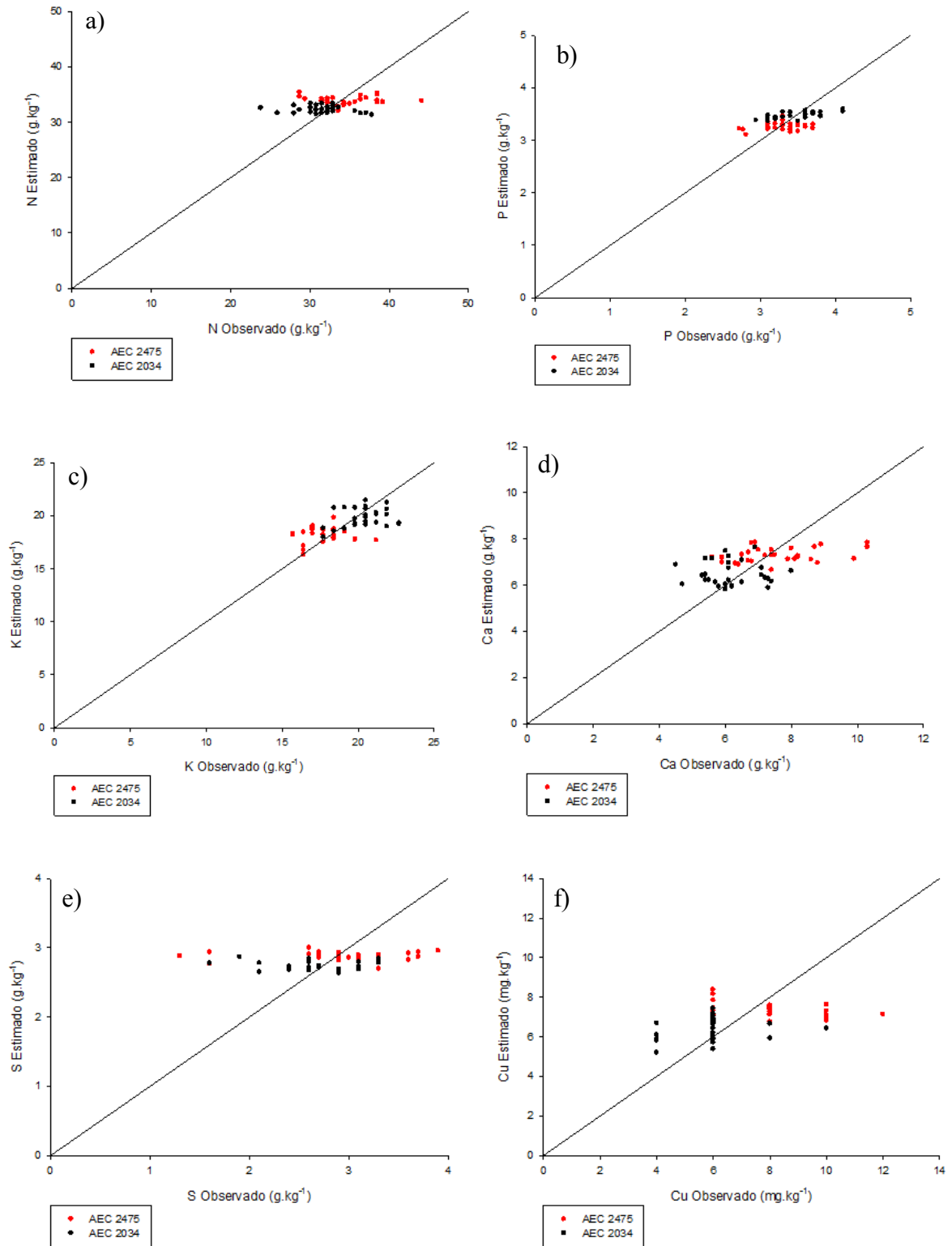


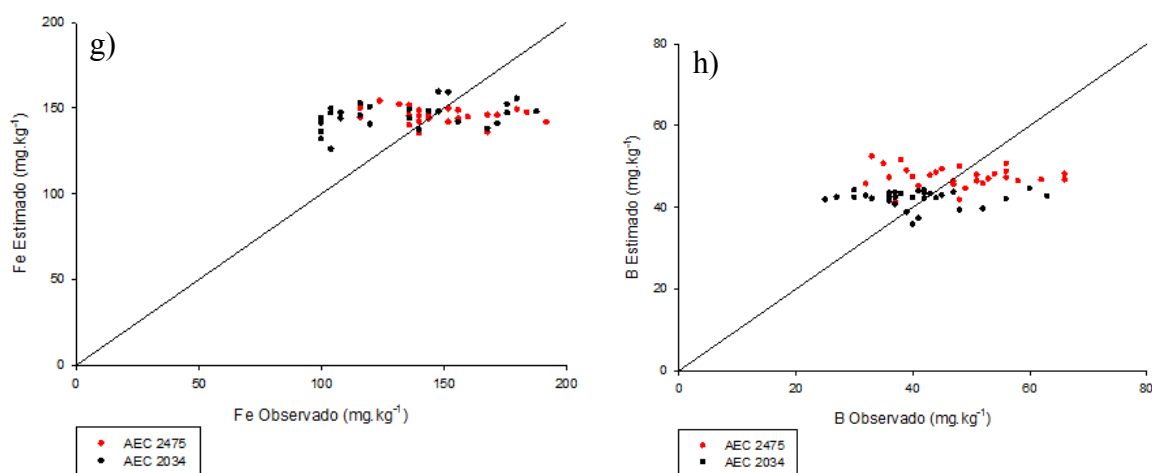
Modelos ajustados para estimativa do teor de N (a), P (b), K (c), Mg (d), S (e), Cu (f), Fe (g), Mn (h), B (i) e Zn (j); coeficiente significativo a 1 % (**); significativo a 5 % (*); significativo a 13 % (***)

3.5 - Teor de nutrientes estimados por índices de vegetação

Nas condições de minijardim clonal as equações apresentaram baixos valores de R^2 apesar de RMSE considerado boa qualidade (RMSEP até 20%) e de qualidade aceitável (RMSEP entre 20 a 30%). Ao analisar a Figura 12, as melhores estimativas foram provenientes das equações ajustadas com os índices PI e KI, que apresentaram elevados R^2 (FIGURA 10) nas condições em análise. O NI apresentou boas estimativas para valores de 28 a 35 g.kg⁻¹, mas estimativas de valores inferiores ao intervalo citado, ocasionou a superestimação dos dados, e para valores superiores ao intervalo, o contrário. As estimativas dos teores de Fe por meio do índice FeI apresentaram eficientes apenas ao intervalo de 140 a 150 mg.kg⁻¹. Os demais índices não proporcionaram ajustes de qualidade e apresentaram estimativas dos referidos teores de nutrientes que não são capazes de relatar o fenômeno em questão.

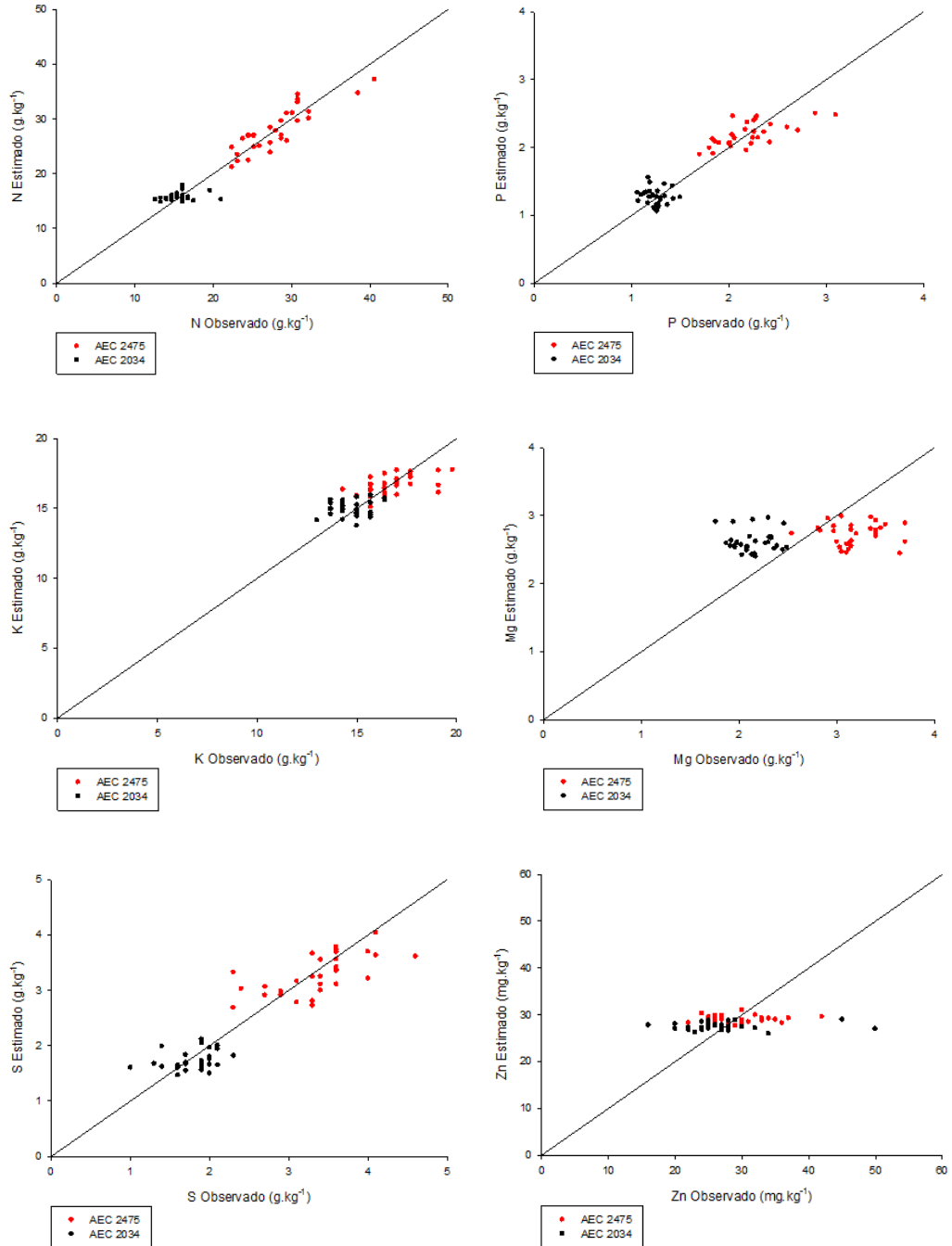
Figura 12 - Relações entre os teores de macro e micronutrientes observados em laboratório e estimados pelos índices de vegetação no minijardim clonal.

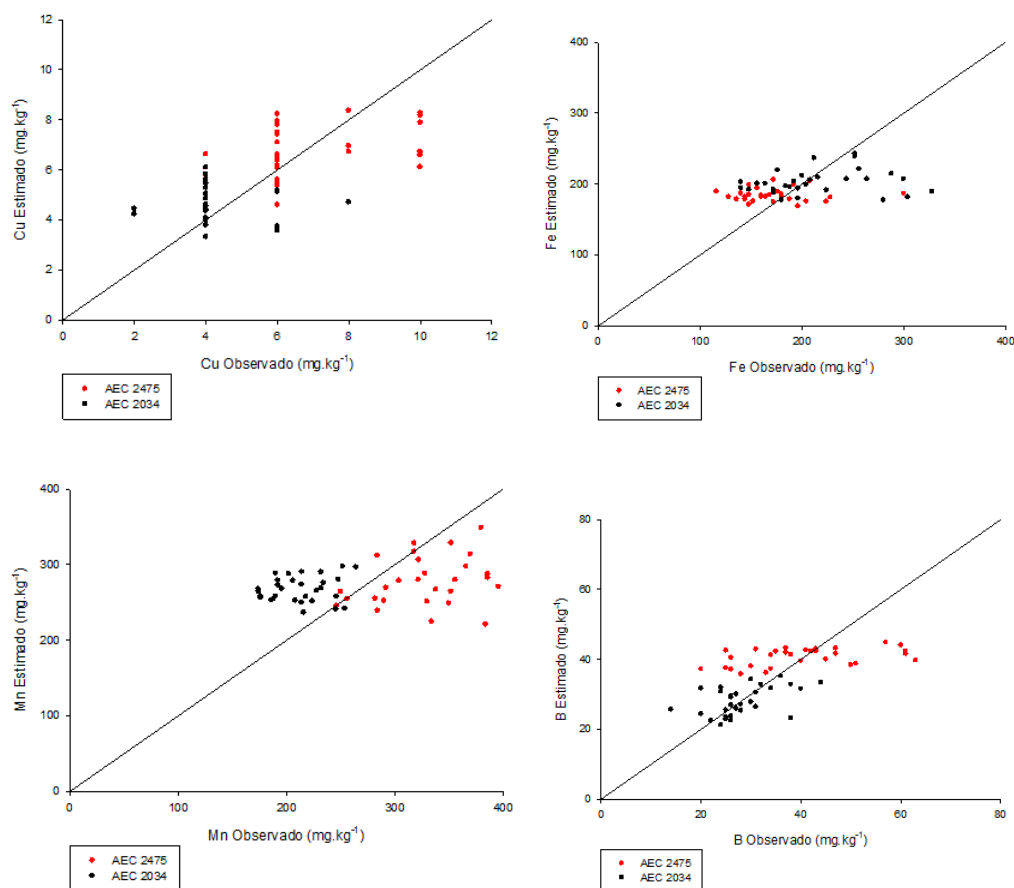




Na produção de mudas (FIGURA 13) os índices NI, PI, KI e SI foram capazes de estimar adequadamente os teores de N, P, K e S e de fornecer boas estimativas dos nutrientes citados. Ao analisar os índices que estimam os micronutrientes, ZnI e BI, esses proporcionaram uma boa estimativa. O ZnI foi eficaz para estimativas entre 25 a 35 mg.kg⁻¹, já o BI apresentou bons resultados no intervalo de 20 a 40 mg.kg⁻¹, contudo, apenas nas estimativas referentes ao clone AEC 2034, uma vez que o AEC 2475 apresentou uma superestimativa dos teores de B, no mesmo intervalo analisado. Os demais índices não apresentaram um bom ajuste e forneceram estimativas que não condizem com a realidade encontrada na produção de mudas.

Figura 13 - Relações entre os teores de macro e micronutrientes observados em laboratório e estimados pelos índices de vegetação na produção de mudas.





4 - Discussão

Nas condições de minijardim clonal (Figura 8), os clones não apresentaram diferença significativa na região de 400 a 900 nm. Porém, ao analisar o espectro por regiões, as curvas espectrais do violeta e azul (400 a 500 nm) e infravermelho próximo em análise (700 a 900 nm) apresentaram diferença significativa. A maior absorção dos feixes luminosos pelas folhas do minijardim clonal pode está relacionada à adoção do estufim sobre os canaletões, data de coleta dos dados espectrais (realizada no outono) e ao teor de água na folha.

Devido à máxima absorbância da clorofila (WU et al., 2008), era esperado na região do vermelho (660 a 680 nm) um menor valor de refletância. Contudo, no minijardim esta tendência não foi observada (FIGURA 8), e sim uma maior absorção na região do violeta e azul (400 a 500 nm), o que resulta em valores inferiores de reflectância. O microclima proporcionado pelo no estufim ocasiona mudanças fisiológicas e morfológicas nas minicepas, o que pode proporcionar o aumento dos teores de carotenoides (OLIVEIRA, 2016). Em condições extremas, principalmente em elevadas temperaturas, o vegetal reduz os teores de

clorofilas *a* e *b* devido à foto-oxidação, sendo o processo retardado pelos carotenóides, que protegem o pigmento (STREIT et al., 2005). Portanto, a maior absorção na região do violeta e azul, observados no estudo nas condições de minijardim clonal, pode estar relacionada aos teores de carotenóides presentes nas folhas. Na região do infravermelho próximo, a resposta espectral encontrada no minijardim clonal, pode ter sido influenciada devido às modificações morfológicas causadas pelo estufim, pois a resposta espectral nessa região está ligada as condições estruturais das folhas. Outro fator que pode ter contribuído para a resposta espectral no minijardim clonal é o teor de água na folha, pois as folhas dessa etapa apresentam mais turgidas devido ao sistema de irrigação por gotejamento, e esse fator contribui para a redução da reflectância em todos os comprimentos de onda (WOOLLEY, 1971).

Nas condições de produção de mudas (FIGURA 9), os clones exibiram curvas espectrais diferentes nos comprimentos de ondas avaliados. O AEC 2034 apresentou maiores valores de refletância e teor de N 50% inferior em relação ao AEC 2475, que apresentou valores de refletância inferiores (TABELA 2). Baixos teores de N influenciam diretamente nos teores de clorofila, uma vez que o nutriente e o pigmento apresentam alta correlação (ANDRADE et al., 2000). Folhas com menor teor de N apresentam valores de refletância espectral mais elevado na região do visível (RICHARDSON et al., 2002). Pesquisa realizada por Oliveira (2015), com folha com diversos padrões de coloração, demonstrou que maior teor de N proporciona menor intensidade de refletância na região do VIS, e menores teores de N, maior intensidade de refletância na mesma região. Os mesmos resultados foram encontrados na produção de mudas, o que corrobora com os resultados observados. Ao analisar a região do infravermelho próximo, os clones avaliados apresentaram diferenças espectrais. A região do infravermelho próximo se correlaciona com a morfologia da folha (GUYOT e BARET, 1988), e os clones em estudo apresentaram diferença espectral nessa região do espectro eletromagnético, o que pode caracterizar estruturas diferentes entre clones, porém faz-se necessário uma análise minuciosa com microscopia para confirmar o ocorrido na produção de mudas.

A calibração dos modelos de estimativa do teor de nutriente foi realizada de maneira conjunta entre os clones, pois os índices de vegetação são sensíveis às mudanças espectrais e estabelecem uma conexão lógica entre os parâmetros biofísicos e as propriedades espectrais (PONZONI et al., 2012). Além do mais, os índices estudados foram construídos com dados espectrais oriundos de três clones de eucalipto.

No minijardim clonal os modelos apresentaram um valor de RMSEP considerado bom na estimativa dos macronutrientes e aceitável para os micronutrientes (FIGURA 10), porém apresentaram baixos valores de R^2 . Contudo, os modelos e índices de vegetação (FIGURA 12) foram precisos e adequados apenas na estimativa de P e K, e em apenas um intervalo de N e Fe. Na fase de produção de mudas os modelos que utilizaram os índices NI, PI, KI e SI, apresentaram um elevado R^2 (FIGURA 11), e foram capazes de estimar os macronutrientes N, P, K e S. Os índices de vegetação utilizados na estimativa dos micronutrientes, somente o índice BI apresentou boas estimas (FIGURA 13). Na produção de mudas os índices em estudo apresentaram adequados principalmente na estimativa dos teores de macronutrientes, e nos micronutrientes eficiente apenas na estimativa do B. Os baixos valores de R^2 nas condições de minijardim clonal podem estar associados ao manejo adotado nessa etapa, ou seja, uso do estufim e elevado número de fertirrigações diárias, tornando as condições sem uma variação, e o fator não sendo explicado pelas curvas espectrais e índices de vegetação.

Os índices de vegetação utilizados no trabalho foram mais sensíveis aos macronutrientes. Tal fato pode ser explicado, devido às concentrações de macronutrientes nas plantas apresentarem de 10 a 5000 vezes superior, se comparado à demanda dos micronutrientes (FAQUIN, 2005), e de forma geral, a variabilidade dos micronutrientes nas plantas é bem superior a dos macronutrientes. Apesar destas diferenças, os índices de vegetação estudados foram capazes de estimar os macro e micronutrientes.

Os índices de vegetação (TABELA 1) que atuam na região do *red edge* (680 - 750) foram os que apresentaram os melhores resultados em ambas as condições avaliadas em viveiro (FIGURA 12; FIGURA 13). Os resultados observados em outros trabalhos, que também utilizaram índices de vegetação na estimativa de características de interesse em eucalipto, corroboram com os resultados obtidos no presente trabalho. Dentre os estudos, destaca-se os trabalhos de Oliveira (2015) na estimativa do teor de N, Almeida (2015) na estimativa do índice de área foliar e Goergen et al. (2015) na estimativa da dinâmica sazonal de clorofila.

Geralmente, o uso de índices de vegetação na estimativa do teor de nutrientes é realizado com maior intensidade em estudos relacionados à estimativa do teor de N, devido à alta correlação com a clorofila (FEWERDA e SKIDMORE, 2007). Porém, os índices estudados demonstram eficiência não somente na estimativa do teor N, mas em outros macro e micronutrientes que são essenciais para o desenvolvimento vegetal. Os resultados alcançados demonstram o elevado potencial da técnica e dos índices de vegetação estudados

na estimativa dos teores de nutrientes de forma não destrutiva, porém fazem-se necessários mais estudos com os índices estudados, de maneira a validar a eficiência dos mesmos.

5 - Conclusões

É possível estimar os teores de nutrientes por meio de índices de vegetação nas condições de minijardim clonal e produção de mudas em viveiro de eucalipto.

Os índices que atuam na região do *red edge* os que apresentaram as melhores estimativas em ambas as condições avaliadas.

As equações calibradas podem estar limitadas às condições de estudo. Novas análises são necessárias para comprovação desta provável limitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, S.A.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M.; SANTOS, N.T.; GLERIANI, J.M. ALVES, E.A. Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.9, p.1637-1644, 2009.

ADAMS, M.L.; NORVELL, W.A.; PHILPOT, W.D.; PEVERLY, J.H. Spectral Detection of Micronutrient Deficiency in 'Bragg' Soybean. **Agronomy Journal**, v. 92, p.261-274, mar-abr, 2000.

ANDRADE, C.A.; FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A.VENEGAS, V.H.A.; MARTINS, C.E.; SOUZA, D.P.H. Produtividade e valor nutritivo de capim-elefante cv. napier sob doses crescentes de nitrogênio e potássio. **Revista brasileira de zootecnia**. 29(6), p. 1589 - 1595, 2000.

ALMEIDA, A.Q.; RIBEIRO,A.; DELGADO, R.C.; RODY, Y.P.; OLIVEIRA, A.S.; LEITE, F.P. Índice de Área Foliar de *Eucalyptus* Estimado por Índices de Vegetação Utilizando Imagens TM - Landsat 5. **Floresta e Ambiente**, v.22, n.3, p. 368-376, 2015.

CANAVESI, V.; KIRCHNER, F.F. Quantificação de macronutrientes em floresta ombrófila mista montana utilizando dados de campo e dados obtidos a partir de imagens do satélite IKONOS II. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 3, set./dez. 2005.

CARRIELLO, F.; MIRANDA, F.G.; PONZONI, F.J.; CARDOSO, P.A.; MARTINS, S.P.. Uso da transmitância na caracterização espectral de folhas verdes. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril, **INPE**, p. 2451 - 2457, 2003.

CHEN, D.; WAN, Z.; ZHOU, Y.; XIANG, W.; ZHONG, J.; DING, M.; YU, H.; JI, Z. Tuning into blue and red: europium single-doped nano-glass-ceramics for potential application in photosynthesis. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 3, 3141-3149, 2015.

COLTRI, P.P.; ROMANI, L.A.S.; DUBREUIL, V.; CORGNE, S.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H.S. Variação temporal da biomassa do café arábica arborizado e a pleno sol, através de índices de vegetação. In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, **INPE**, p.0531, 2011.

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

CURRAN, P.J.; DUNGAN, J.L.; MACLER, B.A. PLUMMER, S.E. The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration, **Remote Sensing Environ.** v. 35, p. 69-76, 1991.

DATT, B. A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 154, p 30-36, 1999a.

DATT, B. Remote Sensing of Water Content in Eucalyptus Leaves. **Australian Journal of Botany**, v.47, p.909-923,1999b.

DAWSON, T.P.; CURRAN, P.J.; PLUMMER, S.E. LIBERTY—Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p 50–60, 1998.

EPIPHANIO, J.; N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília**, v. 31, n.6, p. 445-454, jun, 1996.

FAQUIN, V. **Nutrição de plantas**. Lavras: UFLA, FAEPE, 186 p., 2005

FERREIRA, L.G.; FERREIRA, N.C.; FERREIRA, M.E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**. Maringá, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

FEWERDA, J.G.; SKIDMORE, A.K. Can nutrient status of four woody plant species be predicted using field spectrometry?. **Journal of Photogrammetry e Remoto Sensing**. v.62, p. 406-414, 2007.

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª edição ampliada e atualizada. São Paulo. Oficina de textos, 128p., 2011.

FONSECA, P.R.B.; FERNANDES, M.G.; DUTRA, F.; SOUZA, PONTIM, B.C.A. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, em híbridos de milho, (*Zea mays* L.) bt e isogênico. **Revista Verde**, Mossoró – RN , v.7, n.1, p. 56 - 60, jan-mar, 2012.

FORMAGGIO, A. R.; TARDIN, A.T.; ASSUNÇÃO, G.V.; EPHIPHANIO, J.C.N.; MOREIRA, M.A.; CHEN, S.C.; DUARTE, V. Sensoriamento Remoto na Agricultura: Conceitos Básicos, Metodologia e Aplicações. **INPE**, 4806/MD39, 235p, Abril, 1989.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GOERGEN, L.C.G.; SOARES, J.C.W.; BERRA, E.F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R.S. Índices espectrais para avaliação da dinâmica sazonal de clorofilas em folhas de *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 55-61, abr./jun. 2015.

GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. de. **Viveiros florestais (propagação assexuada)**. 3ª edição, Viçosa: UFV, 2006.

GOTTARDO, A.; BERNARDO, T.R.T.; OLIVEIRA, L.; GARCIA, D.C. Calibração do equipamento de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) para a determinação da qualidade nutricional do trigo grão. **XXIV Seminário de Iniciação Científica - Salão do conhecimento: ciência alimentando o Brasil**, Unijuí, 2016.

GRAEFF, S.; CLAUPEIN, W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements. **European Journal Agronomy**, v. 19, p. 611-618, 2003.

GRAEFF, S.; STEFFENS, D.; SCHUBERT, S. Use of reflectance measurements for the early detection of N, P, Mg, and Fe deficiencies in *Zea mays* L. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 164, p. 445-450, 2001.

GUYOT, G; BARET, F. Utilisation de la haute resolution spectral pour suivre l'etat des couverts vegetaux. In: **Proceedings of the 4th international colloquium on spectral signature of objects in remote sensing held at Aussois**, France, 18 - 22 January, p. 279 - 286, 1988.

HORLER, D. N. H.; BARBER, J.; DARCH, J. P.; FERNS, D. C.; BARRINGER, A. R. Approaches to detection of geochemical stress in vegetation. **Advanced Space Research**, v.3, n. 2, p. 175-179, 1983a.

HORLER, D. N.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 4, p. 273-288, 1983b.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2015: ano base 2014**. São Paulo, IBÁ, 65 p., 2015.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2016: ano base 2015**. São Paulo, IBÁ, 100 p., 2016.

JACQUEMOUD, S.; BARET, F. PROSPECT: A model of leaf optical properties. **Remote Sensing of Environment**, v. 34, p. 75 – 91, 1990.

JESSEN, J. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. tradução: José Carlos Neves Epiphany et.al., São José dos Campos - São Paulo, 2ª edição, Parênteses, 2011.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, p. 155-159, 1970.

LIPPERT, D.B.; BENEDETTI, A.C.P.; MUNIZ, M.F.B.; PEREIRA, R.S.; BIERNASKI JUNIOR, C.A.; FINKENAUER, E.; BERRA, E.F. Comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* (Labill.) atacadas por *Mycosphaerella* spp. nas regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 211-219, jan.-mar., 2015.

MARENCO, R.A.; ANTEZANA-VERA, GOUVÊA, O.R.S.; CAMARGO, M.A.B.; OLIVEIRA, M.F.; SANTOS, J.K.S. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, Suplemento, p. 786-789, nov/dez, 2014.

MARQUES. L.S.; PAIVA, H.N; NEVES, J.CL.; GOMES, J.M.; SOUZA, P.H. Crescimento de Mudanças de Jacaré (*Piptadenia gonoacantha* J.F. Macbr.) em Diferentes Tipos de Solos e Fontes e Doses de Nitrogênio. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.1, p.81-92, 2009.

MARTINS, F.R.; PEREIRA, E.B.; ECHER, M.P.S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélites geoestacionário - o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, 2004.

MOLIN, J.P; FRASSON, F.R.; AMARAL, L.R.; POVH, F.P.; SALVI, J.V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345–1349, 2010.

MONTEIRO, P.F.C.; ÂNGULO FILHO, R.; XAVIER, A.C.; MONTEIRO, R.O.C. Índices de vegetação simulados de diferentes sensores na estimativa das variáveis biofísicas do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.4, p.433-441, abr. 2013.

MORAN, J.A.; MITCHELL, A.K.; GOODMANSON, G.; STOCKBURGUER, K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods. **Tree Physiology**, v. 20, p 1113–1120, 2000.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4ª edição Atualizada e Ampliada, Viçosa - MG, Editora UFV, 422p, 2011.

OLIVEIRA, A.S. Propagação clonal de eucalipto em ambiente protegido por estufins: Produção, ecofisiologia e modelagem do crescimento das miniestacas. 92p. 2016. **(Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa,– UFV, Viçosa. 2016.**

OLIVEIRA, L.F.R. Avaliação de métodos não destrutivos para monitoramento nutricional de povoamentos de eucalipto. 60p. 2015. **(Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Diamantina. 2015.**

OLIVEIRA, L.F.R. **Estimativas de nutrientes foliares em eucalipto por novos índices de vegetação**. em fase de publicação, 2017.

PAJARES, G.; PERUZZI, A.; SANTOS, P.G. Sensors in Agriculture and Forestry. **Sensor**, v. 13, p. 12132-12139, 2013.

PEÑUELAS, J., FILELLA, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. **Trends Plant Science**, v. 3, p151–156, 1998.

PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.789-795, 2009.

PONZONI, F.J.; PACHECO, L.R.F.; SANTOS, S.B.; ANDRADES FILHO, C.O. Caracterização espectro-temporal de dosséis de *Eucalyptus* spp. mediante dados radiométricos TM/Landsat5. **Cerne**, v. 21, n.2, p. 267-275, 2015.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 edição atualizada e ampliada, SãoPaulo, Oficina de textos, 2012.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Celular**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 830, 2013.

R Core Team (2016). R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2016.

RICHARDSON, A.D.; DUIGAN, S.P.; BERLYN, G.P. An evolution os noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. **New Phytologist**, v. 153, p. 185 - 194, 2002.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 6ª edição, EDUFU, Uberlândia, 248p. 2007.

ROSA, V.G.C.; MOREIRA, M.A.; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.12, p.1478-1488, dez, 2010.

SANTOS, M.S.; FEIJÓ, N.S.A; SECCO, T.M.; MIELKE, M.S.; GOMES, F.P.; COSTA, L.C.B.; SILVA, D.C. **Revista Brasileira de Plantas Medicinai**s. Campinas, v.16, n.1, p.89-96, 2014.

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

SCHRODER, T.; PEREIRA, R.S.; ZIMMERMANN, A.P.L.; REDIN, C.G.; MACHADO, L.M.; FELCK, M.D. ROCHA, N.S. Influência de métodos de coleta de dados espectrorradiométricos sob índices de vegetação em eucalipto. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v.19, n3. , set - dez, p. 690-701, 2015.

SCHUT, A.G.T.; LOKHORST, C.; HENDRIKS, M.M.W.B.; KORNET, J.G.; KASPER, G. Potential of imaging spectroscopy as tool for pasture management. **Grass and Forage Science**, v. 60, p. 34-45, 2005.

SHIMABUKURO, Y.E.; MAEDA, E.E.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento remoto e sistams de informações geográficas aplicadas ao estudo dos recursos agronômicos e florestais. **Ceres**, v.56, n.4, p. 399-409, 2009.

SIGNAL DEVELOPERS. **Signal: Signal processing**. URL: <<http://r-forge.r-project.org/projects/signal/>>, 2013.

STREIT, N.M.; CANTERLE, L.P.; CANTO, M.W.; HECKTHEUER, L.H.H. As clorofilas. reit et al. **Ciência Rural**, v.35, n.3, mai-jun, 2005. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.748-755, mai-jun, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, p. 918, 2013.

TARPLEY, L.; REDDY, K.R.; COLE, G.F.S.; Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, v. 40, p. 1814–1819, nov-dez, 2000.

TIAN, Y.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W.; ZHU, Y. Extracting red edge position parameters from ground and space based. **Plant Production Science**, v.14, n.3, p. 270-281, 2011.

TRINDADE, C.; JOSÉ REZENDE, L. P.; JACOVINE, L. A. G. SARTORIO, M. L. **Gestão e Controle da Qualidade na Atividade Florestal**. Viçosa: Editora UFV, 253p., 2012.

USTIN, S.L.; GITELSON, A.A.; JACQUEMOUD, S.; SCHAEPMAN, M.; ASNER, G.P.; GAMON, J.A.; TEJADA, P.Z. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p S67–S77, 2009.

VIÑA, A.; GITELSON, A.A.; NGUY-ROBERTSON, A.L.; PENG, Y. Comparasion of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 3468–3478, 2011.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**. v. 47, p 656 - 662, 1971.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *agricultural and forest meteorology*, v. 1, n. 48, p.1230 – 1241, 2008.

ZHAO, D.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; CARTER, G.A. Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. **Plant and Soil**, v.257, p. 205–217, 2003.

APÊNDICE

Procedimento de Savitzky-Golay realizado por amostra no software R para o filtro de alisamento.

```
#Leitura do pacote utilizado para o filtro de alisamento de Savitzky-Golay.
library("signal")
#Leitura do arquivo e procedimento de alisamento dec (decimal), header (cabeçalho)
#OBS: o arquivo está disposto em coluna
An <- read.csv("arquivo.csv",sep = ";",dec = ".", header = T)
An<- t(An)
arquivo1<-as.matrix(A1)
# Savitzky-Golay
Ansg<- t(apply(arquivo1,1,sgolayfilt,p=2,n=111,m=0))
Ansg <- t(A1sg)
#para salvar o arquivo
write.csv(Ansg, file = "nome_dado_ao_arquivo.csv")
```