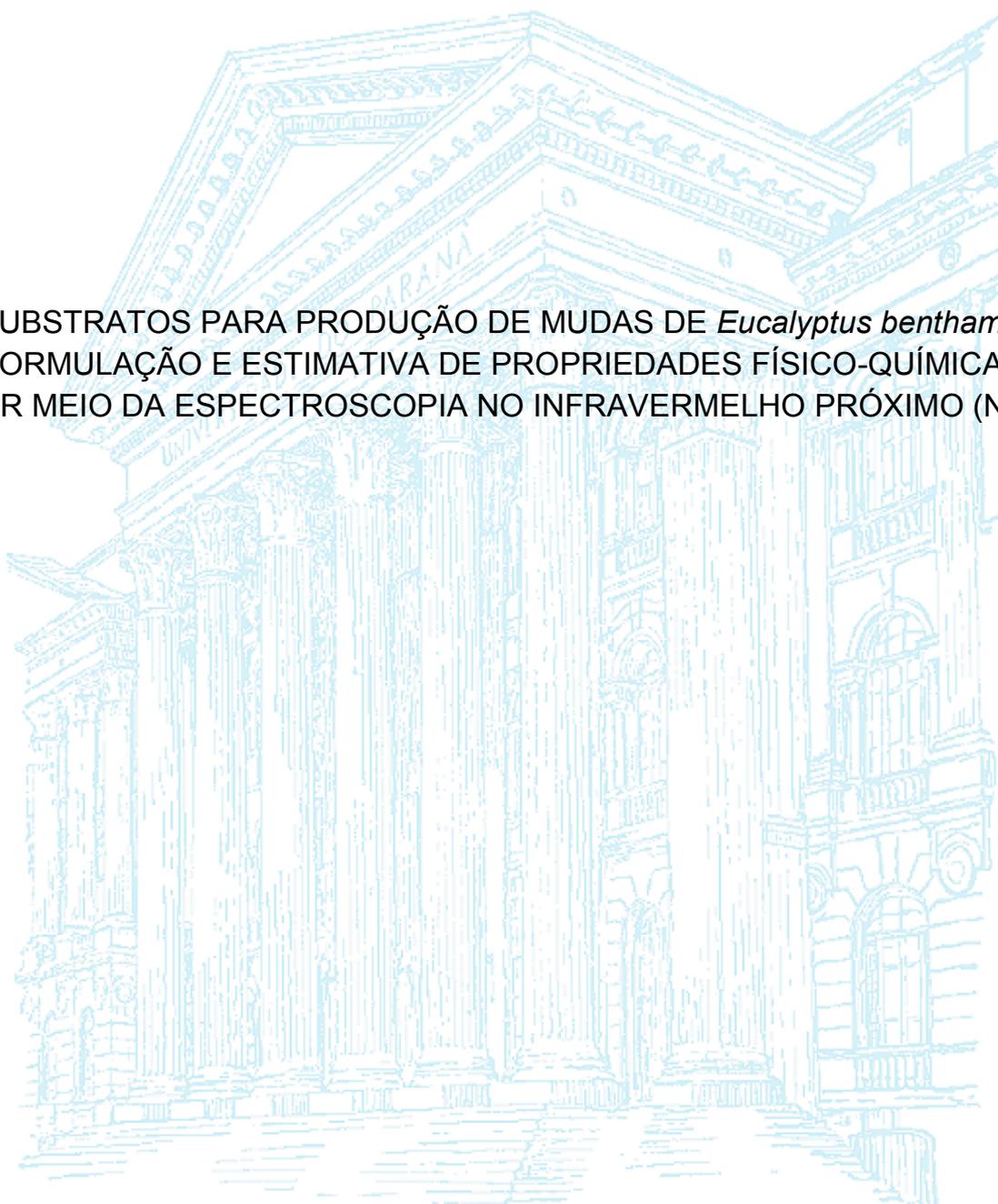


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAGMA KRATZ

SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii*:  
FORMULAÇÃO E ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS  
POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)



CURITIBA  
2015

DAGMA KRATZ

SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii*:  
FORMULAÇÃO E ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS  
POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Doutora em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Nogueira  
Co-orientadores: Dr. Ivar Wendling  
Dr. Washington Luiz Esteves Magalhães

CURITIBA  
2015

Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Kratz, Dagma

Substratos para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*: formulação e estimativa de propriedades físico-químicas por meio da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) / Dagma Kratz. – 2015

111 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Nogueira

Coorientadores: Dr. Ivar Wendling

Dr. Washington Luiz Esteves Magalhães

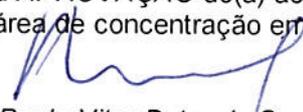
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 31/03/2015.

Área de concentração: Silvicultura

## PARECER

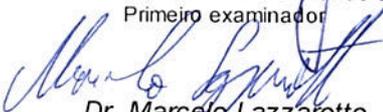
Defesa nº. 1111

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Dagma Kratz* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii*: FORMULAÇÃO E ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)**", é de parecer favorável à APROVAÇÃO do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em SILVICULTURA.



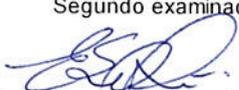
*Dr. Paulo Vitor Dutra de Souza*

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Primeiro examinador



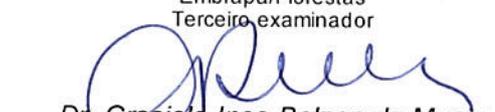
*Dr. Marcelo Lazzarotto*

Embrapa Florestas  
Segundo examinador



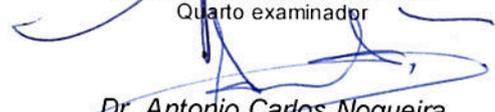
*Dr. Edilson Batista de Oliveira*

Embrapa/Florestas  
Terceiro examinador



*Dr. Graciela Ines Bolzon de Muniz*

Universidade Federal do Paraná  
Quarto examinador



*Dr. Antonio Carlos Nogueira*

Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 31 de março de 2015.



*Antonio Carlos Batista*

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

*A minha família*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Antonio Carlos Nogueira, pela orientação e sobretudo amizade nestes últimos 6 anos.

Ao Dr. Ivar Wendling agradeço pela orientação desde o início da minha carreira científica.

Ao Dr. Washington Magalhães pela orientação e ensinamentos sobre a técnica NIR, bem como pela pronta disponibilidade em ajudar.

Ao Dr. Marcelo Lazzarotto pela colaboração e orientação nas análises estatísticas referentes ao NIR.

Ao Dr. Edilson Batista de Oliveira, pesquisador da Embrapa Florestas, pelas instruções de como melhor analisar os dados do Capítulo 1.

Aos integrantes da banca examinadora: Paulo Vitor Dutra de Souza, Marcelo Lazzarotto, Edilson Batista de Oliveira, Graciela Ines Bolzon de Muniz, Alessandro Camargo Angelo e Ivar Wendling pelas contribuições realizadas no trabalho.

À Embrapa Florestas, pelo suporte prestado durante as conduções dos experimentos.

Aos meus queridos amigos e funcionários do Laboratório de Propagação de Espécies Florestais da Embrapa Florestas: Joel, Vero, Décio e Leonides à imprescindível colaboração para a realização deste e de outros trabalhos realizados desde 2006.

As amigas, Simone e Beth, funcionárias da Biblioteca da Embrapa Florestas, pela agradável companhia nos dias de estudo, neste ambiente, e auxílio na aquisição das referências bibliográficas.

Aos assistentes do Laboratório de solos da Embrapa Florestas, Onésimo, Nádia e Anne pelo auxílio na realização das análises químicas dos substratos.

Ao Professor Dr. Nivaldo Eduardo Rizzi da UFPR pela disponibilidade do Laboratório de Manejo de Bacias Hidrográficas.

Ao meu colega e grande amigo, Elias Melk pela aquisição da mesa de retenção de água, sem a qual seria impossível ter realizado o presente trabalho em nossa universidade.

A Anne, meu braço direito na realização do experimento do viveiro e análises físicas dos substratos.

A minha amiga e colega, Manoela Duarte, pela ajuda desde o preparo dos tratamentos da tese, peneirando carvão e bio sólido até os momentos de descontração.

A Lúcia Burda, secretária da Revista Floresta que tornou-se uma grande amiga após o período que trabalhamos juntas na revista.

Aos colegas do Laboratório de Sementes da UFPR: Lucas, Samanta, Mariane, Jeniffer, Pablo, Manoela e Izabeli pelo agradável convívio diário.

Aos amigos e colegas de curso pelo convívio diário, pelos momentos de alegria e aflição, agradeço por Deus ter colocado vocês na minha vida e tornar esta fase mais especial e agradável.

A todos que de alguma forma colaboraram para execução deste trabalho.

*“Eu jamais colocarei meu nome em um produto que não tenha em si o melhor que há em mim” (John Deere).*

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	7
INDICE DE TABELAS .....	9
INDICE DE ILUSTRAÇÕES .....	11
RESUMO GERAL .....	14
ABSTRACT .....	15
1INTRODUÇÃO GERAL .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 <i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden et Cambage .....	18
2.2 QUALIDADE DE MUDAS.....	18
2.3 SUBSTRATOS .....	19
2.3.1 Propriedades Físicas.....	20
2.3.2 Propriedades Químicas .....	22
2.3.3 Tipos de substratos .....	25
2.3.3.1 Componentes renováveis.....	25
2.3.3.2 Componentes não renováveis.....	28
2.3.4 Análise físico-químicas.....	29
2.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR).....	29
2.4.1 Calibração e validação de modelos.....	31
3 REFERÊNCIAS.....	35
CAPITULO 1 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUIMICAS E FORMULAÇÃO DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE <i>Eucalyptus benthamii</i> .....	43
RESUMO.....	43
ABSTRACT .....	44
1INTRODUÇÃO .....	45
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
2.1 PREPARO DOS SUBSTRATOS .....	46
2.2 ANÁLISE DE SUBSTRATOS .....	48
2.3 Custo.....	49
2.4 PRODUÇÃO DE MUDAS.....	49
2.5 DELINEAMENTO E ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	50
3 RESULTADOS .....	50
3.1 ANÁLISE DE SUBSTRATOS.....	51
3.2 CUSTO DE OBTENÇÃO.....	55
3.3 CRESCIMENTO DAS MUDAS.....	56

4DISCUSSÃO .....	59
4.1 PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS E CRESCIMENTO .....	59
4.2 CUSTO .....	61
5CONCLUSÕES .....	62
6 REFERÊNCIAS.....	63
CAPITULO 2 - ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO.....	66
RESUMO.....	66
ABSTRACT .....	67
1INTRODUÇÃO .....	68
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
2.1 PREPARO DOS SUBSTRATOS.....	69
2.2 ANÁLISE CONVENCIONAL DOS SUBSTRATOS.....	71
2.3 OBTENÇÃO DOS ESPECTROS DE NIR .....	71
2.4 CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA.....	72
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4 CONCLUSÕES .....	81
5 REFERÊNCIAS.....	82
CAPITULO 3 - ESPECTROFOTÔMETROS NIR PORTÁTIL E DE BANCADA PARA ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SUBSTRATOS.....	85
RESUMO.....	85
ABSTRACT .....	86
1 INTRODUÇÃO .....	87
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	88
2.1 PREPARO E ANALISE CONVENCIONAL DOS SUBSTRATOS.....	88
2.1.1 CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA.....	91
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
4 CONCLUSÕES .....	102
5 REFERÊNCIAS.....	103
APÊNDICES.....	106

## INDICE DE TABELAS

### CAPITULO 1

TABELA 1.1 - MATERIAIS UTILIZADOS (%) NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS (VOLUME/VOLUME). .....	47
TABELA 1.2 - TEMPERATURA DO AR MÍNIMA (T MIN.), MÁXIMA (T MÁX.), MÉDIA (T MÉD.) DENTRO DA ESTUFA NO PERÍODO DE PRODUÇÃO DAS MUDAS DE E. BENTHAMII. ....	49
TABELA 1.3 - RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MICROPOROSIDADE (MICRO), MACROPOROSIDADE (MACRO), POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE), MAGNÉSIO (MG), POTÁSSIO (K), FÓSFORO (P), CÁLCIO (CA), NITROGÊNIO (N), CARBONO (C) E ENXOFRE (S). ....	53
TABELA 1.4 - VALOR DE COMPRA, CUSTO DE TRANSPORTE, PREPARO E TOTAL DOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE E. BENTHAMII NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA, EM 2014. ....	56

### CAPITULO 2

TABELA 2.1 - MATERIAIS UTILIZADOS (%) NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS (VOLUME/VOLUME). .....	70
TABELA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO AJUSTADO BASEADO NO ÍNDICE RAZÃO DE PERFORMANCE (RDP).....	73
TABELA 2.3 - RESUMO DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS DOS GRUPOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO EXTERNA. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). ....	74
TABELA 2.4 - RESULTADOS DOS MODELOS PLS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). ....	75
TABELA 2.5 - PARAMETROS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA E EXTERNA DOS MODELOS. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). ....	77

### CAPITULO 3

TABELA 3. 1 - MATERIAIS UTILIZADOS (%) NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS (VOLUME/VOLUME). .....	89
TABELA 3. 2 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO AJUSTADO BASEADO NO ÍNDICE RAZÃO DE PERFORMANCE (RDP).....	92
TABELA 3.3 - RESUMO DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS DOS GRUPOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO EXTERNA. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). .....	92
TABELA 3.4 - RESULTADOS DO MODELO PLS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). .....	94
TABELA 3. 5 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA E EXTERNA DOS MODELOS GERADOS COM ESPECTROS DOS EQUIPAMENTOS DE BANCADA E PORTÁTIL. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). .....	98
TABELA 3. 6 - QUALIDADE DOS MODELOS GERADOS COM ESPECTROS DOS EQUIPAMENTOS DE BANCADA E PORTÁTIL. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH). .....	99

## INDICE DE ILUSTRAÇÕES

### CAPITULO 1

- FIGURA 1.1 - ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS PELO MÉTODO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO: DOS COMPONENTES EM RELAÇÃO AS PROPRIEDADES FÍSICAS (A) E QUÍMICAS (B); PROPRIEDADES FÍSICAS (C) E QUÍMICAS (D). .....51
- FIGURA 1.2 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS COMPONENTES USADOS NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS. DENSIDADE APARENTE (DAP) (A), POROSIDADE TOTAL (PT) (B), MACROPOROSIDADE (MACRO) (C), MICROPOROSIDADE (MICRO) (D), POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH) (E), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) (F), MAGNÉSIO (MG) (G), POTÁSSIO (K) (H), FÓSFORO (P) (I), CÁLCIO (CA) (J), NITROGÊNIO (N) (K), ENXOFRE (S) (L) E CARBONO (C) (M). .....52
- FIGURA 1.3 - ALTURA DE MUDAS DE E. BENTHAMII AOS 120 DIAS (A) E ANÁLISE DE AGRUPAMENTO PELO MÉTODO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO DOS SUBSTRATOS COM BASE NO CRESCIMENTO (B). CAC - CASCA DE ARROZ CARBONIZADA; C1- CARVÃO VEGETAL COM GRANULOMETRIA ENTRE 1- 3 MM, C2-CARVÃO COM GRANULOMETRIA ENTRE 3- 5 MM, FC- FIBRA DE COCO, CP- CASCA DE PINUS SEMIDECOMPOSTA, VF-VERMICULITA FINA, BIO- BIODISSÓLIDO E TF- TURFA.....57
- FIGURA 1.4 - REGRESSÃO POLINOMIAL PARA A ALTURA AOS 120 DIAS DE MUDAS DE E. BENTHAMII PRODUZIDAS EM SUBSTRATOS FORMULADOS A PARTIR DE DOIS COMPONENTES (VOLUME/VOLUME) EM DIFERENTES PROPORÇÕES. CASCA DE PINUS (CP), CASCA DE ARROZ CARBONIZADA (CAC), CARVÃO VEGETAL COM GRANULOMETRIA ENTRE 1-3 MM (C1), CARVÃO COM GRANULOMETRIA ENTRE 3-5 MM (C2), FIBRA DE COCO (FC), VERMICULITA FINA (VF), TURFA (TF) E BIODISSÓLIDO (BIO). CP/TF, CP/BIO, CP/BIO, CP/FC E CP/VF (A); CAC/ TF, CAC/BIO, CAC/FC, CAC/FC, CAC/FC, CAC/VF, CAC/CP (B); C1/TF, C1/BIO, C1/VF, C1/CP (C); C2/TF, C2/BIO, C2/VF, C2/TF (D); FC/VF (E). TRATAMENTOS TESTEMUNHA: SUBSTRATO COMERCIAL A BASE DE TURFA (SC1) E SUBSTRATO COMERCIAL A BASE DE CASCA DE PINUS SEMIDECOMPOSTA (SC2). .....58

## CAPITULO 2

FIGURA 2.1 - ESPECTROFOTÔMETRO FEMTO E CUBETA DE QUARTZO.....	72
FIGURA 2.2 - ESPECTROS DOS SUBSTRATOS OBTIDOS NO ESPECTROFOTÔMETRO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (A). ESPECTRO DE UM SUBSTRATO APÓS TRATAMENTO MATEMÁTICO (B).....	74
FIGURA 2.3 - COEFICIENTE DE ESTIMATIVA UTILIZADOS NO MODELO PLS PARA CADA COMPRIMENTO DE ONDA SELECIONADO. DENSIDADE APARENTE (A). POROSIDADE TOTAL (B). MACROPOROSIDADE (C). MICROPOROSIDADE (D). CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (E) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (F). .....	76
FIGURA 2.4 - VALORES DE REFERÊNCIA VERSUS OS PREDITOS PELO NIR NA VALIDAÇÃO EXTERNA. DENSIDADE APARENTE (A). POROSIDADE TOTAL (B). MACROPOROSIDADE (C). MICROPOROSIDADE (D). CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (E) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (F). .....	79

## CAPITULO 3

FIGURA 3.1 - OBTENÇÃO DOS ESPECTROS NO ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL (A) E ESPECTROFOTÔMETRO DE BANCADA (B). .....	90
FIGURA 3.2 - ESPECTROS DOS SUBSTRATOS OBTIDOS NO ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL (A) E DE BANCADA (B). .....	93
FIGURA 3.3 - COEFICIENTE DE REGRESSÃO UTILIZADOS NO MODELO PLS APÓS A SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPECTRAIS OBTIDOS COM O ESPECTROFOTÔMETRO DE BANCADA. POROSIDADE TOTAL (A) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (B). .....	95
FIGURA 3.4 - COEFICIENTE DE REGRESSÃO UTILIZADOS NO MODELO PLS APÓS A SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPECTRAIS OBTIDOS COM OS ESPECTROFOTÔMETROS MÓVEL E DE BANCADA. DENSIDADE APARENTE (A). MACROPOROSIDADE (B). MICROPOROSIDADE (C). CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (D). .....	96
FIGURA 3.5 - VALORES DE REFERÊNCIA VERSUS OS PREDITOS PELO NIR NA VALIDAÇÃO EXTERNA, UTILIZANDO OS ESPECTROFOTÔMETROS PORTÁTIL E DE BANCADA. DENSIDADE APARENTE (A), MACROPOROSIDADE (C), MICROPOROSIDADE (D) E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (D). .....	101
FIGURA 3.6 - VALORES DE REFERÊNCIA VERSUS OS PREDITOS PELO NIR, UTILIZANDO O ESPECTROFOTÔMETRO DE BANCADA. POROSIDADE TOTAL (A) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (B). .....	102

## INDICE DE APÊNDICES

APÊNDICE 1. 1 - MÉDIA (X), DESVIO PADRÃO (S) E CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS: ALTURA AOS 90 E 120 DIAS (H 90, H 120), DIÂMETRO DE COLO AOS 90 E 120 DIAS (D 90, D120), SOBREVIVÊNCIA DAS MUDAS (SOB) BIOMASSA SECA AÉREA (BSA), BIOMASSA SECA RADICIAL (BSR) DE MUDAS DE <i>E. BENTHAMII</i> . .....	107
APÊNDICE 1. 2 - ALTURA (H 90. H120), DIÂMETRO DE COLO (DC 90, DC 120), BIOMASSA SECA AÉREA (BSA) E BIOMASSA SECA RADICIAL (BSR) DE MUDAS DE <i>E. BENTHAMII</i> , PRODUZIDAS EM DIFERENTES SUBSTRATOS AOS 90 E 120 DIAS. ....	108
APÊNDICE 1. 3 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS OBTIDOS NA REGRESSÃO POLINOMIAL. MÉDIA (X), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (R <sup>2</sup> ), DESVIO PADRÃO (SXY), NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (A) COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV), QUADRADO MÉDIO (QM). .....	110
APÊNDICE 1. 4 - CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS E AS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DAS MUDAS DE <i>E. BENTHAMII</i> . ALTURA AOS 120 DIAS (H 120), DIÂMETRO DE COLO AOS 120 DIAS (D120), BIOMASSA SECA AÉREA (BSA), BIOMASSA SECA RADICIAL (BSR), DENSIDADE APARENTE (DA), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), PH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE), POTÁSSIO (K), CÁLCIO (CA), MAGNÉSIO (MG), FÓSFORO (P), NITROGÊNIO (N) E ENXOFRE (S). ....	111

## RESUMO GERAL

A demanda por mudas florestais de qualidade está em crescente expansão, devido ao aumento da área plantada, bem como a recomposição de ambientes degradados. Diante deste cenário, o substrato é um dos fatores de maior influência no crescimento das mudas. Os fatores intrínsecos que afetam o crescimento das plantas são suas propriedades físico-químicas, que variam em função de sua origem, método de produção e proporções dos seus componentes. Desta maneira analisar a viabilidade de diferentes formulações baseados em diferentes componentes é imprescindível. Diante disto, esta tese teve como objetivo geral verificar a influência das propriedades físicas e químicas de diferentes substratos no crescimento de mudas de *Eucalyptus benthamii*, bem como analisar a técnica da espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) para estimativa destas propriedades. Para tanto, o trabalho foi dividido em três capítulos: O capítulo 1 objetivou avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de uma série de materiais, com foco em resíduos agroindustriais, e a influência de suas propriedades físico-químicas no crescimento de mudas de *E. benthamii*, bem como verificar a semelhança entre os componentes testados através da análise de agrupamentos; o capítulo 2 objetivou avaliar a técnica NIRS para estimativa das propriedades físicas e químicas; e o capítulo 3 objetivou aferir a eficiência de dois espectrofotômetros NIRS, portátil e de bancada, para geração de modelos de estimativa das propriedades dos substratos. Como resultados, do capítulo 1, verificou-se maior influência das propriedades físicas em relação as químicas no crescimento das mudas, proporcionando maior crescimento os substratos com maior capacidade de retenção de água e os altos níveis de condutividade elétrica e pH não prejudicaram o crescimento das mudas. Em relação às propriedades físicas, formaram-se quatro grupos (G): G1- constituído por elementos de alta macroporosidade; G2- equilíbrio entre macro e microporos, G3- maior proporção de microporos e G4- alta densidade associada à alta microporosidade. Quanto às propriedades químicas, formaram 2 grupos: G2- maior fertilidade e G1 – menor fertilidade. O capítulo 2, comprovou a viabilidade técnica da espectroscopia no infravermelho próximo para a estimativa das propriedades físicas e químicas de substratos, apresentando valores aceitáveis de erros de estimativa. O capítulo 3 demonstrou a importância do espectrofotômetro na construção dos modelos de estimativa, sendo que apenas o equipamento de bancada apresentou-se viável para a estimativa de todas as propriedades dos substratos. O espectrofotômetro portátil proporcionou a construção de modelos com maior precisão para as propriedades: densidade aparente, macro e microporosidade. Em contrapartida para a porosidade total, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica, obteve-se melhores resultados com a utilização do espectrofotômetro de bancada.

**Palavras-chave:** mudas florestais; espectroscopia no infravermelho próximo; regressão dos mínimos quadrados parciais; espectrofotômetros.

## ABSTRACT

The demand for quality forest seedlings is becoming increasingly widespread, due to increased planted area and the restoration of degraded environments. In this scenario, the substrate is one of the most influential factors in the growth of seedlings. Intrinsic factors that affect plant growth are its physical and chemical properties, which vary according to their origin, production method and proportions of its components. Thus analyzing the feasibility of different formulations based on different components is essential. Based on this, this thesis aimed to investigate the influence of physical and chemical properties of different substrates for the growth of seedlings of *Eucalyptus benthamii* and analyze the spectroscopy technique in the near infrared (NIRS) to estimate these properties. Therefore, the work was divided into three chapters: Chapter 1 objective of evaluating the technical and economic feasibility of using a range of materials, focusing on agro-industrial residues, and the influence of their physical and chemical properties on the growth of *E. benthamii* seedlings and verify the similarity of the tested components by cluster analysis; Chapter 2 aimed to evaluate the NIRS technique to predict the physical and chemical properties; and Chapter 3 aimed to assess the efficiency of two spectrophotometers NIRS, portable and table for generating predictive models of the substrate properties. As a result, the chapter 1, there was a higher influence of the physical properties regarding the chemical on the growth of seedlings, providing greater growth substrates with higher water holding capacity and high levels of electrical conductivity and pH did not harm the growth of seedlings. Regarding the physical properties, four groups were formed (G): G1 consists of high macroporosity elements; G2 balance between macro and micropores, G3 higher proportion of micropores and G4 high density associated with high microporosity. As for the chemical, formed two groups: higher fertility and lower fertility. The Chapter 2, proved the technical feasibility of near infrared spectroscopy to estimate the physical and chemical properties of substrates, with acceptable values of prediction errors. The Chapter 3 demonstrated the importance of spectrophotometer in the construction of prediction models, and only the table equipment had to be feasible to estimate all the properties of the substrates. The portable spectrophotometer provided the designs with greater precision for the properties: bulk density, macro and microporosity. In contrast to the total porosity, hydrogen potential and electrical conductivity, we obtained better results using the table spectrophotometer.

**Keywords:** Forest seedlings. Partial Least Squares. Near infrared spectroscopy. Spectrophotometers.

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Segundo dados apresentados pela ABRAF (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, 2013), a área plantada de *Eucalyptus* no Brasil, vem crescendo ano após ano, devido a investimentos de empresas nacionais do segmento de Papel e Celulose. O atendimento da demanda por mudas do gênero *Eucalyptus* faz-se principalmente por meio da clonagem, entretanto, as espécies subtropicais, cultivadas no sul do Brasil, apresentam baixos índices de enraizamento adventício (XAVIER *et al.*, 2013; ASSIS; MAFIA, 2007, p. 102). Segundo Brondani *et al.* (2014, p. 150) o percentual médio de enraizamento do *Eucalyptus benthammi* é de 43,5%, sendo considerada uma espécie de difícil enraizamento, justificando a produção de mudas via seminal, a fim de atender a demanda por mudas desta espécie (SCHULTZ *et al.*, 2012, p. 94; KRATZ *et al.*, 2013b, p. 608).

As mudas devem apresentar boa qualidade, a fim de evitar perdas por mortalidade e baixo incremento após o plantio, aliado a redução dos tratos culturais aplicados ao povoamento, devido à redução da competição com as plantas invasoras, promovida pelo maior crescimento inicial da cultura de interesse (FIGUEIREDO *et al.*, 2011, p. 5). Nesse sentido, muitos esforços têm sido realizados para melhorar a qualidade e reduzir os custos de produção das mudas e dentre os fatores que influenciam está o substrato, o qual possui como funções a sustentação da muda e fornecimento de água e nutrientes necessários para o crescimento da planta (HARTMANN *et al.*, 2011, p. 78).

A maioria dos substratos utilizados no mercado apresenta grande oferta apenas em locais específicos no país, aumentando, dessa forma, o seu custo quando transportados para regiões mais distantes (KRATZ *et al.*, 2013 a, p. 1104). A utilização de substratos com baixo custo aliada a formação de mudas com padrão morfológico superior às demais, resulta na redução do ciclo de produção e num menor dispêndio econômico (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 98). O uso de resíduos regionais reduz substancialmente o custo do substrato, embora os custos possam sofrer variações em função da disponibilidade de cada material (MELO *et al.*, 2014, p. 237; WENDLING *et al.*, 2007, p. 212).

Os fatores intrínsecos dos substratos que afetam o crescimento das plantas são suas propriedades físico-químicas, que variam em função de sua origem, método

de produção e proporções dos seus componentes, denotando a importância de realizar a análise de suas características (WENDLING *et al.*, 2007; KRATZ *et al.*, 2013c.; MELO *et al.*, 2014, p. 239). Atualmente a análise das propriedades físico-químicas de substratos é regida pela instrução normativa nº 17 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007). Contudo este processo é demorado e dispendioso e, desta maneira o uso da espectroscopia no infravermelho próximo (*near infrared spectroscopy* - NIR) pode ser uma alternativa viável.

A técnica de obtenção de modelos de estimativa usando NIR consiste na aquisição de espectros de absorção ou reflexão e na correlação dos mesmos com os resultados das propriedades mensuradas convencionalmente, gerando modelos estatísticos que poderão ser utilizados em estimativas (WILLIAMS; NORRIS, 2001; PASQUINI, 2003, p. 212). A expectativa de bons resultados é devida a conhecida precisão do NIR para estimativa de propriedades químicas de solos, como nitrogênio, carbono e CTC (GENOT *et al.*, 2011, p. 132), bem como, na determinação dos teores de areia, silte e argila (CURCIO *et al.*, 2013, p. 498). Contudo não existem estudos referentes a determinação das propriedades físico-químicas de substratos.

Diante do exposto, este estudo objetivou avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de diversos materiais para formulação de substratos e a influência de suas propriedades físico-químicas na produção de mudas de *E. benthamii*, bem como, verificar a técnica NIR para estimativa expedita e barata das propriedades físico-químicas de substratos através de dois espectrofotômetros. Para tanto a tese está dividida em três capítulos, sendo eles:

Capítulo 1: Propriedades físico-químicas e formulação de substratos para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*.

Capítulo 2: Estimativa das propriedades físico-químicas de substratos para produção de mudas por meio da espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS).

Capítulo 3: Espectrofotômetros NIRS portátil e de bancada para estimativa de propriedades físico-químicas de substratos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage

As espécies de eucalipto economicamente importantes para as condições mais frias do Brasil constituem um grupo muito restrito, e dentre estas, o *Eucalyptus benthamii* e o *E. dunnii* apresentam boa aptidão, principalmente no que se refere a produção de madeira para fins energéticos e sólidos madeiráveis (PALUDZYSZYN FILHO *et al.*, 2006, p. 9). *E. benthamii* é a principal espécie do gênero, recomendada para plantios em áreas com incidência severa de geadas (SILVA *et al.*, 2012a., p. 21). Por ser uma espécie de clima subtropical, apresenta-se como boa alternativa na composição de híbridos resistentes ao frio (ASSIS; MAFIA, 2007, p. 102; ASSIS; SANTOS, 2012, p. 61).

A produção de mudas do gênero *Eucalyptus* é feita principalmente por meio da clonagem, a qual procura garantir a manutenção das características da planta-matriz selecionada e a implantação de talhões uniformes de elevada produtividade, incluindo resistência a doenças (XAVIER *et al.*, 2013; p. 19). Espécies indicadas para o plantio em regiões subtropicais apresentam baixos índices de enraizamento, devido à recalcitrância aos processos rizogênicos em comparação as espécies tropicais (ASSIS; MAFIA, 2007, p. 102). Segundo Brondani *et al.* (2014, p. 150) o percentual médio de enraizamento do *E. benthamii* é de 43,5%, sendo considerada uma espécie de difícil enraizamento, justificando a produção de mudas via seminal, a fim de atender a demanda por mudas desta espécie (SCHULTZ *et al.*, 2012, p. 94; KRATZ *et al.*, 2013b, p. 608).

### 2.2 QUALIDADE DE MUDAS

Os critérios para a classificação da qualidade de mudas baseiam-se na redução da mortalidade após o plantio e na diminuição dos tratamentos culturais aplicados ao povoamento, devido a redução da competição com as plantas invasoras,

promovida pelo maior crescimento inicial da cultura de interesse (CARNEIRO, 1995, p. 57; FIGUEIREDO *et al.*, 2011, p. 2). A qualidade de uma muda pode ser avaliada através da mensuração da altura da parte aérea, diâmetro de colo, do desenvolvimento do sistema radicial, lignificação do caule e material genético (CARNEIRO, 1995, p. 57; PEZZUTTI *et al.*, 2011, p. 356), além de variáveis qualitativas para avaliação da qualidade do torrão, como a facilidade de retirada do tubete e agregação das raízes ao substrato (WENDLING *et al.*, 2007, p. 215). Dentre os parâmetros utilizados, a relação altura/massa da parte aérea é o índice que apresenta maior contribuição relativa na qualidade de mudas (43,98 %), seguida da altura da parte aérea (32,34%), conforme observado no crescimento inicial em campo em mudas de *Eucalyptus grandis* (GOMES *et al.*, 2002, p. 662).

A altura mínima recomendada para o plantio em campo, para as diversas espécies de *Eucalyptus*, é de no mínimo 15 cm (WENDLING; DUTRA, 2010, p. 43), porém tem-se observado correlação positiva entre o tamanho da muda no momento do plantio e o crescimento inicial em campo. Figueiredo *et al.* (2011, p. 5) verificaram maior crescimento inicial em campo de mudas de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* com maiores alturas (21 – 40 cm) e diâmetro (1,1-4,0 mm), quando comparado a classes inferiores (10 -20 cm e 1,5 – 3,0 mm), contudo após 12 meses as diferenças desapareceram.

Mudas com padrões inferiores podem apresentar bom desenvolvimento em sítios bons e adequadas condições climáticas, principalmente em relação a pluviosidade. Em geral, quando o status fisiológico é igual, as mudas maiores crescem melhor, mas usualmente não sobrevivem tão bem quanto as de menor tamanho, em locais com maior adversidade ambiental (PEZZUTTI *et al.*, 2011, p. 360). Desta maneira, denota-se maior importância da qualidade de mudas aos sítios ruins (GOMES *et al.*, 2002, p. 656).

### 2.3 SUBSTRATOS

A principal função do substrato é sustentar a muda e fornecer condições adequadas para o desenvolvimento e funcionamento do sistema radicial, assim como os nutrientes necessários ao desenvolvimento da planta. Deve ser isento de sementes

de plantas invasoras, pragas e fungos patogênicos, evitando-se assim a necessidade de sua desinfestação (HARTMANN *et al.*, 2011, p. 78).

O tipo de material e a proporção de cada um na composição do substrato variam de acordo com a disponibilidade local, custo e tipo de muda a ser produzida (WENDLING *et al.*, 2006, p. 16). Conforme observado por Melo *et al.* (2014, p. 239), mudas de *Eucalyptus grandis* apresentaram crescimento satisfatório em substratos a base de esterco bovino, enquanto que para *Eremanthus erythropappus* observou-se baixo crescimento e alta mortalidade. Kratz *et al.* (2013c., 534) verificaram que a adição de bio-sólido à casca de arroz carbonizada, ocasionou crescimento adequado e inadequado, para as espécies *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*, respectivamente. Desta maneira, deve-se lembrar que a formulação deverá ser avaliada nas condições de cada local de produção e devidamente ajustada, caso haja necessidade.

Os fatores intrínsecos dos substratos que afetam o crescimento das plantas, são suas propriedades físicas e químicas, que variam em função de sua origem e proporções dos seus componentes, denotando a importância de realizar a análise de suas características (WENDLING *et al.*, 2006, p. 16). O tipo de material e a proporção de cada um na composição do substrato variam de acordo com a disponibilidade local, custo e tipo de muda a ser produzida (GONÇALVES; POGGIANI, 1996, p. 5). E ainda deve-se lembrar que a formulação deverá ser testada nas condições de cada local de produção e devidamente ajustada, caso haja necessidade (WENDLING *et al.*, 2006, p. 13).

### 2.3.1 Propriedades Físicas

As propriedades físicas de um substrato são mais importantes do que as químicas, tendo em vista que as últimas podem ser corrigidas pelo viveirista por meio do suprimento dos nutrientes via adubações (GOMES; PAIVA, 2004; CARNEIRO, 1995; p. 248). Dentre as propriedades físicas, cita-se a densidade aparente, porosidade total, macro e microporosidade.

Densidade aparente é a massa do substrato por unidade de volume ocupada pelo mesmo (CARNEIRO, 1995, p. 256), indicando o peso do substrato, fator

considerado importante para o transporte, manipulação dentro do viveiro e ainda na estabilidade das plantas (MARTÍNEZ, 2002, p. 56). A densidade apresenta correlação positiva com a microporosidade e negativa com a porosidade total e macroporosidade, denotando que substratos densos apresentam maior capacidade de retenção de água, como biossólido e casca de pinus semidecomposta (KRATZ *et al.*, 2013a., p. 1107; CALDEIRA *et al.* 2014, p. 198). Contudo, existem materiais leves com alta capacidade de retenção de água, como vermiculita e fibra de coco (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 95).

Fatores como a pressão aplicada no momento do preenchimento dos recipientes, umidade nas partículas e o efeito da irrigação podem modificar a densidade, através da compactação, promovendo a redução da porosidade total, prejudicando o crescimento radicial das mudas, devido a impedância mecânica (DE BOODT; VERDONCK, 1972, p. 39; FERRAZ *et al.*, 2005, p. 212).

Porosidade de um substrato são os espaços ocupados por água, ar e raízes e sua quantidade é determinada pelo arranjo das partículas sólidas (CARNEIRO, 1995, p. 253). É de fundamental importância para o crescimento das plantas, pois as raízes formadas nos recipientes exigem elevado fornecimento de oxigênio e remoção do gás carbônico formado. Desta forma o substrato deve ser suficientemente poroso, a fim de permitir trocas gasosas eficientes, evitando falta de ar para a respiração das raízes e para a atividade dos microrganismos no meio (KÄMPF, 2005, p. 48).

O volume de água retido no substrato na tensão 0 hPa (totalmente saturado) define a porosidade total (PT) e a tensão 10 hPa determina o volume de ar presente após cessar a livre drenagem. Assim, a diferença entre a PT do substrato e o volume de água retido a 10 hPa corresponde ao espaço de aeração ou macroporosidade (DE BOODT; VERDONCK, 1972, p. 39, 40).

A capacidade de retenção de água divide-se entre água facilmente disponível (volume de água liberado entre 10 hPa e 50 hPa de tensão), água tamponante (volume de água liberado entre 50 hPa e 100 hPa de tensão) e água remanescente (volume de água que permanece no substrato depois de aplicada a tensão de 100 hPa) (DE BOODT; VERDONCK, 1972, p. 39, 40). A sua determinação é importante na medida em que informa o volume de água disponível às plantas dentro de cada faixa de tensão em uma determinada amostra (SPIER *et al.*, 2008, p. 2).

Os substratos, em geral, têm maior porosidade quando comparados com o solo, pois a maioria dos materiais utilizados tem poros internos além daqueles

externos, formados entre as partículas, possuindo também maior percentual de poros com maior dimensão. Os poros internos presentes em alguns substratos podem estar fechados, sem contato com o meio externo, não interferindo na porosidade, ou então estarem abertos, como ocorre nos materiais orgânicos, formando uma rede de canais com o meio externo (FERMINO, 2002, p. 32).

O tamanho das partículas tem influência determinante sobre o volume de água e ar do substrato (SCHMITZ *et al.*, 2002, p. 942). Altas proporções de partículas maiores tornam o meio com grande espaço de aeração, enquanto partículas menores fecham os poros, aumentando a capacidade de retenção de água (MARTÍNEZ, 2002, p. 57; FERMINO, 2003, p. 48).

A capacidade de retenção de água do substrato tem repercussão direta no regime de irrigação. Substratos com menor capacidade de retenção de água exigem menor intensidade e maior frequência de irrigação. Em lado oposto, os substratos com alta capacidade de retenção, necessitam de menor número de irrigações, principalmente no inverno, quando a taxa de transpiração é menor (WENDLING *et al.*, 2006, p. 23; GONÇALVES *et al.*, 2000, p. 318; LOPES *et al.*, 2007, p. 836).

Materiais leves, como a casca de arroz carbonizada, elevam a macroporosidade das misturas reduzindo a capacidade de retenção de água do substrato (GONÇALVES *et al.*, 2000, p. 321; GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004, p. 1073). Em contrapartida, alguns materiais leves, como a vermiculita e fibra de coco, apresentam alta capacidade de retenção de água, devido a existência de poros internos (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 95; KRATZ *et al.*, 2013a., p. 1106).

Os diferentes resultados de retenção de água indicam a necessidade de manejos hídricos específicos para cada composição de substrato (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 99). Conforme observado por Lopes *et al.* (2007, p. 836) em mudas de *E. grandis* produzidas em dois substratos comerciais submetidos a diferentes laminas de irrigação, comprovando que o crescimento da planta está associado ao substrato e ao regime de irrigação a ele aplicado.

### 2.3.2 Propriedades Químicas

As propriedades químicas de um substrato são influenciadas pela disponibilidade de nutrientes minerais presentes, os quais influenciam no crescimento e desenvolvimento das mudas (CARNEIRO, 1995, p. 259) e variam com os constituintes, sendo, em geral, adequadas nos substratos comerciais, devido a prévia correção (FERRAZ *et al.*, 2005, p. 213). Como propriedades químicas, cita-se o potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica, nutrientes minerais e matéria orgânica.

O potencial hidrogeniônico (pH), indica a acidez ou a alcalinidade relativa da solução aquosa diluída no substrato. A importância do seu conhecimento está no fato de se relacionar diretamente a disponibilidade de nutrientes e as propriedades fisiológicas das plantas (KÄMPF, 2005, p. 50). Substratos com pH abaixo de 5,0 podem ocasionar deficiência de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e boro para as plantas, enquanto que em pH acima de 6,5 são esperadas deficiências de fósforo, ferro, manganês, zinco e cobre (VALERI; CORRADINI, 2000, p. 174). Contudo, espécies do gênero *Eucalyptus* têm mostrado tolerância às variações desse índice, conforme observado por Kratz *et al.*, (2013 b., p. 616) em mudas de *E. benthamii* produzidas em substratos com distintos pH (5,5 a 9,1), proporcionando crescimento adequado em todos os substratos, e por Oliveira Junior *et al.* (2011, p. 1175) trabalhando com *E. urophylla* com pH variando de 7,5 a 7,9.

Os valores de pH variam conforme a origem do material na formulação do substrato, assim como da maneira do preparo. Na casca de arroz carbonizada, por exemplo, quanto maior o tempo de carbonização, maior será o pH, devido ao aumento dos teores de óxidos (BAITELL *et al.*, 2008, p. 3).

A condutividade elétrica (CE) refere-se concentração de sais ionizados na solução e fornece um parâmetro da estimativa da salinidade do substrato (KÄMPF, 2005, p. 58). Os valores adequados da condutividade elétrica do substrato variam entre espécies, cultivares e clones. Em geral, para as espécies florestais, ela deve estar entre 1,5 a 3,0 mS cm<sup>-1</sup>. Os altos valores de condutividade elétrica, representados por níveis altos de salinidade, podem danificar as raízes e os pelos radiculares, impedindo a absorção de água e nutrientes, afetando a atividade fisiológica e favorecendo a incidência e a severidade de alguns patógenos (RODRIGUES, 2002).

A salinidade refere-se ao teor de constituintes inorgânicos presentes no substrato capazes de se dissolver em água. Esses constituintes inorgânicos referem-

se a todos os íons, nutrientes e não-nutrientes. A sensibilidade a salinidade varia entre as espécies e a idade da planta, sendo que quanto mais jovem maior a sensibilidade (KÄMPF, 2005, p. 58).

Segundo Fermino (2002, p. 51) a salinidade de substratos é expressa como o teor total de sais solúveis (TTSS), que expressa a concentração de sais em determinado volume de substrato. Desta forma em substratos não basta observar a condutividade elétrica, mas considerar a densidade do material (FERMINO, 2002, p. 51). Para o mesmo valor de condutividade elétrica, maior será a salinidade, quanto maior for a densidade do material (FERMINO, 2002, p. 51).

Algumas espécies do gênero *Eucalyptus* têm sido consideradas tolerantes à salinidade. Conforme verificado por Mendonça *et al.* (2010, p. 261), mudas de *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* e *E. robusta* apresentaram-se resistentes a salinidade até a condutividade elétrica de  $8,33 \text{ dS m}^{-1}$ , observando que a mesma não provocou redução no teor de clorofila, fator importante em plantas sensíveis a salinidade. Kratz *et al.* (2013 b., p. 616) observaram crescimento adequado de *E. benthamii* em substratos com CE variando de 0,1 a 2,6 mS/cm.

A matéria orgânica é um dos componentes fundamentais dos substratos, cuja finalidade básica é aumentar a capacidade de retenção de água e nutrientes, reduzir a densidade aparente e aumentar a porosidade total (CARNEIRO, 1995, p. 264; TRIGUEIRO, 2002, p. 8). Favorece o desenvolvimento de microrganismos benéficos, decompositores, aumentando a disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo da produção, pH e a capacidade de troca catiônica (CTC) (WENDLING; GATTO, 2002, p. 16; GONÇALVES; POGGIANI, 1996, p. 6).

A utilização de substratos orgânicos para produção de mudas de *Eucalyptus* tem-se mostrado viável, devido a maior capacidade de retenção de água e nutrientes, conforme observado com a utilização de biossólido nas espécies *E. grandis* e *E. benthamii* (GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004, p. 1073, 1074; TRIGUEIRO; GUERRINI, 2004, p. 156; KRATZ *et al.*, 2013c., p. 534); composto orgânico de resíduo agroindustrial para produção de *E. grandis* (SILVA *et al.*, 2014, p. 611) e maior crescimento de *E. grandis* nos substratos contendo esterco de curral curtido, em relação a casca de arroz carbonizada, vermiculita e fibra de coco (MELO *et al.*, 2014, p. 239).

### 2.3.3 Tipos de substratos

Os substratos para a produção de mudas podem ser formados por um único material ou pela combinação de diferentes tipos de materiais; podem ser montados no viveiro ou comprados prontos. Cabe ressaltar, que as propriedades químicas e físicas da mistura resultante não são sempre iguais à soma das suas partes (HANDRECK; BLACK, 1994; REED, 1996).

A maioria dos substratos utilizados atualmente apresentam oferta apenas em locais específicos no país, aumentando o custo quando transportados para regiões mais distantes (KRATZ *et al.*, 2013 a, p. 1104). A utilização de substratos com baixo custo aliada a formação de mudas com padrão morfológico superior às demais, resulta na redução do ciclo de produção e num menor dispêndio econômico (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 99).

O uso de resíduos regionais reduz substancialmente o custo do substrato, embora possam sofrer variações em função da disponibilidade de cada material (MELO *et al.*, 2014, p. 240; WENDLING *et al.*, 2007, p. 212). A disponibilidade dos produtos é um fator a ser levado em consideração, pois o mesmo deve ser abundante para conseguir atender a demanda na produção.

Uma série de materiais podem ser usados como substrato, sendo estes renováveis ou orgânicos e não renováveis ou minerais. Em relação aos substratos comercializados no Brasil, a maioria são constituídos por compostos orgânicos, os quais, mesmo de forma lenta, continuam o processo de decomposição após serem embalados e rotulados (ABREU *et al.*, 2012, p. 107).

#### 2.3.3.1 Componentes renováveis

Dentre os componentes renováveis com aptidão técnica comprovada em diversos trabalhos e utilizados nesta pesquisa, cita-se: biossólido, casca de arroz carbonizada, casca de pinus semidecomposta, fibra de coco e moinha de carvão.

Biossólido ou lodo de esgoto, refere-se a parte sólida do esgoto, após seu tratamento e estabilização (ASSENHEIMER, 2009, p. 326) e o uso na agricultura está

condicionado aos critérios e procedimentos definidos na resolução do CONAMA - 375/2006 (BRASIL 2006). Uma das utilizações deste resíduo urbano, compreende o fornecimento de matéria orgânica na composição de substratos para mudas florestais, apresentando teores razoáveis de nutrientes, com destaque para nitrogênio (N) e fósforo (P), aliado a alta capacidade de retenção de água (GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004, p. 1070).

A utilização de biossólido na agricultura é tida como uma alternativa promissora para disposição final deste resíduo, em razão que altos volumes deste produto são produzidos, representando um passivo ambiental (CAMARGO *et al.*, 2010, p. 1305). Apesar de apresentar viabilidade técnica na produção de mudas de espécies florestais de importância econômica, como *E. grandis* (CALDEIRA *et al.*, 2014, p. 202), *E. benthamii* (KRATZ *et al.*, 2013b, p. 534) e *Tectona grandis* (GOMES *et al.*, 2013, p. 126), observa-se grande resistência, por parte dos viveiristas, para o uso deste componente em seu sistema produtivo. Em contrapartida, para algumas espécies, o biossólido proporcionou crescimento inadequado das plantas, quando inserido na formulação do substrato, como *Mimosa scabrella* (KRATZ *et al.*, 2013 c., p. 534), *Jatropha curcas* (CAMARGO *et al.*, 2010, p.1307) e *Ateleia glazioveana* (CALDEIRA *et al.*, 2012, p. 18).

Dentre os resíduos agrícolas com maior aptidão e aceitação, encontram-se a casca de arroz carbonizada e a fibra de coco, ambas com produção restrita a certas regiões. A casca de arroz, resíduo encontrado nas regiões produtoras de arroz, vem sendo utilizada como componente de substratos, após passar pelo processo de carbonização, combinada com outros elementos, como fibra de coco, vermiculita e casca de pinus (SILVA *et al.*, 2012 b., p.298; KRATZ *et al.*, 2012 a, p. 1106).

A alta macroporosidade da casca de arroz carbonizada é uma característica importante quando se deseja aumentar a porosidade total do substrato, proporcionando maior drenagem da água de irrigação e uma melhor aeração do sistema radicial da muda (COUTO *et al.*, 2003, p. 125). Em contrapartida, cita-se como desvantagem a baixa capacidade de retenção de nutrientes, implicando numa necessidade maior na concentração da solução de adubação ou frequência de aplicação (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 95).

A fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) origina-se do desfibramento industrial da casca de coco (NOGUERA *et al.*, 2000, p. 281). Trata-se de um material vegetal, renovável, muito leve e parecido com as melhores turfas de *Sphagnum* spp.

encontradas no Norte da Europa e América do Norte (ROSA *et al.*, 2002, p. 12; NOGUERA *et al.*, 2000, p. 280).

O uso da fibra de coco é uma alternativa para a produção de substratos, sendo de fácil obtenção e baixo custo, nas regiões produtoras, por ser um resíduo da exploração comercial da água de coco (CALDEIRA *et al.*, 2014, p.196). Seu uso como substrato é indicado, principalmente, por apresentar uma estrutura física vantajosa, proporcionando alta porosidade e alto potencial de retenção de umidade, e por ser biodegradável (ROSA *et al.*, 2002, p. 13). Apresenta ainda alta estabilidade física, pois se decompõe muito lentamente, devido principalmente a alta porcentagem de lignina (35-54%) e de celulose (23 - 43%) e uma pequena quantidade de hemicelulose (3 - 12%), que é a fração vulnerável ao ataque de microrganismos (NOGUERA *et al.*, 2000, p. 285).

O desenvolvimento do setor florestal teve como consequência a geração de um grande volume de subprodutos, dentre eles a casca de pinus, a qual passou a ser utilizada como substrato para produção de mudas, após ser semidecomposta, seca e moída. A utilização de composto orgânico de casca de *Pinus* spp., como meio de crescimento das mudas, permite utilizar um resíduo orgânico resultante da colheita florestal (KRATZ *et al.*, 2013 a., p. 1104). Atualmente, destaca-se a baixa oferta de casca de *Pinus* para fabricação de substratos, devido à competição com o mercado de energia e a diminuição de plantios deste gênero no Brasil (ABRAF, 2013).

A casca de pinus semidecomposta, como substrato para produção de mudas vem sendo amplamente utilizada e sua viabilidade técnica foi comprovada em diversos trabalhos de pesquisa. *Mimosa scabrela* e *E. benthamii* (KRATZ *et al.*, 2013c., p. 534), *Ilex paraguariensis* (BRONDANI *et al.*, 2007, p. 266; WENDLING *et al.*, 2007, p. 265), *Archantophoenix alexandrae* e *Bactris gasipaes* (MARTINS FILHO *et al.*, 2007, p. 84) e *E. grandis* (NOGUEIRA *et al.*, 2014, p. 531). Em contrapartida, este substrato não apresentou-se como o mais adequado para produção de *E. dunnii* (KRATZ; WENDLING, 2013, p. 129) e *E. grandis* (OLIVEIRA *et al.*, 2008, p. 126). Sugere-se que os diferentes resultados observados referem-se a diferentes padrões de decomposição da matéria prima, influenciando diretamente nas propriedades físico-químicas e por consequência no crescimento das plantas.

As propriedades físicas e químicas do substrato a base de casca de pinus apresentam grandes variações, o que está diretamente ligado a maneira de preparo do mesmo (WENDLING *et al.*, 2007, p. 212; SCIVITTARO *et al.*, 2007, p. 17; KRATZ;

WENDLING, 2013, p. 131). Esta variação tem repercussão direta no crescimento das plantas (GRAVE *et al.*, 2007, p. 293).

Outro resíduo florestal, com notável potencial de utilização como substrato é a moínha de carvão, subproduto da fabricação de carvão e de fornos que utilização madeira como combustível de caldeiras. Devido a sua alta porosidade e capacidade de retenção de água, aliada a estabilidade física apresenta potencial de utilização como componente de substrato (ZANETTI *et al.*, 2003, p. 508; JULIO, 2013, p. 43).

Denota-se a expressiva produção deste resíduo, haja vista que 23.533.724 m<sup>3</sup> de madeira de eucalipto são utilizadas para produção de carvão no Brasil, representando 15 % da área de florestas plantadas, sendo o estado de Minas Gerais o principal produtor (80%) (ABRAF, 2013, p. 90). Cabe ressaltar, a presença de pequenas e médias carvoarias em todo o território nacional, não registradas na ABRAF, tendo como principal finalidade o uso residencial e comercial.

#### 2.3.3.2 Componentes não renováveis

Turfa e vermiculita estão entre os componentes mais utilizados na produção de mudas florestais e agrícolas. A turfa é um sedimento orgânico, formado a partir da decomposição parcial da matéria vegetal em um ambiente úmido, ácido e de pouca oxigenação (PETRONI *et al.*, 2000, p. 477). São encontrados dois tipos de turfas, a vermelha e a preta, sendo que a principal diferença está no seu grau de decomposição. Como consequência a turfa preta apresenta maior densidade aparente (0,2-0,5 g cm<sup>-3</sup>) e capacidade de retenção de água, quando comparada com a vermelha (0,09 g cm<sup>-3</sup>) (MARTÍNEZ, 2002, p. 56; KÄMPF, 2005, p. 61).

A principal desvantagem da turfa é o impacto ambiental, por se tratar de um material natural não renovável, apesar de apresentar grandes reservas no mundo (CALDEIRA *et al.*, 2011, p. 80). Aliada a proibição de importação temporária de turfa do Canadá, principal fornecedor de matéria prima (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA, 2013).

A vermiculita é um mineral na forma de mica expandida, obtida através do aquecimento desta rocha à temperaturas superiores a 1000 °C, de modo que sua grade cristalina (2:1) se expande, resultando num produto leve, macio, estéril, com

boa disponibilidade de magnésio e potássio, pH em água  $\geq 6,5$ , capacidade de troca catiônica ( $109 \text{ mmolc dm}^{-3}$ ) e  $160 \text{ Kg m}^{-3}$  de densidade (GONÇALVES; POGGIANI, 1996, p. 4). É um mineral praticamente inerte, de estrutura variável, muito leve, constituído de lâminas ou camadas justapostas, com grande aeração, alta capacidade de troca catiônica e retenção de água. Sua presença na constituição do substrato promove aumento de retenção de água (FERRAZ *et al.*, 2005, p. 211).

#### 2.3.4 Análise físico-químicas

A análise de substratos para plantas é regida pela instrução normativa nº 17 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007), através da qual obtém-se os parâmetros: umidade, densidade aparente, capacidade de retenção de água, condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico e capacidade de troca catiônica.

Destaca-se que para a comercialização de substratos, a empresa deve apresentar no rótulo do produto, obrigatoriamente, todas as propriedades citadas anteriormente, excetuada a capacidade de troca catiônica, a qual é facultativa. Cabe ressaltar que a análise deverá ser realizada por Laboratórios Oficiais e Credenciados, os quais estão relacionados no site do MAPA.

Ao se referir aos parâmetros macro e micronutrientes e matéria orgânica, não existe um padrão de avaliação, entretanto tem-se utilizado, para fins de pesquisa, as metodologias de análise de solos e tecido vegetal (TRAZZI *et al.*, 2012, p. 457; KRATZ *et al.*, 2013a, p.1105).

#### 2.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)

A espectroscopia no infravermelho próximo (*near infrared spectroscopy* - NIR) corresponde a uma faixa do espectro da radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 800 e 2.500 nm (equivalente a  $4.000 - 12.500 \text{ cm}^{-1}$ , em números de onda) (BURNS; CIURCZAK, 2008, p. 17). O princípio de funcionamento do equipamento, espectrofotômetro de infravermelho próximo, baseia-se na emissão de

luz infravermelha sobre a amostra que, após interagir com as moléculas do material, é refletida em todas as direções e medida por detectores (SANTOS *et al.*, 2010, p. 102). A intensidade de radiação que é refletida da superfície da amostra e analisada como uma função de comprimento de onda é usualmente apresentada como espectro de reflectância (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 867).

Os espectros de reflectância obtidos são correlacionados com os resultados das análises laboratoriais convencionais, ajustando-se modelos estatísticos que explicam a correlação existente entre as informações contidas no espectro e os valores reais (WILLIAMS; NORRIS, 2001; PASQUINI, 2003, p. 212). Para a caracterização de uma amostra desconhecida, basta a obtenção do seu espectro e o uso do modelo estatístico, previamente construído, para a estimativa ou classificação de suas propriedades (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 867).

Diversos são os espectrofotômetros NIR existentes no mercado, os quais podem variar quanto a faixa espectral analisada, resolução espectral, tempo de varredura, modo de leitura e mobilidade (portátil e fixo) (MILAGRES *et al.*, 2013, p. 1167; HEIN *et al.*, 2009 a., p. 122; MAZUR *et al.*, 2014, p. 370). Dentre os equipamentos fixos ou de bancada, encontra-se o equipamento brasileiro, utilizado neste estudo, FEMTO NIR 900, que obtém espectros no intervalo de 1.100 a 2.500 nm com uma resolução espectral de 1 nm, totalizando 1400 valores de absorbância, realizando a varredura em 70 segundos (LAZZAROTTO *et al.*, 2014, p. 3). Cita-se também o espectrofotômetro portátil Thermo modelo MicroPhazir PC, que realiza a leitura dos espectros num intervalo de 1526 a 2336 nm e resolução espectral de 8 nm, totalizando 100 valores de absorbância coletados em apenas 3 segundos, apresentando como vantagens a possibilidade de ser transportado até a localidade das amostras e facilidade de manuseio, por se tratar de um equipamento portátil (THERMO SCIENTIFIC, 2015).

A espectroscopia no infravermelho próximo vem sendo utilizada como um método de análise não destrutiva, de materiais como madeira e solos (FIDÊNCIO *et al.*, 2002; ANDRADE *et al.*, 2010; GENOT *et al.*, 2011; MILAGRES *et al.*, 2013). Sendo um método de análise não-destrutivo, o NIR ganhou interesse nas últimas décadas, por permitir o acompanhamento contínuo de propriedades físicas e mecânicas de vários materiais, como aço, concreto e madeira (ANDRÉ *et al.*, 2006, p. 1879). Esta técnica está presente em praticamente todas as áreas, devido ao nível de desenvolvimento que esta tecnologia atingiu nos últimos anos. Os setores de maior

utilização da técnica incluem áreas como agrícola, médica, têxtil, cosméticos, polímeros, tintas, ambiental, petroquímica, farmacêutica e florestal (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 866).

Várias pesquisas, referentes ao NIR, vêm sendo realizadas, apresentando resultados satisfatórios. Dentre elas, cita-se a determinação de silício e nitrogênio foliar em cana de açúcar (SANTOS *et al.*, 2010, p. 106), teor de sólidos solúveis (BRIX) e açúcares polarizáveis (POL) em cana-de-açúcar (VALDERRAMA *et al.*, p. 264); densidade da madeira (HEIN *et al.*, 2009, p. 138; LAZZAROTTO *et al.*, 2014, p. 4), lignina (MILAGRES *et al.*, 2013, p. 1169), argila e matéria orgânica em solos (GENOT *et al.*, 2011, p. 128) e teores de areia, silte e argila (CURCIO *et al.*, 2013, p. 499).

Sua grande vantagem em relação aos métodos tradicionais está na análise múltipla dos parâmetros através de determinações diretas (não-destrutivas) na amostra, rapidez, menor necessidade de mão de obra, além de não ser poluente por não utilizar produtos químicos ou reagentes. Pode ser aplicado em qualquer material que contenha em suas moléculas, principalmente, ligações de CH, O-H, N-H, S-H ou C=O (PASQUINI, 2003, p. 198).

O uso da espectroscopia no infravermelho próximo para determinação das propriedades físicas, de materiais como a madeira, é possível devido à alta correlação entre as propriedades físicas e químicas. Cabe ressaltar que o NIR não mede o constituinte químico da amostra, e sim a interação entre a onda eletromagnética e o campo elétrico gerado pela oscilação da ligação química (HEIN *et al.*, 2009 a., p. 121; BAILLERES *et al.*, 2002). Desta forma, os espectros são influenciados também pelo tamanho e arranjo das partículas (FERRARESI, 2010, p. 1774).

#### 2.4.1 Calibração e validação de modelos

A calibração consiste em produzir um modelo estatístico que relacione os dados espectrais aos obtidos pelo método de referência (PASQUINI, 2003, p. 198). Dentre os métodos estatísticos multivariados mais frequentemente utiliza-se a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS - *partial least squares*), a qual foi utilizada no presente trabalho.

O modelo PLS é construído por variáveis latentes (fatores) ou componentes principais, onde os fatores correspondem a uma combinação linear entre as variáveis independentes (espectros) ou dependentes (valores de referência) (WOLD *et al.*, 2001, p.110). Segundo Muñiz *et al.* (2012, p. 868) o método PLS pode solucionar os problemas de colinearidade com satisfatória habilidade de previsão, e por este motivo esta técnica é adequadamente aplicada em dados espectrais.

As amostras utilizadas para a calibração devem representar todo o conjunto de variabilidade existente na população e as medições de referência devem ser realizadas com exatidão (PASQUINI, 2003, p. 213; BAILLERES *et al.*, 2002, p. 485; WETTERLIND *et al.*, 2013, p. 96). Em muitos estudos verificam-se maiores erros nas extremidades da curva, denotando o erro de amostragem para a construção do modelo de calibração (MAGALHÃES *et al.*, 2006, p. 03).

Na construção dos modelos de calibração, fatores como pré-tratamento espectral, seleção de variáveis e eliminação de outliers são indispensáveis para a obtenção de bons resultados. Diversos fatores ocasionam interferências nos espectros, dentre eles cita-se as distorções espectrais causadas pelo *hardware* do equipamento, como ruídos no detector, deslocamentos de linha base e de comprimentos de onda e a variação no espectro devido à temperatura (SOTELO, 2006, p. 124; HONORATO *et al.*, 2007, p. 1309). A fim de reduzir, eliminar ou padronizar esses fatores indesejáveis, sem alterar a informação espectroscópica são realizados tratamentos matemáticos para melhorar os parâmetros estatísticos dos modelos (DELWICHE; REEVES, 2004, p. 180).

Dentre os tratamentos espectrais mais utilizados estão a correção de espalhamento de luz (MSC - *multiplicative scatter correction*), variação normal padrão (SNV – *Standard Normal Variate*), alisamento, primeira e segunda derivada. Pode-se utilizar apenas um ou mais tratamentos. Comumente tem-se obtido resultados mais satisfatórios ao combinar tratamentos (HEIN *et al.*, 2009 b., p. 138; GENOT *et al.*, 2011, p. 128). Recomenda-se testar diferentes tratamentos, visto que o resultado obtido varia conforme o grupo de amostras (WETTERLIND *et al.*, 2013, p. 101).

Exemplificando os benefícios do tratamento dos espectros, menciona-se o trabalho realizado por Hein *et al.* (2009 b., p. 138), os quais aplicaram diferentes tratamentos matemáticos nos espectros para construção de modelos para determinação da densidade da madeira, obtendo o melhor resultado com a primeira derivada associada ao SNV ( $R^2c= 0,87$ ;  $SECV= 0,02$ ;  $RPD$  de 2,4), valores superiores

aos observados no modelo com os espectros originais ( $R^2c= 0,76$ ;  $SECV= 0,03$ ;  $RPD= 2,0$ ). Cabe ressaltar que nem sempre se faz necessário tratar matematicamente os espectros (ANDRADE *et al.*, 2012, p. 662).

O processo de calibração pode ser realizado por intermédio de diversos métodos quimiométricos, utilizando toda a informação espectral ou métodos de seleção de variáveis, a qual consiste na eliminação dos comprimentos de onda não relevantes na modelagem (OSBORNE *et al.*, 1997, p. 1532). A ferramenta comumente utilizada, para a seleção de variáveis espectrais, é o algoritmo JackKnife (LAZZAROTTO *et al.*, 2014, p. 03).

Está técnica permite minimizar os erros de calibração, melhorando significativamente a sua eficiência, produzindo um modelo mais robusto e simples de interpretar (OLIVEIRA *et al.*, 2004, p. 218). Em contrapartida, se a seleção das variáveis espectrais não for adequada podem resultar em perda de informações importantes, resultando em calibrações menos precisas (FERRARESI *et al.*, 2012, p. 1774).

A detecção de outliers ou amostras anômalas, os quais são observações diferentes do resto do conjunto de dados que podem ser irrelevantes, fortemente errôneas ou anormais (NAES; ISAKSON, 1994, p. 10). Os outliers podem comprometer a qualidade do modelo calibrado. Desta maneira, a sua detecção e posterior eliminação é de suma importância. Conforme verificado por Rosso *et al.* (2013, p. 650) na remoção de 3 outliers, do modelo de calibração para massa específica da madeira, promoveu um aumento no coeficiente de determinação de 0,69 para 0,75, na relação de desvio de performance de 1,77 para 1,99 e redução no erro de estimativa de  $0,04 \text{ g cm}^{-3}$  para  $0,03 \text{ g cm}^{-3}$  ( $0,464 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Na calibração podem ocorrer dois tipos de outliers. O primeiro está relacionado com a amostra utilizada para a obtenção dos espectros, que pode ter sofrido algum tipo de contaminação ou dano e o segundo refere-se aos erros nos valores de referência que se encontram fora do intervalo previsto para os dados em questão (BURNS; CIURCZAK, 2008, p. 130).

Etapa posterior à calibração, a validação consiste em verificar a acurácia do modelo ajustado, indicando se o modelo construído é adequado para efetuar a determinação do parâmetro desejado (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 869). Em caso positivo, posteriormente o modelo ajustado poderá ser utilizado para a estimativa das propriedades, bastando realizar a medição dos seus espectros.

A validação do modelo pode ser realizada de duas maneiras: validação externa e/ ou validação cruzada. A validação externa avalia o poder de previsão do modelo construído utilizando amostras que não participaram da etapa de calibração (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 869).

Na validação cruzada (*Cross-Validation*) as amostras utilizadas são as mesmas usadas no teste de calibração. Uma amostra é separada, um modelo é construído com as amostras restantes e a previsão é feita em relação às amostras separadas inicialmente. O procedimento é realizado para cada amostra até que todo o conjunto de dados iniciais seja explorado. Sua utilização é recomendada apenas quando se trabalha com um pequeno número de amostras (ANDRADE *et al.*, 2012, p. 659).

A fim de escolher o melhor modelo multivariado, alguns parâmetros são avaliados, como: número de fatores PLS, coeficiente de determinação da calibração ( $R^2c$ ) e erro padrão na calibração (SEC – *standard error of calibration*). Na validação do modelo, os principais parâmetros analisados são: erro padrão na validação cruzada (SECV - *Standard Error of Cross Validation*) e na validação externa (SEP - *Standard Error Prediction*); raiz quadrada do erro médio quadrático na validação cruzada (RMSECV - *Root Mean Squared Error of Cross validation*) e validação externa (RMSEP - *Root Mean Squared Error of prediction*) (FÓRMULA 1, 2) (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 869; HEIN *et al.*, 2009, p. 145).

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Onde:

n: número de amostras do conjunto de calibração,

$y_i$ : valor medido da amostra i;

$\hat{y}_i$ : valor previsto para a amostra i quando o modelo é construído sem ela.

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Onde:

n: número de amostras do conjunto de teste;

$y_i$ : valor medido da amostra i;

$\hat{y}_i$ : valor previsto pelo modelo para a mesma amostra i.

Dentre os parâmetros utilizados, destaca-se a relação de desempenho do desvio (RPD - *ratio performance deviation*), índice correspondente a relação do desvio padrão (SD - *standard deviation*) dos dados obtidos convencionalmente e o erro padrão (SE - *standard error*) da validação cruzada ( $RPD = SD/SE$ ). Este índice sugere a eficiência do modelo ajustado, sendo indicado valores acima de 1,5, denotando que o erro de estimativa é menor que o desvio padrão das amostras, além de permitir a comparação entre diferentes variáveis (FUJIMOTO *et al.*, 2008, p. 534; SCHIMLECK *et al.*, 2003).

### 3 REFERÊNCIAS

- ABREU, M. F. de; DIAS, R. da S.; ABREU, C. A. de; GONZALES, A. P. Reavaliação dos critérios constantes na legislação brasileira para análises de substratos. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p.106-111, 2012.
- ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; NAPOLI, A. Near infrared spectroscopy for estimating Eucalyptus charcoal properties. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, V. 20, p. 657–666, 2012.
- ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; VIEIRA, R. S; LIMA, J. T.; SOUSA, L. C. Estimation of mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 291-298, 2010.
- ANDRÉ, N.; LABBÉ, N., RIALS, T. G. Assessment of wood load condition by Near Infrared (NIR) spectroscopy. **Journal of Materials Science**, v. 41, p.1879–1886, 2006
- ASSENHEIMER, A. Benefícios do uso de biossólidos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Revista Ambiência**, Irati, v. 5, n. 2, 2009.
- ASSIS, T. F. de; MAFIA, R. G. Hibridação e clonagem. In: BORÉM, A. (Ed.). **Biotecnologia florestal**. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora, 2007. p. 93-121.
- ASSIS, T. F. de; SANTOS, G. A. Potencialidade de híbridos com *Eucalyptus benthamii*. In: **Silvicultura e melhoramento genético de *Eucalyptus benthamii***. Curitiba: FUPEF, 2012, 150 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília: ABRAF, 2013. 148 p.
- BAILLERES, H.; DAVRIEUX, F.; HAM-PICHAVANT, F. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a Eucalyptus breeding program. **Forestry Science**, Les Ulis, v.59, p.479-490, 2002.

BAITEL, D. P.; CALDEIRA, M. V. W.; LOMBARDI, K. C. Carbonização de casca de arroz para uso em substratos: influência do tempo de processamento na variação de pH. In: FERTIBIO 2008, Londrina. **Resumo expandido...** Londrina: Editora Universidade Estadual de Londrina, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº375, de 29 de agosto de 2006.** Disponível em: <[http://www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/cao\\_urbanismo\\_e\\_meio\\_ambiente/legislacao/leg\\_federal/leg\\_fed\\_resolucoes/leg\\_fed\\_res\\_conama/res37506.pdf](http://www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_federal/leg_fed_resolucoes/leg_fed_res_conama/res37506.pdf)>

BRONDANI, G. E.; BACCARIN, F. J. B.; BERGONCI, T.; GONÇALVES, A. N.; ALMEIDA, M. Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii*: efeito do genótipo, AIB, zinco, boro e coletas de brotações. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 147-156, 2014.

BRONDANI, G. E.; BACCARIN, F. J. B.; BERGONCI, T.; GONÇALVES, A. N.; ALMEIDA, M. Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii*: efeito do genótipo, AIB, zinco, boro e coletas de brotações. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 147-156, 2014.

BRONDANI, G. E.; SANTIN, D., BENEDETTI, E. L., ROVEDA, L. F., ORRUTÉA, A. G. Ambiente inicial de enraizamento e substratos na miniestaquia de erva-mate. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 257-267, 2007.

BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. **Handbook of near-infrared analysis**. 3th ed. Boca Raton: CRC, 2008. 808 p.

CALDEIRA, M. V. W.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A.; DELARMELINA, W. M.; ROCHA, R. L. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando lodo de esgoto, fibra de coco e palha de café *in natura*. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 2, p. 195 - 206, 2014.

CALDEIRA, M. V. W.; PERONI, L.; GOMES, D. R.; DELARMELINA, W. M.; TRAZZI, P. A. Diferentes proporções de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas de timbó (*Ateleia glazioviana* Baill). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 15-22, 2012.

CALDEIRA, M. V. W.; WENDLING, I.; PENCHEL, R. M.; GONÇALVES, E. O.; KRATZ, D.; TRAZZI, P. A. Propriedades de substratos para produção de mudas florestais. In: CALDEIRA, M. V. W.; GARCIA, G. O.; GONÇALVES, E. O.; ARANTES, M. D. C.; FIEDLER NC (Eds.) **Contexto e Perspectivas da Área Florestal no Brasil**. Alegre: Suprema, 2011, p.141-160.

CAMARGO, R.; MALDONADO, A. C. D.; SILVA, P. A.; COSTA, T. R. Biossólido como substrato na produção de mudas de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.12, p.1304-1310, 2010.

CARNEIRO, J. G. de A. **Produção e Controle de Qualidade de Mudas Florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1995, 451p.

COUTO, M.; WAGNER JÚNIOR, A.; QUEZADA, A. C. Efeito de diferentes substratos durante a aclimatização de plantas micropropagadas do porta-enxerto mirabolano 29C (*Prunus cerasifera* Ehrh.) em casa de vegetação. **Revista brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 125-128, 2003.

- CURCIO, D.; CIRAOLLO, G., D'ASAROA, F., MINACAPILLIA, M. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. **Procedia Environmental Sciences** v. 19, p. 494 – 503, 2013.
- DE BOODT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates. In: Floriculture. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v.26, p.37-44, 1972.
- DELWICHE, S. R.; REEVES, J. B. The effect of spectral pretreatments on the PLS modeling of agricultural products. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 12, p. 177-182, 2004.
- FERMINO, M. H. O. Uso da análise física na avaliação da qualidade de componentes e substratos. In: FURLANI, A.M.C. et al. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para a produção de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, p.29-37, 2002.
- FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN-NETO, L.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1769-1777, 2012.
- FERRAZ, M. V.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N. Caracterização física e química de alguns substratos comerciais. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 209-214, 2005.
- FIDÊNCIO, P. H.; POPPI, R. J.; ANDRADE, J. C. Determination of organic matter in soils using radial basis function networks and near infrared spectroscopy. **Analytica Chimica Acta**, v. 453, p. 125–134, 2002.
- FIGUEIREDO, F. A. M. M.; CARNEIRO, J. G. A.; PENCHEL, R. M.; BARROSO, D. G.; DAHER, R. F. Efeito das variações biométricas de mudas clonais de eucalipto sobre o crescimento no campo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.1, p.01-11, 2011.
- FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO, K.; TSUCHIKAWA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v.16, p.529-537, 2008.
- GENOT, V.; COLINET, G.; BOCK, L.; VANVYVE, D.; REUSEN, Y.; DARDENNE, P. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 19, p. 117-138, 2011.
- GOMES, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013.
- GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 6, p. 655-664, 2002.
- GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. **Viveiros florestais (propagação sexuada)**. Viçosa: Editora UFV, 2004. (Caderno didático, 72).
- GONÇALVES, J.L.M. et al. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p.309-350, 2000.

- GONÇALVES, L.M.; POGGIANI, F. Substratos para produção de mudas florestais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13. Águas de Lindóia, 1996. **Resumos...** Piracicaba, Sociedade Latino Americana de Ciência do Solo, CD-ROM, 1996.
- GRAVE, F.; Franco, E. T. H.; PACHECO, J. P.; SANTOS, S. R. Crescimento de plantas jovens de açoita-cavalo em quatro diferentes substratos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 289-298, 2007.
- GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1069-1076, 2004.
- HANDRECK, K. A.; BLACK, N. D. **Growing media for ornamental plants and turf**. University of New South Wales Press, Randwick, Australia, 1994.
- HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES JR, F. T.; GENEVE, R. **Plant propagation: principles and practices**. 8th. ed. Boston: Prentice-Hall, 2011. 915 p.
- HEIN, P. R. G.; CAMPOS, A. C. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba. v. 37, n. 82, p.119-129, 2009a.
- HEIN, P. R. G.; CAMPOS, A. C. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, 2009b.
- HIGA, R. C. V.; PEREIRA, J. C. D. Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Comunicado Técnico**, 100. Embrapa Florestas, Colombo, Paraná. 4 p. 2003.
- HONORATO, F. A.; BARROS NETO, B.; MARTINS, M. N.; GALVÃO, R. K. H.; PIMENTEL, M. F. Transferência de calibração em métodos multivariados. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 5, 1301-1312, 2007.
- JULIO, J. R. **Moinha de carvão como substrato alternativo na produção de mudas de azaleia**. 69f.: il. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- KÄMPF, A. N. Substrato. In: KÄMPF, A. N. **Produção comercial de plantas ornamentais**. 2ª edição, Guaíba: Agrolivros, 2005. p. 45 - 72.
- KRATZ, D.; WENDLING, I. Produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* em substratos renováveis. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 125 - 136, 2013.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1103-1113, 2013a.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 607-621, 2013b.

- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Utilização de resíduos urbanos e agroflorestais para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 530-537, 2013c.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; PIRES, P. P. Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii* x *E. dunnii* em substratos a base de casca de arroz carbonizada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 547-556, 2012.
- LAZZAROTTO, M.; SILVA, P. R.; PUGSLEY, B.; HANSEL, F. A.; MAGALHÃES, W. L. E. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição rápida de concentração de etanol em fermentados. **Comunicado técnico**, 335. Embrapa Florestas. Colombo, Paraná. 2014.
- LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C. Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.5, p.835-843, 2007.
- MAGALHÃES, W. L. E.; ZANGISKI, F.; KLEIN, C. H.; HIGA, A. R. Uso da Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para Predição Não- Destrutiva de Densidade Básica da Madeira de *Pinus taeda*. **Comunicado Técnico** 159. Embrapa Florestas. Colombo, Paraná. 2006.
- MARTÍNEZ, P. F. Manejo de substratos para horticultura. IN: FURLANI, A. M. C. et al. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para a produção de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas. 2002. p. 53-76.
- MAZUR, L.; OLIVEIRA, G. A. de, BICUDO, M. O. P.; RIBANI, R. H.; NAGATA, N.; PERALTA-ZAMORA, P. Multivariate calibration and moisture control in yerba mate by near infrared spectroscopy. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 36, n. 2, p. 369-374, 2014.
- MELO, L. A.; PEREIRA, G. A.; MOREIRA, E. J. C.; DAVIDE, A. C.; SILVA, E. V.; TEIXEIRA, L. A. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* e *Eremanthus erythropappus* sob diferentes formulações de substrato. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 2, p. 234-242, 2014.
- MENDONÇA, A. V. R.; CARNEIRO, J. G de; FREITAS, T. A. S de; BARROSO, D. G. Características fisiológicas de mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a estresse salino. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 255-267, 2010.
- MILAGRES, F. R.; GOMIDE, J. L.; MAGATON, A.; FANTUZZI NETO, H. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.6, p.1165-1173, 2013.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa SDA Nº 17**. Diário Oficial da União- Seção 1, nº 99, 24 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos para Plantas e Condicionadores de Solo. Brasília, 2007.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa SDA nº 3**, de 13 de março de 2013. Diário Oficial da União - Seção 1, nº 2.200-2 de 24/08/2001. Brasília. 2013.

- MUÑIZ, G. I. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base floresta. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, 2012.
- NAES, T.; ISAKSSON, T. Different strategies for handling non-linearity problems in NIR calibration. **NIR News**, Chichester, v.5, n.1, p.4-11, 1994.
- NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. G.; KRATZ, D.; BASSACO, M. V. M. Adição de maravalha a substratos comerciais na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ambiência**, Guarapuava, v.10, n.2, p. 527 – 538, 2014.
- NOGUERA, P. A.; ABAD, M.; NOGUERA, V. Coconut coir waste, a new viable ecogilly - Friendly peat substitute. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 517, p. 279-286, 2000.
- OLIVEIRA JUNIOR; O. A. de; CAIRO, P. A. R.; NOVAES, A. B. de. Características morfofisiológicas associadas à qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* produzidas em diferentes substratos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.6, p.1173-1180, 2011.
- OLIVEIRA, F. C.; SOUZA, A.T.P.C.; DIAS, J.A.; DIAS, S.C.L.; RUBIM, J.C. A escolha da faixa espectral no uso combinado de métodos espectroscópicos e quimiométricos. **Química Nova**, São Paulo, v.27, n.2, p.218-255, 2004.
- OLIVEIRA, R. B.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, C. A. M.; SILVA, S.; MARTINS FILHO, S. Produção de mudas de essências florestais em diferentes substratos e acompanhamento do desenvolvimento em campo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 122-128, 2008.
- OSBORNE, S.D.; JORDAN, R.D.; KÜNNEMEYER, R. Method of wavelength selection for partial least square. **Analyst**, London, v.122, p.1531-1537, 1997.
- PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas - CNPF, 2006. 45 p. (Documentos, 129).
- PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 14, n. 2, 198-219, 2003.
- PETRONI, S. L. G.; PIRES, M. A. F.; MUNITA, C. S. Adsorção de zinco e cádmio em colunas de turfa. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 477-481, 2000.
- PEZZUTTI, R. V.; CALDATO, S. L. Sobrevivência e crescimento inicial de mudas de *Pinus taeda* L. com diferentes diâmetros do colo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 355-362, 2011.
- REED, D. W. **A grower's guide to water, media and nutrition for greenhouse crops**. Ball Publishing, Batavia, USA, 1996. 314p.
- RODRIGUES, L. R. F. **Técnicas de cultivo hidropônico e de controle ambiental no manejo de pragas, doenças e nutrição vegetal em ambiente protegido**. Jaboticabal: FUNEP, 2002.
- ROSA, M. F.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; SANTOS, F. J. S.; ABREU, F. A. P., FURTADO, A. A. L.; BRÍGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. V. **Utilização da Casca de**

**Coco como Substrato Agrícola. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical.** 2002. 24p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 52).

ROSSO, S.; MUNIZ, G. I. B. DE, MATOS, J. L. M. DE, HASELEIN, C. R., HEIN, P. R. G., LOPES, M. DE C. Estimate of the density of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 647-652, 2013.

SANTOS, G. A.; PEREIRA A. B.; KORNDÖRFER, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 100-108, 2010.

SCHIMLECK, L. R.; DORAN, J. C.; RIMBAWANTO, A. Near infrared spectroscopy for cost-effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 51, p. 2433-2437, 2003.

SCHMITZ, J. A. K.; SOUZA, P. V. D.; KÄMPF, A. N. Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 937-944, 2002.

SCHULTZ, B.; BORA, K. C.; NOGUEIRA, A. C.; AUER, C. G. Uso do silicato de potássio no controle de oídio em mudas de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 93-99, 2012.

SCIVITTARO, W. B.; SANTOS, K. F.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V. Caracterização física de substratos elaborados a partir de resíduos agroindustriais. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. (Embrapa Clima Temperado. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, 58).

SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; SANTOS, G. A. **Silvicultura e melhoramento genético de *Eucalyptus benthamii***. Curitiba: FUPEF, 2012a., 150 p.

SILVA, R. B. G da.; SIMÕES, D.; SILVA, M da. Qualidade de mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em função do substrato. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 297-302. 2012b.

SILVA, R. F.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; FABBRIS, F.; WEIRICH, S. W.; PINHEIRO, R. R. Produção de mudas de *Eucalyptus grandis* em substratos orgânicos alternativos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 609-619, 2014.

SIMÕES; D.; SILVA, R. B. G da.; SILVA, M. R da. Composição do substrato sobre o desenvolvimento, qualidade e custo de produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 1, p. 91-100. 2012.

SOTELO, F. F. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização de petróleo: simulação de uma unidade de destilação atmosférica.** 2006. 154 p. (Doutorado em Engenharia Química – Universidade de São Paulo), São Paulo, SP.

SPIER, M. *et al.* Obtenção da curva de retenção de água pelo método da pressão positiva. In: VI Encontro Nacional sobre Substrato para Plantas, Fortaleza. **Resumo expandido...** Fortaleza: Embrapa/CNPAT, 2008. v. 1.

THERMO SCIENTIFIC. **MicroPHAZIR™ PC Analyzer for Plastic/Polymer Identification.** Disponível em: <  
<http://www.thermoscientific.com/en/product/microphazir-pc-analyzer-plastic-polymer-identification.html#inlinelImageGalleryModal>>. Acesso em: 20/01/2015.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, R.; PERONI, L.; GODINHO, T. O. Estercos de origem animal em substratos para a produção de mudas florestais: atributos físicos e químicos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 455-462, 2012.

TRIGUEIRO, R. DE M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 64, p. 150-162, 2003.

VALDERRAMA, P.; BRAGA, J. W. B.; POPPI, R. Validation of multivariate calibration models in the determination of sugar cane quality parameters by near infrared spectroscopy. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 18, n. 2, 259-266, 2007.

VALERI, S. V., CORRADINI, L. Fertilização em viveiros para produção de mudas de Eucalyptus e Pinus. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.167-.189.

WENDLING, I.; DUTRA, L. F. Produção de mudas de eucalipto por sementes. In: WENDLING, I.; DUTRA, L. F. **Produção de mudas de eucalipto**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. p. 13 - 47.

WENDLING, I.; DUTRA, L. F.; GROSSI, F. **Produção de mudas de espécies lenhosas**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 1 CD-ROM. (Embrapa Florestas. Documentos, 130).

WENDLING, I.; GATTO, A. **Substratos, adubação e irrigação na produção de mudas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2002.

WENDLING, I.; GUASTALA, D; DEDECEK, R. Características físicas e químicas de substratos para produção de mudas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, p. 209-220, 2007.

WETTERLIND, J., STENBERG, B., ROSSEL, R. A. V. Soil analysis using visible and near infrared spectroscopy. In: MAATHUIS, F. J. M. (ed). **Plant mineral nutrients: methods and protocols, methods in molecular biology**. Springer Science business media, 2013. p. 95-107.

WILLIAMS, P.; NORRIS, K. **Near-infrared technology**. 2nd ed. Saint Paul: American Association of Cereal Chemistry, 2001. 296 p.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. v. 58, p. 109 - 130, 2001.

XAVIER A., WENDLING I. SILVA. R. L. 2013. **Silvicultura clonal: princípios e técnicas**. Viçosa, MG: 2 ed. rev. ampl. UFV. 279 p.

ZANETTI, M.; CAZETTA, J. O.; MATTOS JÚNIOR, D. de. Uso de subprodutos de carvão vegetal na formação do porta enxerto limoeiro 'cravo' em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 508-512, 2003.

## **CAPITULO 1 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E FORMULAÇÃO DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii***

### **RESUMO**

Baseado na importância do substrato na produção de mudas objetivou-se avaliar a viabilidade da utilização de uma série de materiais, com foco em resíduos agroindustriais, e a influência de suas propriedades físico-químicas na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*, bem como verificar a semelhança entre os componentes testados, através da análise de agrupamento. Para tanto foram formulados 100 tratamentos, os quais tiveram suas propriedades físicas e químicas analisadas no Laboratório de Manejo de Bacias hidrográficas da Universidade Federal do Paraná e Laboratório de Química do Solo da Embrapa Florestas, respectivamente. O experimento foi realizado no Laboratório de Propagação de Espécies Florestais da Embrapa Florestas, localizada em Colombo-PR, realizando-se semeadura direta em tubetes de 55 cm<sup>3</sup> permanecendo por 120 dias em estufa de vidro. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com 100 tratamentos de 5 repetições com 20 plantas. Aos 90 e 120 dias foram feitas mensurações da altura da parte aérea e diâmetro de colo de todas as mudas. Como resultados, em relação às propriedades físicas, formaram-se quatro grupos (G): G1- constituído por elementos de alta macroporosidade (casca de arroz carbonizada); G2- equilíbrio entre macro e microporos (duas granulometrias de carvão), G3- maior proporção de microporos (fibra de coco, vermiculita fina, turfa e casca de pinus) e G4- alta densidade associada à alta microporosidade (biossólido). Quanto às propriedades químicas, formaram 2 grupos: G2- biossólido e G1 - demais componentes. De maneira geral, verificou-se maior crescimento nos substratos com maior capacidade de retenção de água e os altos níveis de condutividade elétrica e pH não prejudicaram o crescimento das mudas. O substrato comercial a base de turfa proporcionou crescimento superior ao comercial a base de casca de pinus. A casca de pinus semidecomposta e diferentes granulometrias de moinha de carvão proporcionaram redução no crescimento quando inseridas na formulação dos substratos. O resíduo regional, biossólido, apresentou o menor custo aliado ao bom crescimento das plantas e a utilização da moinha de carvão justifica-se a fim de reduzir os custos de produção.

Palavras-chave: Moinha de carvão. Turfa. Casca de pinus. Casca de arroz carbonizada. Biossólido. Análise de agrupamento.

## CHAPTER 1 - PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND SUBSTRATES FORMULATION FOR SEEDLINGS PRODUCTION *Eucalyptus benthamii*

### ABSTRACT

Based on the importance of the substrate in the production of seedlings aimed to evaluate the feasibility of using a range of materials, focusing on agro-industrial waste, and the influence of their physical and chemical properties in the seedlings production of *Eucalyptus benthamii* and verify similarity between the tested components by cluster analysis. Therefore, we made 100 treatments, which had its physical and chemical properties analyzed in Laboratory of Manejo de Bacias hidrográficas of Universidade Federal do Paraná and Laboratory of Química do Solo of Embrapa Florestas, respectively. The experiment was conducted in Propagação de Espécies Florestais of Embrapa Florestas, located in Colombo-PR, performing tillage in tubes of 55 cm<sup>3</sup> staying for 120 days in a glass greenhouse. The experimental design was completely randomized with 100 treatments of 5 repetitions with 20 plants. At 90 and 120 days shoot height of measurements and diameter of the seedlings were made. As a result, with respect to physical properties, four groups were formed (G): G1 consists of high macroporosity elements (rice hulls); G2 balance between macro and micropores (two charcoal particle sizes), G3 higher proportion of micropores (coconut fiber, fine vermiculite, peat and pine bark) and G4 high density associated with high microporosity (biosolids). As for the chemical, formed two groups: biosolids and other components. In general, there was a higher growth in substrates with higher water retention capacity and high levels of electrical conductivity and pH did not harm the growth of the seedlings. The commercial substrate peat base provided higher growth than the commercial pine bark base. The bark of pine and different particle sizes of charcoal reduction in growth when inserted in the formulation of the substrates. The regional waste, biosolids, had the lowest cost allied to good plant growth and the use of charcoal is justified in order to reduce production costs.

**Keywords:** Charcoal. Peat. Pine bark. Carbonized rice hulls. Biosolids. Cluster analyses.

## 1 INTRODUÇÃO

A área plantada de *Eucalyptus* no Brasil vem crescendo ano após ano, devido a investimentos, principalmente, de empresas do segmento de Papel e Celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013, p. 49). Nas regiões mais frias do Brasil, o *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage é uma das espécies mais importantes economicamente, visto apresentar boa aptidão, principalmente no que se refere à produção de madeira para fins energéticos, sólidos madeiráveis e celulose, associada a resistência a geadas (PALUDZYSZYN FILHO *et al.* 2006, p. 1; HIGA; PEREIRA, 2003, p. 27).

A necessidade de produção de mudas de qualidade está em crescente expansão, visto ao aumento na demanda por produtos florestais. Nesse sentido, muitos esforços têm sido realizados para melhorar a qualidade e reduzir os custos de produção das mudas e, dentre os fatores que influenciam na qualidade, está o substrato utilizado, sendo ele o meio em que as raízes se desenvolvem, fornecendo suporte estrutural às mudas e também água, oxigênio e nutrientes (HARTMANN *et al.*, 2011, p. 78).

O avanço da tecnologia de produção de mudas proporcionou a substituição gradativa da terra de subsolo por outros materiais na composição de substratos, tendo como componentes cascas de árvores, de grãos como casca de arroz e compostos orgânicos (CALDEIRA *et al.*, 2011, p. 55). No mercado podem ser encontrados substratos prontos, sendo que os principais produtos comercializados são à base de casca de pinus e turfa. No entanto, atualmente, destaca-se a baixa oferta de casca de pinus para fabricação de substratos, devido à sua utilização como fonte de energia para as caldeiras das indústrias florestais, concomitantemente com a redução na área plantada do gênero *Pinus* no Brasil (FURTADO *et al.*, 2012, p. 578; ABRAF, 2013, p. 31). Em se tratando da turfa, sua principal desvantagem é o impacto ambiental, por se tratar de um material natural não renovável (CALDEIRA *et al.*, 2011, p. 80), aliada a proibição de sua importação temporária do Canadá, principal fornecedor da matéria prima (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA, 2013).

Outros resíduos já vêm sendo utilizados como componentes de substratos, como a fibra de coco e a casca de arroz carbonizada, contudo esses não são

encontrados em todas as regiões do país, elevando o custo de aquisição nas regiões distantes da origem de produção. Em contrapartida, resíduos encontrados em todos os locais, como o biossólido, apesar de apresentar viabilidade técnica na produção de mudas (TRIGUEIRO; GUERRINI, 2004, p. 156; KRATZ *et al.*, 2013 c., p. 534; GOMES *et al.*, 2013, p. 126; CALDEIRA *et al.*, 2014, p. 202) não é comumente utilizado para produção de mudas.

Considerando a importância da utilização de resíduos orgânicos e a necessidade de apresentar novas opções de substratos, o presente trabalho tem por objetivos avaliar a viabilidade da utilização de uma série de materiais, com foco em resíduos agroindustriais, e a influência de suas propriedades físico-químicas na produção de mudas de *E. benthamii*, bem como verificar a semelhança entre os componentes testados, através da análise de agrupamento.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 PREPARO DOS SUBSTRATOS**

O experimento foi instalado em dezembro de 2013, no Laboratório de Propagação de Espécies Florestais da Embrapa Florestas, localizada em Colombo, Paraná (25°19'17" S e 49°09'39" W). O clima da região, de acordo com o Sistema Internacional de Köppen, é do tipo Cfb (clima subtropical úmido).

Foram utilizados dois substratos comerciais (a base de turfa e casca de pinus semidecomposta) e misturas de diferentes componentes (casca de arroz carbonizada, carvão vegetal, fibra de coco, casca de pinus semidecomposta, vermiculita fina, biossólido e turfa) para a formulação de 100 substratos (TABELA 1.1).

TABELA 1.1 - MATERIAIS UTILIZADOS (%) NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS (VOLUME/VOLUME).

S	CAC	C1	C2	FC	CP	VF	BIO	TF	S	CAC	C1	C2	FC	CP	VF	BIO	TF
1	100								51		90						10
2		100							52		70						30
3			100						53		50						50
4				100					54		30						70
5					100				55		10						90
6						100			56			90		10			
7							100		57			70		30			
8								100	58			50		50			
9	Substrato comercial a base de turfa								59			30		70			
10	Substrato comercial a base de casca de pinus								60			10		90			
11	90			10					61			90			10		
12	70			30					62			70			30		
13	50			50					63			50			50		
14	30			70					64			30			70		
15	10			90					65			10			90		
16	90				10				66			90				10	
17	70				30				67			70				30	
18	50				50				68			50				50	
19	30				70				69			30				70	
20	10				90				70			10				90	
21	90					10			71			90					10
22	70					30			72			70					30
23	50					50			73			50					50
24	30					70			74			30					70
25	10					90			75			10					90
26	90						10		76				10	90			
27	70						30		77				30	70			
28	50						50		78				50	50			
29	30						70		79				70	30			
30	10						90		80				90	10			
31	90							10	81					90	10		
32	70							30	82					70	30		
33	50							50	83					50	50		
34	30							70	84					30	70		
35	10							90	85					10	90		
36		90			10				86					90		10	
37		70			30				87					70		30	
38		50			50				88					50		50	
39		30			70				89					30		70	
40		10			90				90					10		90	
41		90				10			91					90			10
42		70				30			92					70			30
43		50				50			93					50			50
44		30				70			94					30			70
45		10				90			95					10			90
46		90					10		96				90		10		
47		70					30		97				70		30		
48		50					50		98				50		50		
49		30					70		99				30		70		
50		10					90		100				10		90		

S- Substrato; CAC- Casca de arroz carbonizada; C1- carvão vegetal com granulometria entre 3- 5 mm; C2- carvão vegetal com granulometria entre 1- 3 mm; FC- fibra de coco; CP- casca de pinus semidecomposta; VF- vermiculita fina; BIO- biossólido e TF- turfa.

Utilizou-se moimha de carvão vegetal oriunda de madeira de reflorestamento dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* para a obtenção de duas granulometrias (3-5 mm e 1-3 mm). Para tanto, foram utilizadas três peneiras com malhas de 5, 3 e 1 mm. A casca de arroz carbonizada e o biossólido foram preparados conforme metodologia descrita por Kratz *et al.* (2013 a., p.1105) e os componentes vermiculita fina (granulometria ao redor de 0,71 a 2 mm), fibra de coco (granulometria em torno de 0,25 a 2 mm), turfa preta brasileira, casca de pinus semidecomposta e os substratos comerciais foram adquiridos em uma fábrica produtora de substratos.

Os materiais foram misturados manualmente juntamente com a adubação de base (0,6 kg m<sup>3</sup> de sulfato de amônio [20 % de N], 4 kg m<sup>3</sup> de super fosfato simples [20% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 14% de SO<sub>4</sub>], 0,2 kg m<sup>3</sup> de cloreto de potássio [58 % de K<sub>2</sub>O] e 1,5 kg m<sup>3</sup> de FTE BR 12 [9% Zn, 3% Fe, 2% Mn, 0,1% Mo, 1,8% B, 0,8% Cu]).

## 2.2 ANÁLISE DE SUBSTRATOS

A caracterização física e química dos substratos foi realizada no Laboratório de Manejo de Bacias hidrográficas da Universidade Federal do Paraná e Laboratório de Química do Solo da Embrapa Florestas, respectivamente, conforme a metodologia descrita na Instrução Normativa nº 17 do Ministério da agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007).

Através desta instrução normativa foram obtidos os valores de densidade aparente (Dap), capacidade de retenção de água a uma tensão de 10 cm (CRA 10) ou microporosidade (micro), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE). A partir destes resultados, obteve-se a porosidade total (Pt) e macroporosidade (Macro). A Pt corresponde ao volume de água retido no substrato na tensão 0 hPa (totalmente saturado), enquanto que a macroporosidade consiste na diferença entre a Pt do substrato e o volume de água retido a 10 hPa (CRA 10 ou microporosidade) (DE BOODT; VERDONCK, 1972, p. 39, 40).

Os nutrientes minerais fósforo, potássio, cálcio e magnésio foram determinados em sua forma disponível (NOGUEIRA; SOUZA, 2005), enquanto o nitrogênio, carbono e enxofre na sua forma total, utilizando o analisador CHNS Elementar.

## 2.3 Custo

Para a avaliação do custo de obtenção dos componentes comercializados foram considerados os valores de compra e o custo dos componentes bio-sólido e moimha de carvão foram obtidos pela soma dos custos de transporte e da mão de obra para preparo, tendo como base o piso salarial do trabalhador empregado nas Atividades Agropecuárias, Florestais e da Pesca (Grande Grupo Ocupacional 6 da Classificação Brasileira de Ocupações) (PARANÁ, 2014).

## 2.4 PRODUÇÃO DE MUDAS

Realizou-se sementeira direta em tubetes de 55 cm<sup>3</sup> (acondicionados em bandejas metálicas e separados no espaçamento de uma célula da bandeja) com sementes de *Eucalyptus benthamii* oriundas de Área de Produção de Sementes, localizada em Guarapuava-PR. Para tanto utilizou-se um semeador manual, onde cada recipiente recebeu em torno de 4 sementes, as quais foram cobertas com uma camada de 0,5 cm de vermiculita fina. Após a sementeira, as bandejas foram acondicionadas em estufa (4 irrigações diárias de 10 min com vazão de 144 L hora<sup>-1</sup>) com temperatura monitorada (Tabela 1.2), onde permaneceram por 120 dias. Trinta dias após a sementeira foi realizado o raleamento, deixando como remanescente a muda mais centralizada no tubete e com maior crescimento da parte aérea.

TABELA 1.2 - TEMPERATURA DO AR MÍNIMA (T MIN.), MÁXIMA (T MÁX.), MÉDIA (T MÉD.) DENTRO DA ESTUFA NO PERÍODO DE PRODUÇÃO DAS MUDAS DE *E. benthamii*.

Mês/2014	Manhã			Tarde		
	T min.	T máx.	T méd.	T min.	T máx.	T méd.
	°C ± SD			°C ± SD		
Janeiro	19,63±3,63	36,50±3,84	34,53±5,03	26,03±2,05	39,13±3,32	34,37±4,24
Fevereiro	18,82±4,62	34,57±6,49	30,54±6,99	23,93±4,97	34,14±7,05	27,79±6,99
Março	16,29±1,99	27,68±3,50	25,42±4,06	22,03±2,73	30,26±4,26	24,32±3,20
Abril	15,85±2,20	25,96±4,24	23,44±4,68	19,63±3,83	27,80±5,29	22,23±4,38

SD - desvio padrão em relação ao valor médio.

Aos 30 dias iniciou-se a adubação de crescimento (4 g L<sup>-1</sup> de ureia, 3 g L<sup>-1</sup> de super fosfato simples em pó, 0,25 g L<sup>-1</sup> de FTE BR 10 (7% Zn, 4 % Fe, 4 % Mn, 0,1% Mo, 2,5 % B, 0,8% Cu) e 3 g L<sup>-1</sup> de cloreto de potássio), realizada a cada sete dias até os 90 dias. Após aplicou-se adubação de rustificação (4 g L<sup>-1</sup> de sulfato de amônio, 10 g L<sup>-1</sup> de super fosfato simples, 4 g L<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, 1 g L<sup>-1</sup> de FTE BR 10), realizada também a cada sete dias até os 120 dias. Para o preparo das adubações, os fertilizantes foram misturados com água e a solução resultante foi aplicada nas mudas com o uso de regador manual, aplicando-se aproximadamente 5 ml por tubete.

Para a avaliação da qualidade das mudas foi mensurada a altura da parte aérea (régua graduada em mm) e o diâmetro de colo (paquímetro digital) aos 90 e 120 dias. Aos 120 dias foi realizada avaliação da biomassa seca da parte aérea e radicial (48 horas em estufa a 65 °C e pesagem em balança analítica de precisão 0,001 g) de 100 mudas, de diferentes classes de altura, a fim de ajustar-se uma equação para estimar a biomassa seca de todas as mudas.

## 2.5 DELINEAMENTO E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com cinco repetições de 10 plantas e 100 tratamentos. Com o intuito de observar a influência do acréscimo de cada componente nas diferentes combinações, realizou-se análise de regressão. A correlação de Pearson ( $p < 0,05$ ), entre as variáveis biométricas e as características físicas e químicas dos substratos, foi realizada a fim de verificar quais propriedades tiveram maior influência no crescimento das plantas.

A fim de verificar quais componentes utilizados na formulação dos substratos apresentam maior semelhança, em relação as propriedades físico-químicas, realizou-se a análise de agrupamento pelo método do vizinho mais próximo. Para a determinação dos grupos, adotou-se o corte à 50 % na distância Euclidiana (ALBUQUERQUE et al., 2006, p. 259).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 ANÁLISE DE SUBSTRATOS

A análise de agrupamento dos componentes, em relação às propriedades físicas, formou quatro grupos (G) de substratos, em um corte de 50% da distância euclidiana: G1- casca de arroz carbonizada, G2- duas granulometrias de carvão (C1 e C2), G3- fibra de coco, vermiculita fina, turfa e casca de pinus e G4- bio sólido, sendo o G1 e G4 os grupos com maior dissimilaridade em relação aos demais (Figura 1.1 A).

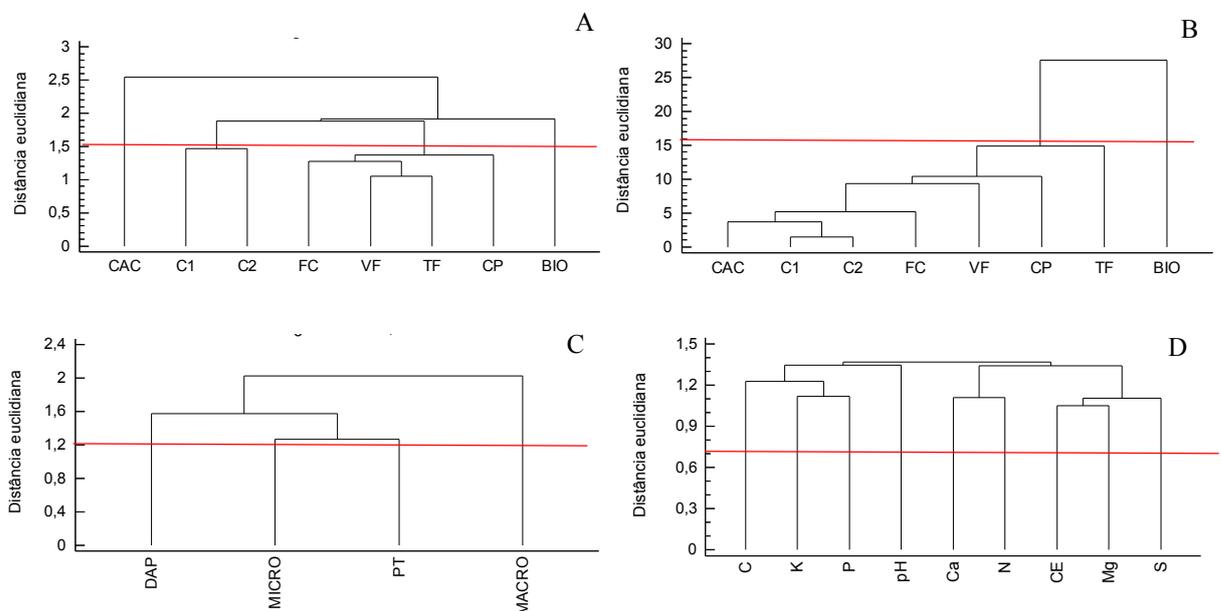


FIGURA 1.1 - ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS PELO MÉTODO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO: DOS COMPONENTES EM RELAÇÃO AS PROPRIEDADES FÍSICAS (A) E QUÍMICAS (B); PROPRIEDADES FÍSICAS (C) E QUÍMICAS (D).

Dentre as propriedades físicas, a porosidade total e microporosidade apresentaram maior similaridade, seguido da densidade aparente e macroporosidade, de forma similar ao resultado da análise de agrupamento dos componentes, onde se verificou que a casca de arroz carbonizada, seguida do bio sólido, foram os elementos que apresentaram maior diferença em relação aos demais (FIGURA 1.1 C e A). Apesar de apresentar semelhança com os componentes a base de carvão, a casca de arroz carbonizada diferencia-se devido à alta macroporosidade, característica própria deste componente (FIGURA 1.2 D) e o bio sólido à alta microporosidade e densidade aparente (FIGURA 1.2 A).

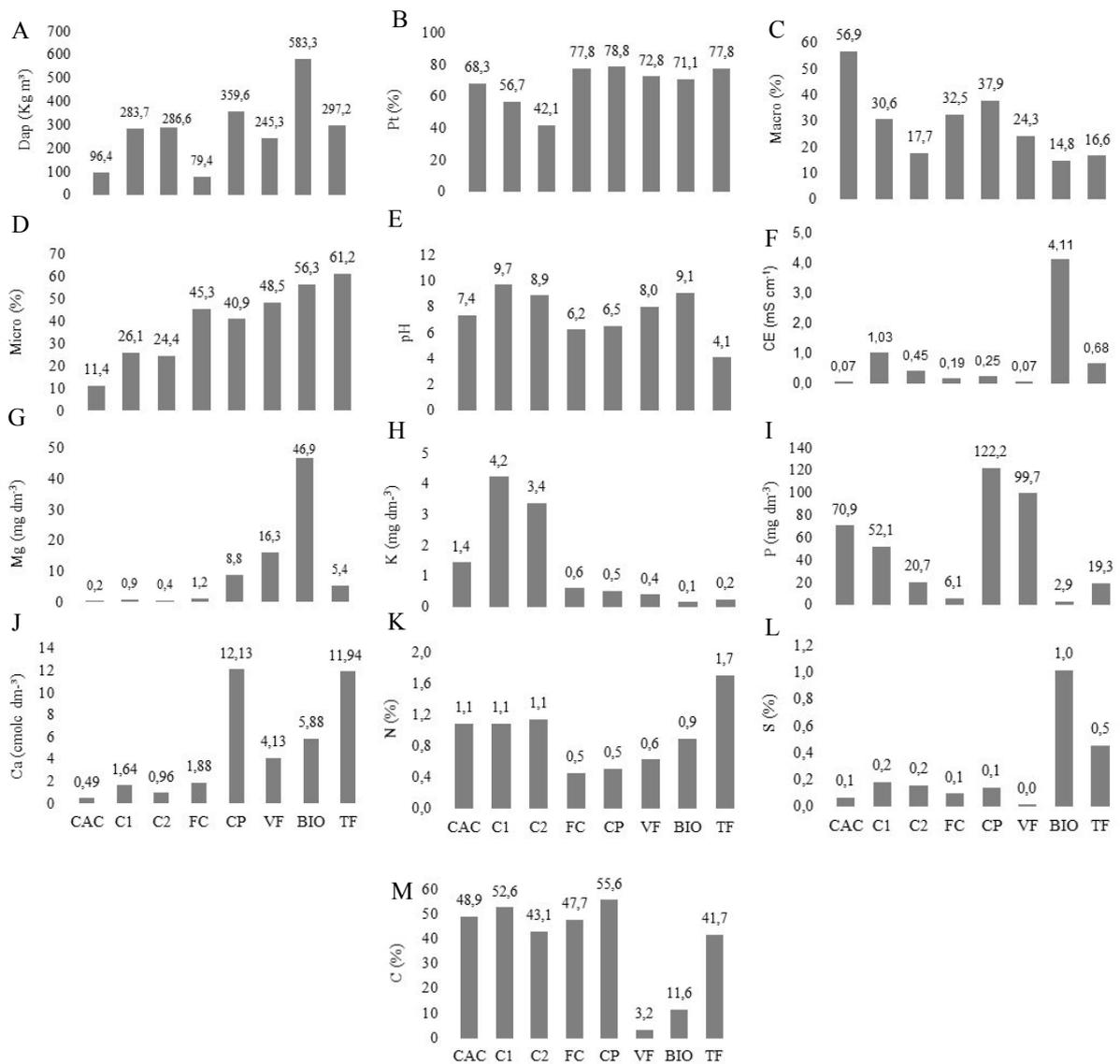


FIGURA 1.2 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS COMPONENTES USADOS NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS. DENSIDADE APARENTE (Dap) (A), POROSIDADE TOTAL (Pt) (B), MACROPOROSIDADE (Macro) (C), MICROPOROSIDADE (Micro) (D), POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH) (E), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) (F), MAGNÉSIO (Mg) (G), POTÁSSIO (K) (H), FÓSFORO (P) (I), CÁLCIO (Ca) (J), NITROGÊNIO (N) (K), ENXOFRE (S) (L) E CARBONO (C) (M).

A partir da análise de agrupamentos e dos resultados das propriedades físicas (FIGURA 1.1 A e 1.2) verificou-se que o G1 refere-se ao grupo com alta macroporosidade, o G2 aos componentes que apresentam maior equilíbrio entre a macro e microporosidade, o G3 formado pelos elementos com maior proporção de microporos e o G4 alta densidade associada à alta microporosidade (FIGURA 1.1A e 1.2).

TABELA 1. 3 - RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (PT), MICROPOROSIDADE (MICRO), MACROPOROSIDADE (MACRO), POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE), MAGNÉSIO (MG), POTÁSSIO (K), FÓSFORO (P), CÁLCIO (CA), NITROGÊNIO (N), CARBONO (C) E ENXOFRE (S).

Substrato	Dap	Pt	Micro	Macro	pH	CE	Mg	K	P	Ca	N	C	S
	kg m <sup>-3</sup>	%					mS cm <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>			cmolc dm <sup>-3</sup>	%	
SC1	315,34	77,29	50,37	26,93	5,86	0,57	8,62	0,35	55,22	24,50	1,84	44,04	0,55
SC2	193,09	69,06	45,06	24	5,26	0,93	4,05	1,67	39,04	3,44	0,26	25,94	0,06
90 CAC/ 10 FC	86,30	69,48	16,31	53,17	7,21	0,09	0,48	1,36	53,70	0,43	1,03	47,06	0,06
70 CAC/ 30 FC	86,65	75,37	25,44	49,94	6,92	0,09	0,58	1,23	53,15	0,71	0,89	44,58	0,08
50 CAC/ 50 FC	78,26	76,58	31,91	44,67	6,72	0,10	0,55	1,14	37,45	1,14	0,85	43,32	0,11
30 CAC/ 70 FC	73,86	80,02	40,02	39,99	6,68	0,10	0,90	0,95	20,80	1,73	0,76	42,98	0,11
10 CAC/ 90 FC	63,82	79,05	50,24	28,81	6,58	0,12	0,93	0,73	10,05	1,94	0,44	40,73	0,12
90 CAC / 10 CP	125,77	70,99	16,53	54,46	7,20	0,12	1,69	1,51	99,45	2,44	1,04	42,18	0,10
70 CAC/ 30 CP	165,11	72,65	22,02	50,62	6,90	0,11	2,75	1,29	118,50	5,06	0,94	37,46	0,08
50 CAC/ 50 CP	204,45	73,08	26,49	46,59	6,69	0,13	4,44	0,96	112,75	7,25	0,61	30,8	0,06
30 CAC / 70 CP	286,82	77,89	33,84	44,05	6,59	0,14	7,86	0,79	123,35	9,63	0,56	29,97	0,07
10 CAC/ 90 CP	339,57	79,33	39,70	39,63	6,53	0,17	9,55	0,65	121,70	11,69	0,51	27,66	0,07
90 CAC / 10 VF	116,8	70,62	18,82	51,8	7,38	0,07	1,80	1,13	62,75	0,73	0,94	37,91	0,02
70 CAC / 30 VF	139,75	69,61	25,71	43,9	7,37	0,05	3,06	1,00	62,00	1,63	0,69	27,96	0,03
50 CAC / 50 VF	160,60	69,00	33,38	33,44	7,49	0,04	5,31	0,65	53,95	1,75	0,42	16,19	0,01
30 CAC/ 70 VF	179,53	68,39	38,59	29,81	7,79	0,05	8,06	0,54	62,85	2,50	0,18	7,21	0,00
10 CAC/ 90 VF	172,3	69,57	41,80	27,19	7,39	0,02	8,06	0,38	59,90	2,50	0,11	2,47	0,00
90 CAC/ 10 BIO	168,10	72,43	16,93	55,5	9,15	1,08	8,17	0,71	46,64	2,75	1,15	34,52	1,10
70 CAC/ 30 BIO	263,98	72,72	26,00	46,76	9,16	2,24	15,04	0,46	2,17	4,00	1,02	21,77	0,97
50 CAC/ 50 BIO	387,65	72,16	37,41	34,75	9,12	3,62	29,37	0,27	4,35	4,69	0,97	15,13	1,23
30 CAC/ 70 BIO	472,56	72,79	44,55	28,24	9,11	4,10	38,76	0,23	2,20	6,19	0,99	14,11	1,87
10 CAC/ 90 BIO	542,33	74,19	50,78	23,42	9,09	4,26	44,30	0,15	2,07	5,69	0,98	12,57	2,12
90 CAC / 10 TF	120,59	74,41	17,94	55,5	6,33	0,09	0,69	1,46	73,70	2,06	1,33	47,33	0,12
70 CAC/ 30 TF	156,68	72,93	22,71	49,08	5,06	0,20	1,81	1,33	64,90	4,81	1,51	46,19	0,23
50 CAC/ 50 TF	208,29	73,61	39,41	38,34	4,49	0,32	2,31	1,08	50,35	7,25	1,61	44,33	0,30
30 CAC/ 70 TF	244,79	75,45	51,1	24,35	4,19	0,52	3,56	0,66	38,00	9,31	1,67	43,37	0,36
10 CAC / 90 TF	282,24	75,53	55,16	20,37	4,12	0,57	4,88	0,42	28,70	11,19	1,71	42,62	0,39
90 C1/ 10 CP	284,22	58,39	28,33	30,06	8,87	0,55	2,00	4,41	67,95	3,44	1,14	57,64	0,08
70 C1/ 30 CP	292,15	62,33	29,74	32,58	8,39	0,56	3,25	4,46	94,65	4,38	0,94	49,22	0,08
50 C1/ 50 CP	311,50	66,54	32,81	33,73	7,56	0,29	4,65	2,90	99,20	7,19	0,81	43,67	0,08
30 C1/ 70 CP	324,32	70,51	35,8	34,71	7,22	0,26	5,89	2,58	115,75	9,13	0,7	37	0,07
10 C1/ 90 CP	343,70	73,86	39,00	34,86	6,66	0,18	8,09	1,19	115,85	11,25	0,52	30,31	0,08
90C1/ 10 VF	280,38	59,29	30,69	27,77	9,49	0,60	1,43	4,87	59,60	1,53	1,31	64,65	0,07
70 C1 / 30 VF	232,00	56,04	29,80	25,77	9,27	0,43	2,25	2,88	30,40	1,56	1,13	57,24	0,06
50 C1 / 50 VF	208,86	59,92	35,07	24,85	9,13	0,40	3,63	2,41	19,10	1,75	0,99	48,96	0,05
30 C1 / 70 VF	179,68	59,22	36,69	22,53	8,63	0,23	8,07	1,45	11,50	1,68	0,63	30,41	0,03
10 C1/ 90 VF	169,00	65,58	41,23	24,36	8,07	0,10	10,48	0,43	5,35	2,00	0,36	16,64	0,02
90 C1/ 10 BIO	322,84	57,29	28,16	29,13	9,18	1,99	3,78	3,85	62,94	2,45	1,20	55,33	0,34
70 C1/ 30 BIO	386,70	54,82	34,02	20,8	9,26	2,54	7,46	2,46	36,47	3,13	1,16	42,52	0,71
50 C1/ 50 BIO	492,70	61,74	43,67	18,07	9,22	2,88	22,92	1,60	23,45	5,19	1,03	26,78	0,97
30 C1/ 70 BIO	539,06	64,68	47,92	16,75	8,98	3,55	27,24	0,95	5,30	5,56	1,01	19,74	1,29
10 C1/ 90 BIO	594,71	66,06	55,26	10,8	9,04	3,78	32,20	0,21	2,17	6,50	1,01	13,27	1,33
90 C1/ 10 TF	143,88	60,38	33,93	26,45	7,88	0,82	1,50	4,46	45,80	3,25	1,44	65,23	0,29
70 C1/ 30 TF	169,13	62,34	36,55	25,79	6,62	0,44	2,00	3,49	30,60	4,50	1,39	61,76	0,37
50 C1/ 50 TF	197,47	63,77	38,88	24,89	5,60	0,59	2,63	3,15	32,75	6,94	1,53	55,9	0,42
30 C1/ 70 TF	223,31	64,69	46,98	17,71	4,87	0,55	3,00	2,92	33,10	9,06	1,66	51,86	0,43
10 C1/ 90 TF	250,01	63,08	51,53	11,55	4,32	0,61	4,75	1,36	21,50	11,69	1,76	45,86	0,52
90 C2/ 10 CP	281,05	47,32	28,02	19,30	8,42	0,35	1,43	3,59	52,15	1,95	1,31	65,33	0,08
70 C2/ 30 CP	310,15	56,34	31,80	24,54	8,24	0,23	1,75	3,28	65,45	2,81	1,03	57,61	0,07
50 C2/ 50 CP	341,56	59,70	34,11	25,58	7,43	0,23	4,06	2,63	102,10	6,38	0,85	47,76	0,08
30 C2/ 70 CP	347,75	64,65	35,06	29,59	6,97	0,24	5,67	2,26	131,05	8,69	0,68	38,60	0,08
10 C2/ 90 CP	353,94	75,23	40,63	34,60	6,62	0,23	8,12	1,12	125,35	11,25	0,60	32,21	0,08

Continua...

Tabela 1.3. Continuação...

Substrato	Dap	Pt	Micro	Macro	pH	CE	Mg	K	P	Ca	N	C	S
	kg m <sup>-3</sup>		%			mS cm <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>	%
90 C2/ 10 VF	273,38	41,17	24,98	16,19	8,81	0,38	0,70	2,95	16,65	0,83	1,29	68,78	0,06
70 C2/ 30 VF	252,63	52,32	33,06	19,26	8,76	0,22	2,69	2,62	16,32	1,63	1,1	60,39	0,05
50 C2/ 50 VF	228,91	55,85	35,45	20,4	8,53	0,22	5,77	1,90	11,46	1,48	0,87	46,56	0,04
30 C2/ 70 VF	171,92	59,52	36,99	22,53	8,19	0,19	7,79	0,99	17,06	1,20	0,51	30,85	0,02
10 C2/ 90 VF	167,17	66,64	43,08	23,57	7,63	0,04	9,04	0,40	16,60	1,45	0,24	12,41	0,01
90 C2/ 10 BIO	349,37	44,95	28,42	16,53	9,32	0,94	2,50	2,86	17,26	1,50	1,14	63,94	0,25
70 C2/ 30 BIO	432,97	53,88	36,69	17,19	9,13	2,75	5,62	2,46	17,66	2,50	1,16	49,06	0,49
50 C2/ 50 BIO	463,62	56,27	40,73	15,54	9,13	2,45	18,55	1,26	2,29	4,63	1,00	27,6	0,54
30 C2/ 70 BIO	513,83	58,01	43,06	14,95	9,07	3,57	19,03	0,76	1,44	5,88	1,03	25,49	0,63
10 C2/ 90 BIO	572,91	67,53	49,8	17,73	9,05	4,06	32,49	0,19	2,77	7,50	1,06	22,99	1,20
90 C2 / 10 TF	298,85	49,41	31,8	17,61	7,38	0,45	0,50	2,59	25,91	1,00	1,42	71,87	0,21
70 C2 / 30 TF	307,89	55,72	38,11	17,61	5,75	0,75	0,23	3,05	21,09	1,65	1,43	66,26	0,19
50 C2/ 50 TF	312,03	58,87	43,28	15,6	5,03	0,62	2,63	2,95	19,21	7,56	1,6	57,14	0,33
30 C2/ 70 TF	290,66	70,34	44,51	25,83	6,08	0,97	6,06	2,56	20,79	17,06	1,66	50,98	0,41
10 C2/ 90 TF	285,66	71,97	48,19	23,77	5,75	1,12	8,56	1,28	21,01	22,56	1,8	46,44	0,49
90 CP/ 10 FC	267,00	76,39	41,12	35,27	6,48	0,13	7,81	0,55	123,40	12,63	0,45	28,63	0,22
70 CP/ 30 FC	232,16	75,88	42,6	33,28	6,42	0,17	7,13	0,57	121,40	11,38	0,45	29,11	0,45
50 CP/ 50 FC	234,72	75,28	44,84	30,46	6,42	0,14	4,94	0,59	107,20	9,88	0,44	31,13	0,69
30 CP/ 70 FC	176,78	74,69	47,08	27,63	6,38	0,14	2,77	0,60	72,60	6,56	0,46	34,57	0,75
10 CP/ 90 FC	118,85	72,74	48,32	24,43	6,51	0,13	2,14	0,62	41,45	4,75	0,42	34,83	0,92
90 CP/ 10 VF	297,15	76,88	40,24	36,64	6,49	0,19	9,06	0,52	123,85	12,56	0,46	26,17	0,08
70 CP/ 30 VF	305,67	70,90	37,79	33,11	6,61	0,15	9,63	0,47	121,10	11,56	0,37	22,91	0,07
50 CP/ 50 VF	283,45	70,10	41,71	28,40	6,72	0,10	9,84	0,37	93,65	10,38	0,33	18,98	0,06
30 CP/ 70 VF	237,08	67,98	44,23	23,75	6,88	0,09	11,46	0,28	68,60	7,63	0,26	14,13	0,04
10 CP/ 90 VF	207,27	64,68	42,29	22,39	7,14	0,05	12,47	0,24	41,45	5,69	0,11	5,97	0,02
90 CP/ 10 BIO	376,58	76,3	42,13	34,17	8,11	1,37	18,98	0,46	36,05	11,63	0,55	25,43	0,26
70 CP/ 30 BIO	414,39	71,76	41,87	29,89	8,53	2,63	30,20	0,31	3,83	9,19	0,71	20,08	0,64
50 CP/ 50 BIO	470,84	71,59	48,99	22,6	8,77	3,38	37,06	0,25	4,31	7,94	0,82	16,88	0,88
30 CP/ 70 BIO	518,67	70,92	51,09	19,83	8,90	3,51	36,82	0,18	1,67	6,63	0,89	13,97	1,16
10 CP/ 90 BIO	547,31	71,38	52,47	18,91	9,00	4,08	41,60	0,14	1,83	6,63	0,96	13,12	1,39
90 CP/ 10 TF	355,06	78,04	41,18	36,86	6,36	0,19	8,25	0,49	112,20	12,38	0,57	29,06	0,15
70 CP/ 30 TF	342,67	76,05	44,41	31,64	5,72	0,24	7,80	0,44	100,55	12,19	0,86	32,32	0,19
50 CP/ 50 TF	336,09	73,80	47,46	26,33	5,07	0,39	5,56	0,41	88,80	11,06	1,07	35,25	0,27
30 CP/ 70 TF	305,28	73,05	52,81	20,24	4,49	0,62	5,18	0,33	69,35	11,63	1,32	38,89	0,35
10 CP/ 90 TF	303,74	72,25	58,39	13,86	4,18	0,63	4,13	0,26	37,55	12,88	1,60	42,01	0,44
90 FC/ 10 VF	84,28	79,32	49,36	29,96	6,36	0,09	2,37	0,49	7,79	1,75	0,31	33,66	0,14
70 FC/ 30 VF	109,72	72,88	46,59	26,29	6,89	0,09	3,69	0,34	9,49	2,56	0,24	22,79	0,08
50 FC/ 50 VF	120,26	67,50	40,98	26,52	6,55	0,06	5,22	0,29	14,33	2,56	0,16	15,61	0,06
30 FC/ 70 VF	135,56	68,11	47,01	21,10	7,10	0,05	6,89	0,23	34,15	2,44	0,10	7,45	0,03
10 FC / 90 VF	150,87	68,70	43,10	25,60	7,03	0,02	7,81	0,29	16,95	2,50	0,06	2,69	0,02
Média	264,16	67,80	39,10	28,68	7,34	0,82	8,09	1,49	46,38	5,60	0,90	38,37	0,33
Desvio padrão	123,69	8,45	9,44	10,26	1,42	1,16	10,05	1,23	39,03	4,69	0,44	18,09	0,42
CV (%)	46,82	12,47	24,14	35,77	19,38	142,40	124,20	82,69	84,15	83,82	48,79	47,15	128,61

SC1 - Substrato comercial a base de turfa; SC2- substrato comercial a base de casca de pinus; CAC- Casca de arroz carbonizada; C1- carvão vegetal com granulometria entre 1- 3 mm; C2- carvão vegetal com granulometria entre 3- 5 mm; FC- fibra de coco; CP- casca de pinus semidecomposta; VF- vermiculita fina; BIO- biossólido e TF- turfa; CV- coeficiente de variação.

A adição do G1 (casca de arroz carbonizada) aos grupos G3 (fibra de coco, vermiculita fina, turfa e casca de pinus) e G4 (biossólido) proporcionou diminuição da densidade aparente e microporosidade e aumento nos valores de porosidade e macroporosidade. Por outro lado, o G2 (diferentes granulometrias de carvão vegetal) quando combinado com a vermiculita fina (G3) acarretou aumento da densidade e diminuição da porosidade total e microporosidade e, quando combinado com turfa e

casca de pinus (G3) ou biossólido (G4) proporcionou redução da densidade aparente, porosidade e microporosidade (TABELA 1.3).

Para as propriedades químicas, os componentes foram separados em 2 grupos, na distância de 50 %: G1- casca de arroz carbonizada, duas granulometrias de carvão, fibra de coco, vermiculita fina, casca de pinus e turfa e G2- biossólido, em ordem crescente de fertilidade (FIGURA 1.1 B). Em relação ao agrupamento das propriedades químicas, formaram-se grupos a partir de uma distância de 80 %: G1- carbono, G2- fósforo e potássio, G3- potencial hidrogeniônico, G4- cálcio e nitrogênio, G5- condutividade elétrica, magnésio e enxofre (FIGURA 1.1 D).

Dentre os componentes testados, a fibra de coco foi o mais inerte, com baixa concentração de todos os macronutrientes analisados, aliado ao pH dentro da faixa adequada e baixa condutividade elétrica. Os materiais incinerados apresentaram maiores teores de carbono, fósforo e potássio, associada ao alto pH e baixos valores de nitrogênio, enxofre, cálcio, magnésio e condutividade elétrica; e o biossólido, com maiores concentrações de magnésio, enxofre e altos valores de pH e condutividade elétrica; turfa com maiores teores de nitrogênio e cálcio; e a casca de pinus de fósforo e cálcio (FIGURA 1.2).

### 3.2 CUSTO DE OBTENÇÃO

Os resíduos regionais, moinha de carvão e biossólido, apresentaram o menor custo, haja vista que os mesmos são doados pelas empresas produtoras e ao viveirista cabe o custo de transporte e preparo. A fibra de coco e casca de pinus, que no passado eram tidos como resíduos, atualmente são comercializados, devido a sua viabilidade técnica, aliado a utilização da casca de pinus para energia. A vermiculita fina apresentou o maior custo de obtenção, seguida dos substratos comerciais (TABELA 1.4).

TABELA 1.4 - VALOR DE COMPRA, CUSTO DE TRANSPORTE, PREPARO E TOTAL DOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *E. benthamii* NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA, EM 2014.

Substrato	Valor de compra (R\$/ m <sup>3</sup> )	Transporte (R\$/m <sup>3</sup> )	Preparo (Homem/dia)*	Custo total (m <sup>3</sup> )
BIO <sup>2</sup>	-	20,0	62,0	82,0
MC <sup>1</sup>	-	50,0	62,0	112,0
CP	150,0	-	-	150,0
TF	153,8	-	-	153,8
CAC	165,0	-	-	165,0
SC1	250,0	-	-	250,0
SC2	217,0	-	-	217,0
FC	260,0	-	-	260,0
VF	280,0	-	-	280,0

\* Paraná, 2014; <sup>1</sup> Considerando distância de 200 km; <sup>2</sup> Considerando distância de 50 km. (Dólar 2,45); BIO- biossólido; MC –Moinha de carvão; CP- casca de pinus semidecomposta; TF- turfa; CAC- Casca de arroz carbonizada; SC1 - Substrato comercial a base de turfa; SC2- substrato comercial a base de casca de pinus; FC- fibra de coco; VF- vermiculita fina.

### 3.3 CRESCIMENTO DAS MUDAS

As variáveis biométricas apresentaram alta correlação entre si e, por isso apenas os resultados da altura foram mostrados, por apresentar maior facilidade de mensuração (APÊNDICE 1.1). Os resultados das demais variáveis encontram-se no Apêndice 1.2.

A utilização da turfa, biossólido e fibra de coco como substrato puro proporcionou maior crescimento, quando comparado com seu uso em forma de componente em misturas. Em lado oposto, a casca de arroz carbonizada, vermiculita fina, duas granulometrias de carvão e casca de pinus apresentaram a necessidade de serem combinados com outros elementos para obtenção de maior incremento no crescimento (FIGURA 1.3 e 1.4).

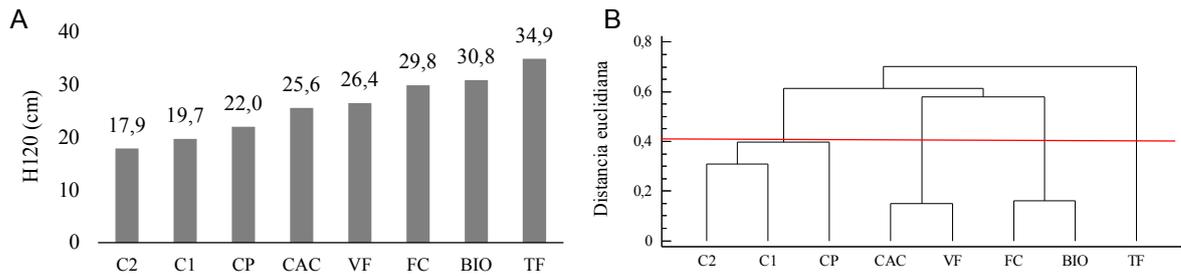


FIGURA 1.3 - ALTURA DE MUDAS DE *E. benthamii* AOS 120 DIAS (A) E ANÁLISE DE AGRUPAMENTO PELO MÉTODO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO DOS SUBSTRATOS COM BASE NO CRESCIMENTO (B). CAC - CASCA DE ARROZ CARBONIZADA; C1- CARVÃO VEGETAL COM GRANULOMETRIA ENTRE 1- 3 MM, C2-CARVÃO COM GRANULOMETRIA ENTRE 3- 5 MM, FC- FIBRA DE COCO, CP- CASCA DE PINUS SEMIDECOMPOSTA, VF-VERMICULITA FINA, BIO- BIODISSÓLIDO E TF- TURFA.

Apenas 7 das 18 combinações avaliadas apresentaram valor significativo ( $\alpha < 0,05$ ): CAC/FC, CAC/TF, C1/TF, C2/TF, CP/FC, CP/BIO, CP/TF (Apêndice 1.3). Contudo, observa-se tendência no crescimento das mudas, com o aumento da proporção de um componente em relação ao outro (FIGURA 1.4).

Dentre os resultados significativos, observou-se crescimento linear das plantas com o aumento da proporção de fibra de coco e turfa à casca de arroz carbonizada. Comportamento semelhante foi verificado ao adicionar fibra de coco, biodissólido e turfa à casca de pinus; turfa ao carvão com granulometria entre 1- 3 mm e vermiculita fina ao carvão com granulometria entre 3- 5 mm (FIGURA 1.4).

De maneira geral, observou-se dentre os componentes testados, que a adição de casca de pinus e carvão vegetal aos demais componentes proporcionou redução no crescimento das plantas. Já quando combinados entre si, não se verificou diferença significativa no crescimento (FIGURA 1.4).

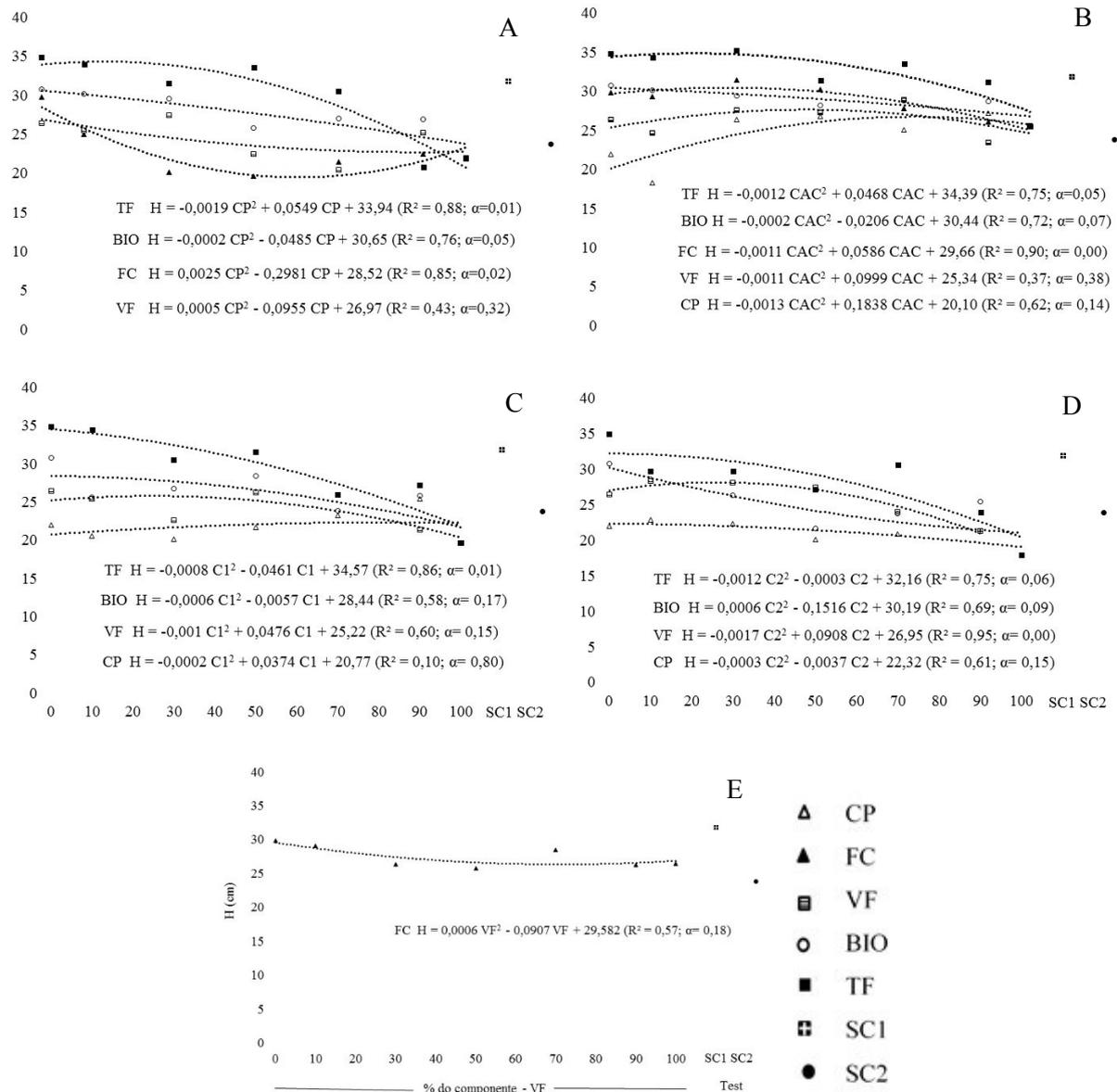


FIGURA 1. 4 - REGRESSÃO POLINOMIAL PARA A ALTURA AOS 120 DIAS DE MUDAS DE *E. benthamii* PRODUZIDAS EM SUBSTRATOS FORMULADOS A PARTIR DE DOIS COMPONENTES (VOLUME/VOLUME) EM DIFERENTES PROPORÇÕES. CASCA DE PINUS (CP), CASCA DE ARROZ CARBONIZADA (CAC), CARVÃO VEGETAL COM GRANULOMETRIA ENTRE 1-3 MM (C1), CARVÃO COM GRANULOMETRIA ENTRE 3-5 MM (C2), FIBRA DE COCO (FC), VERMICULITA FINA (VF), TURFA (TF) E BISSÓLIDO (BIO). CP/TF, CP/BIO, CP/BIO, CP/FC E CP/VF (A); CAC/TF, CAC/BIO, CAC/FC, CAC/FC, CAC/FC, CAC/FC, CAC/VF, CAC/CP (B); C1/TF, C1/BIO, C1/VF, C1/CP (C); C2/TF, C2/BIO, C2/VF, C2/TF (D); FC/VF (E). TRATAMENTOS TESTEMUNHA: SUBSTRATO COMERCIAL A BASE DE TURFA (SC1) E SUBSTRATO COMERCIAL A BASE DE CASCA DE PINUS SEMIDECOMPOSTA (SC2).

Pode-se verificar que a adição de turfa, fibra de coco e biofóssido à casca de arroz carbonizada proporcionou aumento no crescimento das mudas, enquanto que a casca de pinus apresentou comportamento contrário, em que doses acima de 70% tornaram o crescimento insatisfatório (abaixo de 25 cm, aos 120 dias). Em relação à

fibra de coco, recomenda-se a sua utilização em até 70 %, combinado com a casca de arroz carbonizada (FIGURA 1.4 B).

Em se tratando dos substratos comerciais, verificou-se maior crescimento nas mudas de *E. benthamii* do substrato a base de turfa. De forma semelhante à casca de pinus, o substrato comercial a base deste elemento proporcionou menor crescimento das plantas (23,8 cm), quando comparado com o substrato comercial à base de turfa (31,8 cm) (FIGURA 1.4 A).

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS E CRESCIMENTO

O resultado encontrado na análise de agrupamento denota que os elementos casca de arroz carbonizada e biossólido não podem ser substituídos por nenhum dos elementos estudados, devido a característica de alta macroporosidade da casca de arroz carbonizada (56,9%) e alta microporosidade associada à densidade aparente do biossólido (56,3 %; 583,3 Kg m<sup>-3</sup>). Os resultados encontrados indicam que deve-se combinar os elementos do G1 e G2 ao G3 e G4, a fim de melhorar suas características físicas, obtendo como resultado substratos com maior equilíbrio entre macro e microporos. Apesar de não estarem no mesmo grupo, os componentes a base de carvão vegetal não devem ser combinados com a casca de arroz carbonizada, pois todos os componentes apresentam baixa capacidade de retenção de água e, ou microporosidade (FIGURA 1.2 C).

Os materiais com baixa densidade elevam a macroporosidade das misturas e reduzem a capacidade de retenção de água do substrato (CALDEIRA *et al.*, 2014, p.199), conforme verificado com o aumento da proporção de casca de arroz carbonizada e diferentes granulometrias de carvão. Em contrapartida, os materiais leves como fibra de coco e vermiculita, ocasionaram aumento na capacidade de retenção de água, devido a presença de poros internos (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 95; KRATZ *et al.*, 2013a., p. 1106).

Os diferentes resultados de retenções de água indicam a necessidade de manejos hídricos específicos para cada composição de substrato (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 99). Em mudas de *E. grandis* produzidas em dois substratos comerciais submetidos a diferentes lâminas de irrigação, o crescimento está associado ao substrato e ao regime de irrigação a ele aplicado, conforme observado por Lopes *et al.* (2007, p. 838).

A similaridade entre as propriedades físicas corroborou com o resultado observado no crescimento das mudas. Excetuando-se a casca de pinus, os substratos com maior capacidade de retenção de água apresentaram maior crescimento das mudas, denotando a exigência hídrica da espécie, o que pode ser justificado pelas elevadas temperaturas observadas no período de produção, associada ao programa de irrigação aplicado (TABELA 1.1).

Os resultados indicam que a casca de pinus, quando utilizada em altas proporções, não é adequada para produção de mudas de *E. benthamii*, devido o menor crescimento observado com a utilização do substrato comercial a base deste elemento (23,8 cm) em comparação com o substrato comercial a base turfa (31,8 cm). Estes resultados corroboram com outros trabalhos de pesquisa com *Eucalyptus* (KRATZ *et al.*, 2013 b, p. 612; KRATZ; WENDLING, 2013, p.129).

A utilização do resíduo de carvão vegetal mostrou-se inadequado como componente de substratos, independente do elemento associado, devido à redução no crescimento das mudas quando adicionado ao substrato (FIGURA 1.5 D e E). Este resultado pode estar ligado à baixa capacidade de retenção de água associada ao alto pH (FIGURA 1.2).

Em contrapartida, a utilização de substratos orgânicos tem-se mostrado viável, o que de acordo com Guerrini e Trigueiro (2004, p. 1073, 1074), está relacionado a maior capacidade de retenção de água e nutrientes destes. Isto se confirma em resultados observados com a utilização de bio-sólido nas espécies *E. grandis* e *E. benthamii* (TRIGUEIRO; GUERRINI, 2004, p. 156; KRATZ *et al.*, 2013 c., p. 534), com o composto orgânico de resíduo agroindustrial em mudas de *E. grandis* (SILVA *et al.*, 2014, p. 611, 613) e com substratos contendo esterco de curral curtido, em mudas de *E. grandis* em relação a casca de arroz carbonizada, vermiculita e fibra de coco (MELO *et al.*, 2014, p. 239).

Em relação às propriedades químicas, a divisão dos substratos em apenas dois grupos, justifica-se pelo fato do bio-sólido ter apresentado maior dissimilaridade

a um maior número de propriedades químicas, em relação aos demais componentes, obtendo destaque para os altos valores de magnésio, enxofre e condutividade elétrica (FIGURA 1.4). Segundo Caldeira *et al.* (2014, p. 200) a alta condutividade elétrica do biossólido está atrelada a sua alta concentração de sais, corroborando com Guerrini e Trigueiro (2004, p. 1073) e Kratz *et al.* (2013b, p. 616).

A condutividade elétrica do substrato não deve exceder o limite de  $1,0 \text{ mS.cm}^{-1}$  (GONÇALVES *et al.*, 2000, p. 318), estando apenas o biossólido fora do padrão (FIGURA 1.2 F). Entretanto, dentre os componentes avaliados, o mesmo toma a segunda posição quanto ao crescimento (FIGURA 1.4), indicando que o *E. benthamii* tolera altos níveis de salinidade, conforme verificado por Kratz *et al.* (2013 b., p. 616) onde substratos com CE variando de 0,1 a 2,6 mS/cm proporcionaram crescimento adequado das plantas. Da mesma forma, conforme verificado por Mendonça *et al.* (2010, p. 261), mudas de *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* e *E. robusta* apresentaram-se resistentes a salinidade até a condutividade elétrica de  $8,33 \text{ dS m}^{-1}$ , observando que a mesma não provocou redução no teor de clorofila, o que em plantas sensíveis a salinidade é um fator importante.

O pH apresentou correlação negativa com o crescimento ( $R = -0,48^{**}$ ), corroborando com o menor crescimento observado nos substratos a base de moinha de carvão (pH= 9,7; 8,9) e casca de arroz carbonizada (pH= 7,4), entretanto o biossólido com pH alcalino (9,1) proporcionou crescimento adequado das plantas, denotando que não se pode inferir sobre o crescimento das plantas utilizando apenas esta propriedade. De maneira geral, substratos com pH abaixo de 5,0 podem ocasionar deficiência de nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e boro às plantas, enquanto que em pH acima de 6,5 são esperadas deficiências de fósforo, ferro, manganês, zinco e cobre (VALERI; CORRADINI, 2000, p. 174). Contudo, espécies do gênero *Eucalyptus* tem mostrado tolerância às variações desse índice, conforme observado em mudas de *E. benthamii* (KRATZ *et al.*, 2013 b, p. 616) e *E. urophylla* (OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2011, p. 1175), produzidas em substratos com distintos valores de pH, proporcionando crescimento adequado.

## 4.2 CUSTO

O maior custo dos substratos comerciais em relação aos componentes denota a possibilidade da formulação do substrato no viveiro, a fim de reduzir custos, embora com a necessidade de realizar testes prévios visando adequações das formulações às diferentes espécies e condições de cultivo. A utilização de substratos com baixo custo aliada a formação de mudas com padrão morfológico superior às demais, resulta na redução do ciclo de produção e num menor dispêndio econômico (SIMÕES *et al.*, 2012, p. 98). Cabe ressaltar que o uso de resíduos regionais reduz substancialmente o custo do substrato (MELO *et al.*, 2014, p. 237; WENDLING *et al.*, 2007, p. 212), embora os custos possam sofrer variações em função da disponibilidade de cada material (WENDLING *et al.*, 2007, p. 211).

Dentre as combinações que não apresentaram influência significativa ( $\alpha > 0,05$ ) justifica-se utilizar os componentes a base de carvão na formulação de substratos, a fim de reduzir custos, principalmente quando combinados com vermiculita e turfa, associado ao fator que, mesmo apresentando crescimento inferior, as plantas atingiram a altura mínima indicada para o plantio (15 cm) (WENDLING; DUTRA, 2010, p. 43). Entretanto, mudas maiores, acarretam em um maior arranque inicial em campo, reduzindo a competição com as plantas invasoras, promovendo a diminuição de gastos com tratamentos culturais (FIGUEIREDO *et al.*, 2011, p. 2).

## 5 CONCLUSÕES

- Diferentes materiais e formulações de substratos podem ser adotadas para a produção de mudas de *E. benthamii*, com superioridade daquelas com maior capacidade de retenção de água, turfa, bio-sólido e fibra de coco.
- O resíduo regional bio-sólido apresentou o menor custo aliado ao bom crescimento das plantas e a utilização da moínha de carvão justifica-se a fim de reduzir os custos de produção.
- A casca de pinus semidecomposta e diferentes granulometrias de moínha de carvão proporcionaram redução no crescimento das mudas.
- Os substratos foram agrupados em quatro grupos pelas propriedades físicas: G1- constituído por elementos de alta macroporosidade (casca de arroz carbonizada); G2- equilíbrio entre macro e microporos (duas granulometrias de carvão), G3- maior

proporção de microporos (fibra de coco, vermiculita fina, turfa e casca de pinus) e G4- alta densidade associada à alta microporosidade (biossólido).

- Os substratos foram agrupados em dois grupos pelas propriedades químicas: G1- menor fertilidade (casca de arroz carbonizada, duas granulometrias de carvão, fibra de coco, vermiculita fina, casca de pinus e turfa) e G2- maior fertilidade (biossólido).

## 6 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. A.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; SANTOS, E. S.; STOSIC, B.; SOUZA, A. L. Estabilidade em análise de agrupamento: estudo de caso em ciência florestal. **R. Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 257-265, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 148 p.

CALDEIRA, M. V. W.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A.; DELARMELINA, W. M.; ROCHA, R. L. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando lodo de esgoto, fibra de coco e palha de café *in natura*. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 2, p. 195-206, 2014.

CALDEIRA, M. V. W.; WENDLING, I.; PENCHEL, R. M.; GONÇALVES, E. O.; KRATZ, D.; TRAZZI, P. A. Propriedades de substratos para produção de mudas florestais. In: CALDEIRA, M. V. W.; GARCIA, G. O.; GONÇALVES, E. O.; ARANTES, M. D. C.; FIEDLER NC (Eds.) **Contexto e Perspectivas da Área Florestal no Brasil**. Alegre: Suprema, 2011, p.141-160.

FIGUEIREDO, F. A. M. M.; CARNEIRO, J. G. A.; PENCHEL, R. M.; BARROSO, D. G.; DAHER, R. F. Efeito das variações biométricas de mudas clonais de eucalipto sobre o crescimento no campo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.1, p.01-11, 2011.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 577-582, 2012.

GOMES, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; SANTERELLI, E. G.; NETO, S. P. M.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000, p. 309 - 350.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1069-1076, 2004.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES JR, F. T.; GENEVE, R. **Plant propagation: principles and practices**. 8th. ed. Boston: Prentice-Hall, 2011. 915 p.

HIGA, R. C. V.; PEREIRA, J. C. D. Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Comunicado Técnico**, 100. Embrapa Florestas, Colombo, Paraná. 4 p. 2003.

KRATZ, D.; WENDLING, I. Produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* em substratos renováveis. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 125 - 136, 2013.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1103-1113, 2013a.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 607-621, 2013b.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Utilização de resíduos urbanos e agrofloretais para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 530-537, 2013c.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; PIRES, P. P. Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii* x *E. dunnii* em substratos a base de casca de arroz carbonizada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 547-556, 2012.

LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C. Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 835-843, 2007.

MELO, L. A.; PEREIRA, G. A.; MOREIRA, E. J. C.; DAVIDE, A. C.; SILVA, E. V.; TEIXEIRA, L. A. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* e *Eremanthus erythropappus* sob diferentes formulações de substrato. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 2, p. 234-242, 2014.

MENDONÇA, A. V. R.; CARNEIRO, J. G de; FREITAS, T. A. S de; BARROSO, D. G. Características fisiológicas de mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a estresse salino. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 255-267, 2010.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa SDA Nº 17**. Diário Oficial da União- Seção 1, nº 99, 24 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos para Plantas e Condicionadores de Solo. Brasília, 2007.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa SDA nº 3**, de 13 de março de 2013. Diário Oficial da União - Seção 1, nº 2.200-2 de 24/08/2001. Brasília. 2013.

NOGUEIRA, A. R. de A.; SOUZA, G. B. de (Ed.). **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005.

OLIVEIRA JUNIOR; O. A. de; CAIRO, P. A. R.; NOVAES, A. B. de. Características morfofisiológicas associadas à qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla*

produzidas em diferentes substratos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 6, p.1173-1180, 2011.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas - CNPF, 2006. 45 p. (Documentos, 129).

PARANÁ. **Lei nº 18.059, de 01 de maio de 2014**. Diário Oficial do estado do Paraná, Curitiba, 02.05. 2014. Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://www.normaslegais.com.br/legislacao/Lei-pr-18059-2014.htm>>

SILVA, R. F.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; FABBRIS, F.; WEIRICH, S. W.; PINHEIRO, R. R. Produção de mudas de *Eucalyptus grandis* em substratos orgânicos alternativos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 609-619, 2014.

SIMÕES, D.; SILVA, R. B. G da.; SILVA, M. R da. Composição do substrato sobre o desenvolvimento, qualidade e custo de produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 91-100. 2012.

TRIGUEIRO, R. DE M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 64, p. 150-162, 2003.

VALERI, S. V., CORRADINI, L. Fertilização em viveiros para produção de mudas de *Eucalyptus* e *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.167-.189.

WENDLING, I.; DUTRA, L. F. Produção de mudas de eucalipto por sementes. In: WENDLING, I.; DUTRA, L. F. **Produção de mudas de eucalipto**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. p. 13 - 47.

WENDLING, I.; GUASTALA, D; DEDECEK, R. Características físicas e químicas de substratos para produção de mudas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, p. 209-220, 2007.

XAVIER A., WENDLING I. SILVA. R. L. 2013. **Silvicultura clonal: princípios e técnicas**. Viçosa, MG: 2 ed. rev. ampl. UFV. 279 p.

## CAPITULO 2 - ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS POR MEIO DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO

### RESUMO

Os fatores intrínsecos dos substratos que afetam o crescimento das plantas são suas propriedades físico-químicas e a sua determinação é um processo demorado e dispendioso. Baseado nisto, objetivou-se avaliar a técnica da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para estimativa das mesmas. Para tanto foram formulados 110 substratos e avaliadas suas propriedades pelo método tradicional (MAPA, 2007) e os espectros no infravermelho próximo foram obtidos no espectrômetro FEMTO, com intervalo de 1 nm na faixa espectral de 1.100 a 2.500 nm. As amostras foram divididas em dois grupos: 2/3 (73 amostras) foram usadas para a construção do modelo de calibração PLS e 1/3 (37 amostras) para validação externa. Diferentes tratamentos matemáticos foram aplicados nos espectros e posteriormente foram selecionadas regiões espectrais significativas para construção dos modelos PLS. Como resultados verificou-se que o uso de modelos elaborados através da técnica NIR apresentou-se viável para a estimativa expedita das propriedades físicas e químicas de substratos, apresentando valores aceitáveis de coeficientes de determinação e erros de estimativa, aliado a adequados desvios de performance (acima de 1,5) para todas as características avaliadas, denotando a possibilidade de substituição da análise convencional. As propriedades com maior variabilidade amostral, densidade aparente ( $R^2=0,90$ ; RDP= 3,09) e condutividade elétrica ( $R^2=0,94$ ; RDP= 4,00) apresentaram os melhores modelos de estimativa, em contrapartida os piores resultados foram observados para a microporosidade ( $R^2p=0,60$ ; RDP= 1,60) e pH ( $R^2p=0,65$ ; RDP= 1,66). Modelos considerados muito bons foram ajustados para a densidade aparente e condutividade elétrica; bons para a macroporosidade e porosidade total; satisfatórios para a microporosidade e potencial hidrogeniônico.

**Palavras-chave:** regressão dos mínimos quadrados parciais; NIRS; mudas florestais; relação de desvio de performance.

## CHAPTER 2 - PREDICTION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SUBSTRATES FOR PLANTS PRODUCTION BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

### ABSTRACT

Intrinsic factors of the substrates that affect plant growth are their physicochemical properties and their determination is a lengthy and costly process. Based on this, the objective was to evaluate the near infrared spectroscopy (NIRS) to predict them. Therefore, we made 110 substrates and their properties evaluated by the traditional method and near infrared spectra were obtained in FEMTO spectrometer, with 1 nm interval in the spectral range 1100-2500 nm. The samples were divided into two groups: 2/3 (73 samples) were used to build the PLS calibration model, and third (37 samples) for external validation. Different mathematical treatments were applied in the spectra and significant spectral regions were subsequently selected for construction of the PLS models. As a result it was found that NIR technique proved to be feasible to estimate the expeditious physical and chemical properties of the substrate, with acceptable values for determining coefficients and prediction errors, combined with appropriate performance deviations (above 1.5) for all traits, indicating the possibility of replacing the conventional analysis. The properties with larger sample variability, bulk density ( $R^2p = 0.90$ , RDP = 3.09) and electrical conductivity ( $R^2p = 0.94$ , RDP = 4.00) showed the best prediction models, however the worst results were observed for microporosity ( $R^2p = 0.60$ ; RDP = 1.60) and pH ( $R^2p = 0.65$ ; RDP = 1.66).

**Keywords:** Partial least squares. NIRS. Forest seedlings. Ratio performance deviation.

## 1 INTRODUÇÃO

A principal função do substrato é sustentar a muda e fornecer condições adequadas para o desenvolvimento e funcionamento do sistema radicial, assim como os nutrientes necessários para o crescimento da planta (HARTMANN *et al.*, 2011, p. 78). Os fatores intrínsecos que afetam o crescimento das plantas são suas propriedades físico-químicas, que variam em função de sua origem, método de produção e proporções dos seus componentes, denotando a importância de realizar a análise de suas características (WENDLING *et al.*, 2007; KRATZ *et al.*, 2013b., p. 536; MELO *et al.*, 2014, p. 239).

Atualmente a análise das propriedades físico-químicas de substratos é regida pela instrução normativa nº 17 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007), contudo este procedimento é demorado e dispendioso. Desta maneira o uso de espectroscopia no infravermelho próximo (*near infrared spectroscopy* - NIRS) pode mostrar-se um método viável, tornando-se uma ferramenta útil e rápida para os laboratórios que realizam as análises das propriedades e para as fábricas de substratos no controle de qualidade do seu produto. A técnica NIRS consiste na aquisição de espectros de absorvância ou reflectância e na subsequente correlação destes com os valores das propriedades mensuradas convencionalmente, gerando modelos estatísticos multivariados que posteriormente serão utilizados para estimativa destas (WILLIAMS; NORRIS, 2001; PASQUINI, 2003, p. 212).

Sua grande vantagem em relação aos métodos tradicionais está na análise múltipla dos parâmetros através de determinações não-destrutivas da amostra, rapidez e menor necessidade de mão de obra. Pode ser aplicado em qualquer material que contenha em suas moléculas, principalmente, ligações de CH, O-H, N-H, S-H ou C=O (PASQUINI, 2003, p. 198; ANDRADE *et al.*, 2010; GENOT *et al.*, 2011; MILAGRES *et al.*, 2013).

A expectativa de bons resultados é devida a conhecida precisão do NIRS para estimativa de propriedades químicas de solos, como nitrogênio, carbono e CTC (GENOT *et al.*, 2011, p. 132), bem como na determinação dos teores de areia, silte e argila (MORON; COZZOLINO, 2003; p. 148, CURCIO *et al.*, 2013, p. 498), contudo estudos referentes a determinação das propriedades físico-químicas de substratos são desconhecidos.

Diante disto, o presente trabalho teve como objetivo utilizar a técnica da espectroscopia no infravermelho próximo para a obtenção de modelos de estimativa das propriedades físico-químicas de substratos para produção de mudas.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 PREPARO DOS SUBSTRATOS**

Foram utilizados dois substratos comerciais (à base de turfa e casca de pinus semidecomposta) e misturas de diferentes componentes (casca de arroz carbonizada, carvão vegetal, fibra de coco, casca de pinus semidecomposta, vermiculita fina, biossólido e turfa) para a formulação de 110 substratos (TABELA 2.1).

Utilizou-se moinha de carvão vegetal oriunda de madeira de reflorestamento dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* para a obtenção de duas granulometrias (3-5 mm e 1-3 mm). Para tanto, foram utilizadas três peneiras com malhas de 5, 3 e 1 mm. A casca de arroz carbonizada e o biossólido foram preparados conforme metodologia descrita por Kratz et al. (2013 a., p. 1105) e os componentes vermiculita fina (granulometria ao redor de 0,71 a 2 mm), fibra de coco (granulometria em torno de 0,25 a 2 mm), turfa (origem sul brasileira), casca de pinus semidecomposta e os substratos comerciais foram adquiridos em uma fábrica produtora de substratos.

TABELA 2.1 - MATERIAIS UTILIZADOS (%) NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS (VOLUME/VOLUME).

S	CAC	C1	C2	FC	CP	VF	BIO	TF	S	CAC	C1	C2	FC	CP	VF	BIO	TF		
1	100								56		90						10		
2		100							57		70						30		
3			100						58		50						50		
4				100					59		30						70		
5					100				60		10						90		
6						100			61			90	10						
7							100		62			70	30						
8								100	63			50	50						
9	Substrato comercial a base de turfa											64		30	70				
10	Substrato comercial a base de casca de pinus											65		10	90				
11	90			10					66		90			10					
12	70			30					67		70			30					
13	50			50					68		50			50					
14	30			70					69		30			70					
15	10			90					70		10			90					
16	90				10				71		90				10				
17	70				30				72		70				30				
18	50				50				73		50				50				
19	30				70				74		30				70				
20	10				90				75		10				90				
21	90					10			76		90					10			
22	70					30			77		70					30			
23	50					50			78		50					50			
24	30					70			79		30					70			
25	10					90			80		10					90			
26	90						10		81		90						10		
27	70						30		82		70						30		
28	50						50		83		50						50		
29	30						70		84		30						70		
30	10						90		85		10						90		
31	90							10	86				10	90					
32	70							30	87				30	70					
33	50							50	88				50	50					
34	30							70	89				70	30					
35	10							90	90				90	10					
36		90		10					91					90	10				
37		70		30					92					70	30				
38		50		50					93					50	50				
39		30		70					94					30	70				
40		10		90					95					10	90				
41		90			10				96					90		10			
42		70			30				97					70		30			
43		50			50				98					50		50			
44		30			70				99					30		70			
45		10			90				100					10		90			
46		90				10			101					90			10		
47		70				30			102					70			30		
48		50				50			103					50			50		
49		30				70			104					30			70		
50		10				90			105					10			90		
51		90					10		106				90		10				
52		70					30		107				70		30				
53		50					50		108				50		50				
54		30					70		109				30		70				
55		10					90		110				10		90				

S- Substrato; CAC- Casca de arroz carbonizada; C1- carvão vegetal com granulometria entre 3- 5 mm; C2- carvão vegetal com granulometria entre 1- 3 mm; FC- fibra de coco; CP- casca de pinus semidecomposta; VF- vermiculita fina; BIO- bio sólido e TF- turfa.

## 2.2 ANÁLISE CONVENCIONAL DOS SUBSTRATOS

A caracterização física e química dos substratos foi realizada no Laboratório de Manejo de Bacias hidrográficas da Universidade Federal do Paraná e Laboratório de Química do Solo da Embrapa Florestas, respectivamente, conforme a metodologia descrita na Instrução Normativa nº 17 do Ministério da agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007).

Através desta instrução normativa, obteve-se os valores de densidade aparente (Dap), capacidade de retenção de água a uma tensão de 10 cm (CRA 10) ou microporosidade (micro), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE). A partir destes resultados, obteve-se a porosidade total (Pt) e macroporosidade (Macro). A Pt corresponde ao volume de água retido no substrato na tensão 0 hPa (totalmente saturado), enquanto que a macroporosidade consiste na diferença entre a Pt do substrato e o volume de água retido a 10 hPa (CRA 10 ou microporosidade) (DE BOODT; VERDONCK, 1972, p. 39, 40).

## 2.3 OBTENÇÃO DOS ESPECTROS DE NIR

As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Embrapa Florestas. Primeiramente os substratos (TABELA 1.1) foram secos em estufa a 65 °C e acondicionados em embalagem plástica, a fim de manter o material sem umidade e eliminar a influência da água nos espectros.

As análises de refletância difusa de infravermelho próximo (NIRS) aplicadas aos substratos foram realizadas com o uso do espectrofotômetro FEMTO modelo FemWin 900, com intervalo de 1 nm na faixa de 1.100 a 2.500 nm (Figura 2.1). Este equipamento realiza 200 vareduras por leitura e envia o valor médio de  $\log(1/R)$  para o computador, gerando o espectro da amostra/substrato.

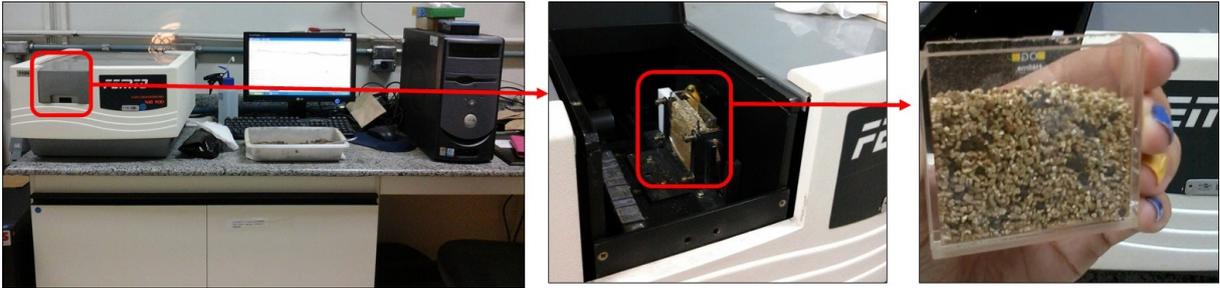


FIGURA 2. 1 - ESPECTROFOTÔMETRO FEMTO E CUBETA DE QUARTZO CONTENDO UMA AMOSTRA.

Primeiramente as amostras foram homogeneizadas em bandeja plástica e posteriormente colocadas em cubeta de quartzo para obtenção do espectro (FIGURA 2.1). Este procedimento foi realizado em triplicata, sendo calculado o espectro médio para utilização na calibração e estimativa das propriedades.

## 2.4 CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA

As amostras foram divididas em dois grupos: 2/3 (73 amostras) foram usadas para a construção do modelo de calibração e 1/3 (37 amostras) para estimativa ou validação externa. Para tanto, para cada propriedade, as amostras foram organizadas em ordem ascendente, selecionando duas amostras a cada três, formando o grupo de calibração, e as amostras remanescentes formaram o grupo de validação externa. Este procedimento permite alto controle da variabilidade em cada subgrupo.

As calibrações foram ajustadas pelo método de regressão dos mínimos quadrados parciais (Partial Least Squares - PLS) utilizando o software Unscrambler® (CAMO AS, Norway) versão 10. Primeiramente, foram testados os seguintes tratamentos matemáticos nos espectros: alisamento (polinomial de segunda ordem e 5 pontos de cada lado), normalização máxima, standard normal variate (SNV), primeira e segunda derivada (polinomial de segunda ordem e 5 pontos de cada lado). Posteriormente as amostras classificadas como “*outliers*” ou anômalas no gráfico de resíduos de Student foram detectadas e excluídas dos modelos. A seguir foram selecionadas faixas espectrais que melhor se relacionaram com a propriedade de interesse, utilizando para tanto, o algoritmo JackKnife.

Após o ajuste do modelo de calibração foi realizada a sua validação, utilizando os métodos de validação cruzada (Cross validation) e externa. A fim de avaliar a qualidade dos modelos utilizou-se os seguintes parâmetros estatísticos: número de fatores (LV – latent variables), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE - Root Mean Squared Error), erro padrão (SE – standard error) e a razão de performance (RDP - ratio deviation performance), índice correspondente a relação do desvio padrão dos dados obtidos convencionalmente e o erro padrão da validação (RPD= SD/SE). Para a classificação da qualidade dos modelos ajustados, levou-se em consideração o valor do RDP (Tabela 2.2).

TABELA 2. 2 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO AJUSTADO BASEADO NO ÍNDICE RAZÃO DE PERFORMANCE (RDP).

Qualidade do Ajuste	Valor do RDP
Muito bom	$\leq 2,01$
Bom	1,76 – 2,00
Satisfatório	1,50 – 1,75
Inadequado <sup>1</sup>	$\geq 1,49$

<sup>1</sup> Baseado em Schimleck *et al.* (2003).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros estatísticos descritivos, para os grupos de calibração e estimativa, mostraram alta variabilidade entre os substratos estudados (TABELA 2.3). Aliado a não superposição dos espectros obtidos, denotando potencial para obtenção de bons modelos de calibração e posterior estimativa das propriedades físico-químicas (FIGURA 2.2 A).

TABELA 2.3 - RESUMO DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS DOS GRUPOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO EXTERNA. DENSIDADE APARENTE (Dap), POROSIDADE TOTAL (Pt), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Grupo de calibração					Grupo de Validação externa				
	Min.	Máx.	Méd.	SD	CV	Min	Máx.	Méd.	SD	CV
Dap (Kg m <sup>3</sup> )	63,8	594,7	266,35	126,47	47,48	73,86	583,35	266,94	127,59	47,79
Pt (%)	41,17	81,27	67,65	8,75	12,93	42,14	80,02	67,63	8,80	13,01
Macro (%)	10,80	56,90	28,70	10,58	36,86	11,55	55,50	28,76	10,74	37,34
Micro (%)	11,36	61,20	38,87	10,12	26,03	16,31	58,39	38,97	10,05	25,78
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	0,03	4,26	0,83	1,18	142,16	0,03	4,11	0,83	1,20	144,57
pH	4,10	9,70	7,38	1,43	19,37	4,12	9,49	7,38	1,44	19,51

Min. – mínimo; Máx. - máximo; Méd. – média; SD- desvio padrão; CV – coeficiente de variação (%).

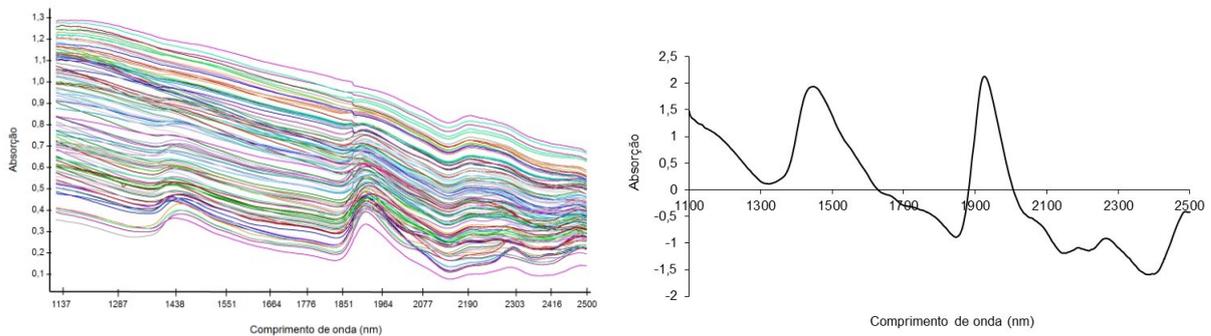


FIGURA 2.2 - ESPECTROS DOS SUBSTRATOS OBTIDOS NO ESPECTROFOTÔMETRO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (A). ESPECTRO DE UM SUBSTRATO APÓS TRATAMENTO MATEMÁTICO (B).

Cabe ressaltar a importância da elaboração de adequados grupos de calibração e estimativa, os quais devem representar toda a amplitude de variação das amostras (PASQUINI, 2003, p. 213; BAILLERES *et al.*, 2002, p. 485; WETTERLIND *et al.*, 2013, p. 96), conforme observado na Tabela 2.3, o grupo de calibração contém os menores valores mínimos e maiores máximos, comparado ao grupo de estimativa. Desta maneira, qualquer amostra estimada, estará dentro da faixa de valores utilizados na construção do modelo de calibração, diminuindo o erro de estimativa.

Dentre os diversos tratamentos matemáticos avaliados, obteve-se os melhores resultados tratando os espectros com alisamento seguido da primeira derivada, para todas as propriedades (TABELA 2.4, FIGURA 2.2 B). O alisamento proporciona redução dos ruídos e melhora a definição dos picos, enquanto a derivada realça as diferenças não observadas nos espectros originais e que apresentam importância na modelagem.

TABELA 2.4 - RESULTADOS DOS MODELOS PLS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS. DENSIDADE APARENTE (Dap), POROSIDADE TOTAL (Pt), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Trat	LV	R <sup>2</sup> c	RMSE	SE	RDP
Dap (kg m <sup>-3</sup> )	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	2	0,92	36,39	36,64	3,45
Pt (%)	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	2	0,66	5,04	5,07	1,73
Macro (%)	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	4	0,85	4,08	4,11	2,57
Micro (%)	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	6	0,77	4,86	4,89	2,07
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	4	0,89	0,39	0,39	3,03
pH	Als. + 1Dv. <sup>2</sup>	6	0,69	0,79	0,80	1,79

1: Als. (alisamento - polinomial de segunda ordem e 5 pontos de cada lado) e 1 Dv. (primeira derivada - polinomial de segunda ordem e 5 pontos de cada lado); <sup>2</sup> (alisamento - polinomial de segunda ordem e 10 pontos de cada lado) e 1 Dv. (primeira derivada - polinomial de segunda ordem e 10 pontos de cada lado); LV – número de variáveis latentes; R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; RMSE - erro quadrático; SE - erro padrão; RDP - relação de desempenho do desvio.

Verificou-se que até seis variáveis latentes ou fatores PLS foram suficientes para o desenvolvimento de modelos com menor erro de estimativa, sendo que para densidade aparente e porosidade total apenas 2 fatores foram utilizados (TABELA 2.4). Estes resultados são similares aos verificados em trabalhos relacionados a materiais heterogêneos, como solos (GENOT *et al.*, 2011, p.128; GE *et al.*, 2011, p.207; KNADEL *et al.*, 2013, p. 75). Cabe ressaltar, que quanto maior o número de variáveis, maior a complexidade do modelo (MORGANO *et al.*, 2007, p. 348), bem como, aumento de ruídos (KNADEL *et al.*, 2013, p. 75).

Em relação aos comprimentos de onda utilizados para a construção dos modelos de estimativa, verificou-se que apesar de não ter sido utilizada toda a informação espectral, um grande número de variáveis, distribuídas ao longo do espectro, foi selecionada. De maneira geral, foram utilizadas faixas espectrais semelhantes para todas as propriedades dos substratos, diferenciando os modelos principalmente pelo coeficiente de regressão (FIGURA 2.3), indicando as regiões do espectro com maior importância para a determinação de cada propriedade.

Os espectros dos substratos são semelhantes aos observados em solos, onde as bandas próximas a 1400, 1900 e 2000 nm apresentam maior absorbância (FIGURA 2.2 A) (GENOT *et al.*, 2011, p. 125; CURCIO *et al.*, 2013, p. 498; KNADEL *et al.*, 2013, p. 73). Além dos picos observados nos espectros, nas bandas próximas a 1400, 1900 e 2300 nm (FIGURA 2.2 B), verificou-se que outras faixas do espectro são importantes na construção dos modelos de estimativa, conforme também verificado por Curcio *et al.* (2013, p. 501) e Knadel *et al.* (2013, p. 77) na determinação da textura e matéria orgânica de solos, respectivamente.

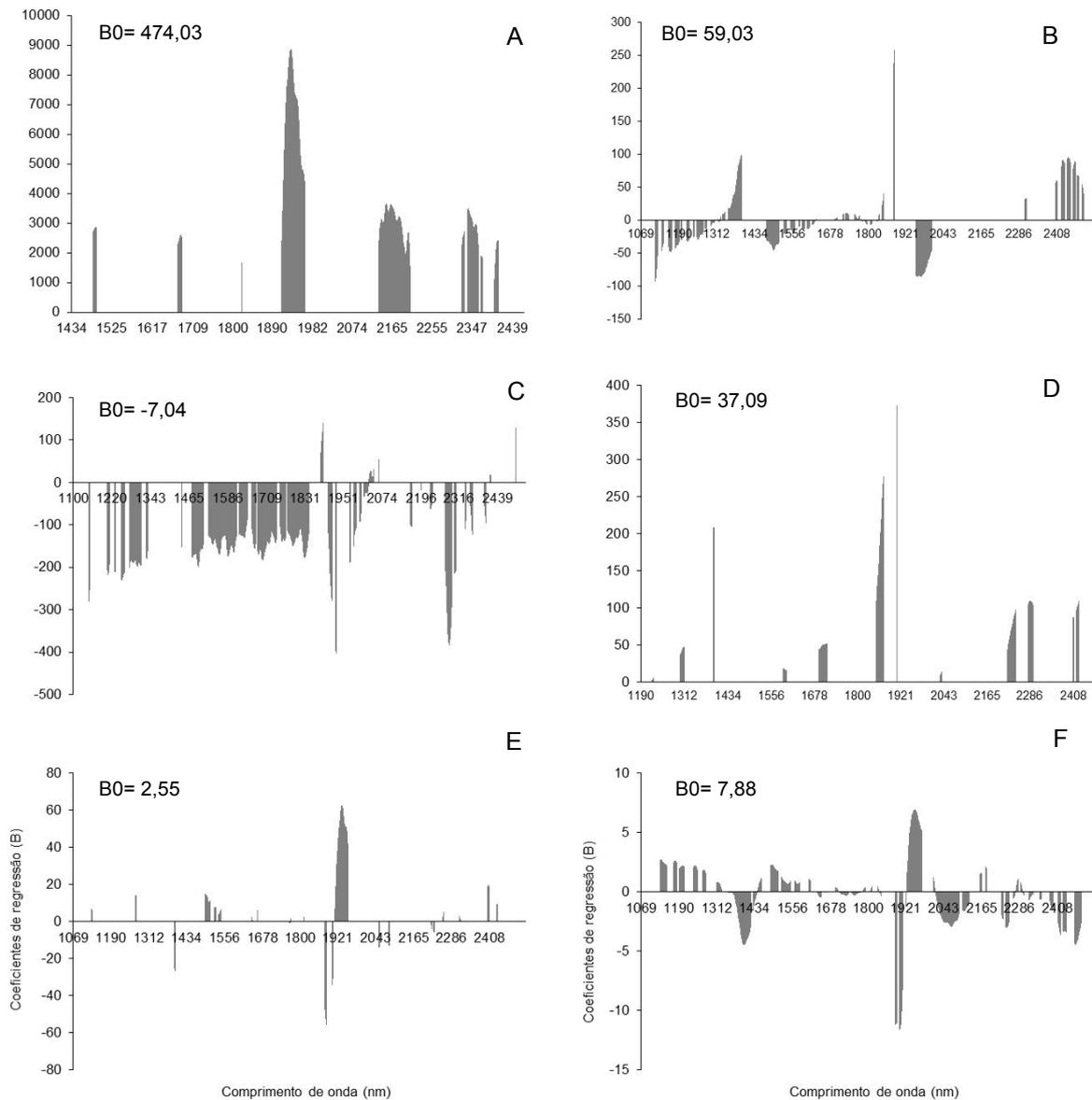


FIGURA 2.3 - COEFICIENTE DE ESTIMATIVA UTILIZADOS NO MODELO PLS PARA CADA COMPRIMENTO DE ONDA SELECIONADO. DENSIDADE APARENTE (A). POROSIDADE TOTAL (B). MACROPOROSIDADE (C). MICROPOROSIDADE (D). CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (E) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (F).

Diferentemente de outros trabalhos, com composição química conhecida, a determinação precisa dos grupos funcionais relacionados com as bandas de absorção é dificultada, pois distintos materiais foram utilizados na formulação dos substratos (TABELA 2.1). O resultado está correlacionado com composição orgânica dos substratos, aliado aos diferentes tamanhos das partículas e a porosidade entre elas, influenciando diretamente na reflectância. Diversas partes do espectro infravermelho têm-se mostrado correlacionável com a matéria orgânica do solo, entretanto os picos

não são facilmente visíveis, como observado na Figura 2.2 (WETTERLIND *et al.*, 2013, p. 98; KNADEL *et al.*, 2013, p. 77).

A matéria orgânica apresenta alta correlação com as propriedades físico-químicas dos substratos (KRATZ *et al.*, 2013 a, p. 1108). Segundo Moron e Cozzolino (2003, p. 145) a matéria orgânica é formada por carbono, oxigênio e nitrogênio e apresenta grande correlação com as propriedades físicas e químicas dos solos, o que torna possível a estimativa destas propriedades via NIRS.

Em relação aos parâmetros do modelo ajustado, os melhores resultados foram observados para as propriedades com maior desvio padrão e coeficiente de variação, sendo essas a densidade total e a condutividade elétrica (TABELAS 2.3 e 2.4). A alta amplitude de variação da densidade aparente deve-se ao fato que a elaboração dos tratamentos foi baseada nesta propriedade, sendo escolhidos como componentes materiais com densidades variadas, desde o biossólido ( $583,3 \text{ kg m}^{-3}$ ), material mais denso, até materiais leves como a fibra de coco ( $79,4 \text{ kg m}^{-3}$ ) e casca de arroz carbonizada ( $96,4 \text{ kg m}^{-3}$ ).

Os modelos gerados para estimativa das propriedades físico-químicas dos substratos se mostraram precisos, quando observados os parâmetros da validação cruzada, que utiliza as mesmas amostras usadas na calibração para a estimativa (TABELA 2.5). Esta validação justifica-se apenas quando se trabalha com um pequeno número de amostras (ANDRADE *et al.* 2012, p. 659). No entanto, para comprovação da efetividade do modelo calibrado é preciso realizar a validação externa, a qual avalia o poder de previsão do modelo construído utilizando amostras que não participaram da etapa de calibração (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 869).

TABELA 2.5 - PARAMETROS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA E EXTERNA DOS MODELOS. DENSIDADE APARENTE (Dap), POROSIDADE TOTAL (Pt), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Validação Cruzada				Validação Externa			
	R <sup>2</sup>	RMSE	SE	RDP	R <sup>2</sup>	RMSE	SE	RDP
Dap ( $\text{kg m}^{-3}$ )	0,91	37,69	38,01	3,33	0,90	39,92	41,26	3,09
Pt (%)	0,63	5,35	5,39	1,62	0,74	4,39	4,43	1,99
Macro (%)	0,82	4,51	4,54	2,33	0,68	6,03	6,11	1,76
Micro (%)	0,72	5,40	5,44	1,86	0,60	6,23	6,30	1,60
CE ( $\text{mS cm}^{-1}$ )	0,86	0,44	0,45	2,62	0,94	0,27	0,30	4,00
pH	0,61	0,91	0,91	1,57	0,65	0,84	0,87	1,66

R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; RMSE - erro quadrático; SE - erro padrão; RDP - relação de desempenho do desvio.

Os resultados da validação externa, em relação a qualidade do ajuste dos modelos, baseado no índice RDP, foram muito bons ( $RDP \leq 2,01$ ) para a condutividade elétrica e densidade aparente, bons ( $RDP$  entre 1,76 – 2,00) para a macroporosidade e porosidade total e satisfatórios ( $RDP$  entre 1,50 e 1,75) para a microporosidade e potencial hidrogeniônico (TABELA 2.5). O RPD está dentro do considerado adequado para todas as propriedades (acima de 1,5), já que o erro de estimativa não pode ser menor que o erro da medida convencional, denotando a possibilidade de substituição da análise convencional, principalmente quando não faz-se necessário a exatidão dos valores (SCHIMLECK *et al.*, 2003; FUJIMOTO *et al.*, 2008, p. 534).

Ao se referir à estimativa da densidade aparente, pode-se observar uma distribuição homogênea do erro de estimativa, denotando que o modelo construído não foi tendencioso (FIGURA 2.3 A). Este resultado, mostra a adequada amostragem para construção da curva de calibração.

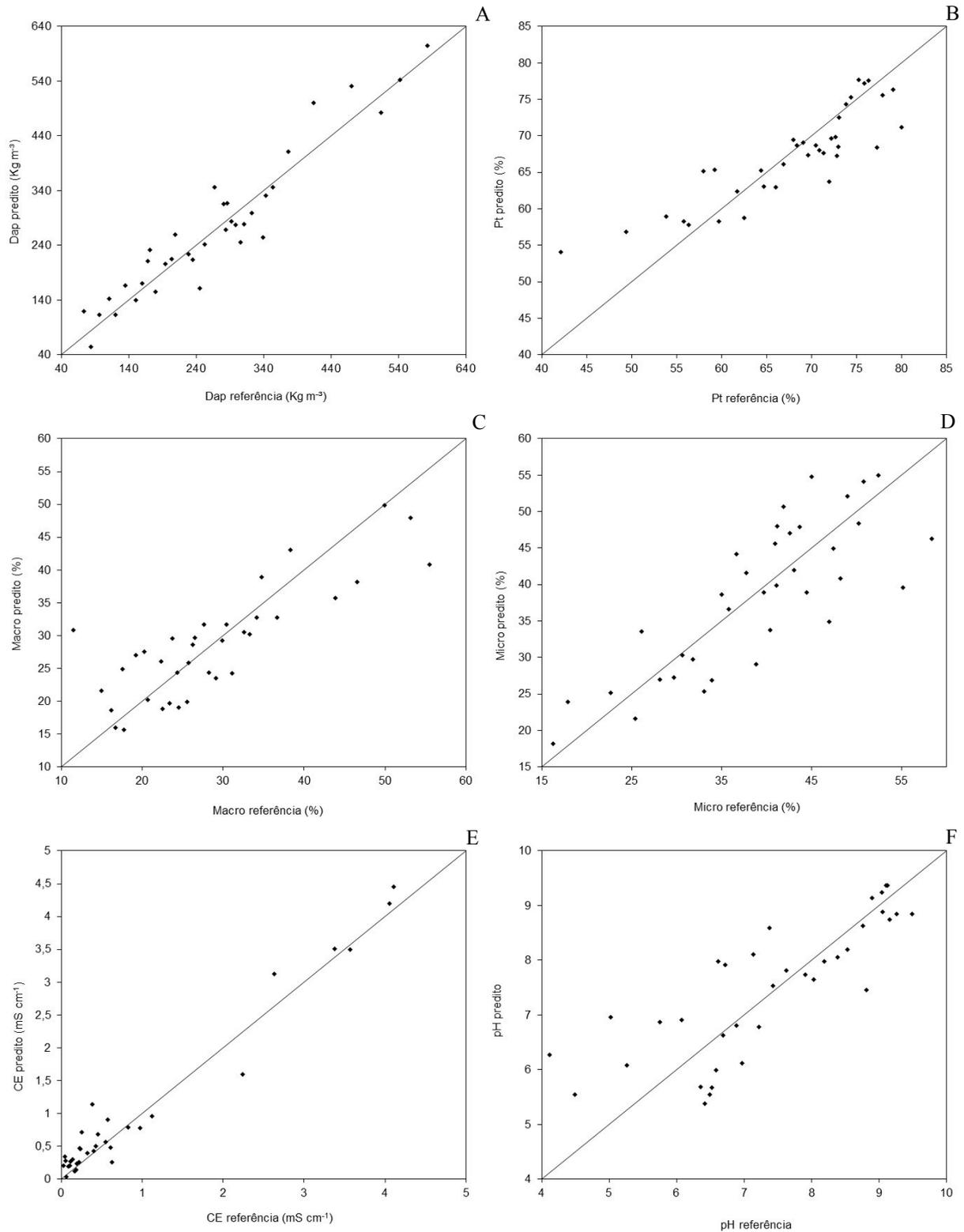


FIGURA 2.4 - VALORES DE REFERÊNCIA VERSUS OS PREDITOS PELO NIR NA VALIDAÇÃO EXTERNA. DENSIDADE APARENTE (A). POROSIDADE TOTAL (B). MACROPOROSIDADE (C). MICROPOROSIDADE (D). CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (E) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (F).

Quanto a porosidade total, verifica-se que os parâmetros estatísticos da estimativa externa são superiores aos da validação cruzada, denotando que o modelo

ajustado é adequado para a estimativa de amostras externas (TABELA 2.5). Apesar do baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,74$ ) verificou-se um erro de 4,39 % para uma porosidade média de 67,63 % (TABELA 2.3 e 2.5). Verifica-se também tendência de superestimar os valores de porosidade na extremidade inferior, até o valor de referência de 60 %, a partir deste ponto, observa-se tendência contrária, com subestimativa de algumas amostras (FIGURA 2.4 B). Este resultado está aliado a existência de poucas amostras, no grupo de calibração, com baixos valores e um grande número de amostras com baixa amplitude de variação. Sabidamente, esta propriedade apresenta baixa variabilidade entre os diferentes substratos, os quais diferenciam-se principalmente pela proporção de macro e microporos (KRATZ *et al.*, 2013 a, p. 1106).

Em relação às propriedades macro e microporosidade, apesar dos baixos valores de coeficiente de determinação (0,68 e 0,60), verificou-se erros aceitáveis (6,03 e 6,23 % para valores médios de 28,76 e 38,97 %, respectivamente), aliado a relação de desvio de performance acima de 1,50 (TABELA 2.3 e 2.5). Observa-se maior erro nas amostras com maior macroporosidade e menor microporosidade, tendo seus valores sub e superestimados, respectivamente (FIGURA 2.4 C e D). Estes resultados podem ser melhorados, em trabalhos futuros, ao aumentar a intensidade amostral nestes pontos com maior deficiência.

Os resultados da estimativa das propriedades físicas e químicas foram viáveis tecnicamente se considerados a variabilidade dos substratos (minerais e orgânicos) e o pequeno tempo despendido (< 90s) para realização de uma análise, quando comparado com a análise convencional (5 dias) (MAPA, 2007). Cabe ressaltar que a análise convencional das propriedades físicas (MAPA, 2007) é um método que não proporciona exatidão dos valores obtidos, pois trata-se de um processo físico, diretamente influenciado por fatores externos, como a umidade relativa do ar. Por exemplo, substratos analisados em períodos com baixa umidade do ar, podem perder água para o meio. No presente estudo foram tomados cuidados máximos para evitar prováveis efeitos externos, entretanto pequenas distorções nos resultados convencionais podem acarretar em maiores erros de calibração e subsequente estimativa.

Dentre as propriedades químicas, o potencial hidrogeniônico (pH), apresentou resultados inferiores. Entretanto apesar do baixo coeficiente de determinação ( $R^2=0,65$ ) o erro da validação externa foi cerca de 0,87 para um valor médio de 7,38.

Resultados superiores aos verificados por Debaene *et al.* (2010, p. 6) ( $R^2=0,40$ ; RPD= 1,02) na determinação do pH de solos.

Verifica-se maior precisão de estimativa na extremidade superior, com uma leve tendência de subestimar as amostras básicas. Em contrapartida, na extremidade inferior, observa-se tendência de superestimar os valores das amostras ácidas e na faixa com pH neutro o erro está distribuído de forma aleatória (FIGURA 2.4 F). Esta resposta está associada ao menor número de amostras com pH ácido utilizada na construção do modelo de calibração e para a correção deste inconveniente, sugere-se aumentar o número de amostras nesta região.

Com fins de rotulagem do substrato para comercialização, é admitida uma variação máxima de  $\pm 0,5$  mS/cm no valor do pH (MAPA, 2004). Desta maneira sua estimativa, via NIR, com fins de controle de qualidade e comercialização, não é aconselhado (TABELA 2.5). Cabe ressaltar, a importância da precisão da medida desta variável, devido a sua notável relação com a disponibilidade de nutrientes e crescimento das plantas, aliado à facilidade de determinação pelo método convencional (KRATZ *et al.*, 2013b, p. 536; MELO *et al.*, 2014, p. 239).

Em relação a condutividade elétrica, além de apresentar resultados considerados muito bons estatisticamente, o erro encontra-se dentro do limite máximo aceitável ( $\pm 0,3$  mS/cm) para o MAPA (2004). Esta propriedade refere-se à concentração de sais no substrato, interferindo na absorção de água e nutrientes pelas plantas (CALDEIRA *et al.*, 2014, p. 200). Sua determinação precisa é imprescindível quando deseja-se produzir mudas de espécies sensíveis a salinidade, a fim de evitar crescimento insatisfatório ou até mesmo perdas na produção (KRATZ *et al.*, 2013b, p. 536). Nestes casos, aconselha-se realizar a mensuração da CE, a qual é feita na mesma solução utilizada para a determinação do pH.

#### **4 CONCLUSÕES**

- O uso de modelos elaborados através da técnica da espectroscopia no infravermelho próximo apresentou-se viável para a estimativa das propriedades físicas e químicas de substratos.

- Modelos considerados muito bons foram ajustados para a densidade aparente e condutividade elétrica; bons para a macroporosidade e porosidade total; satisfatórios para a microporosidade e potencial hidrogeniônico.
- As propriedades com maior variabilidade amostral, densidade aparente e condutividade elétrica, apresentaram os melhores modelos de estimativa, em contrapartida os piores resultados foram observados para a microporosidade e potencial hidrogeniônico.

## 5 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; SOUSA, L. C. Estimation of mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 291-298, 2010.

BAILLERES, H.; DAVRIEUX, F.; HAM-PICHAVANT, F. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a Eucalyptus breeding program. **Forestry Science**, Les Ulis, v. 59, p. 479-490, 2002.

CALDEIRA, M. V. W.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A.; DELARMELINA, W. M.; ROCHA, R. L. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando lodo de esgoto, fibra de coco e palha de café *in natura*. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 2, p. 195 - 206, 2014.

CURCIO, D.; CIRAULO, G.; D'ASAROA, F.; MINACAPILLIA, M. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 494 – 503, 2013.

DEBAENE, G.; NIEDZWIECKI, J.; PECIO, A. Visible and near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. **Polish Journal Agronomy**, 2010, v. 3, p. 3-9.

FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO, K.; TSUCHIKAWA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v.16, p.529-537, 2008.

GENOT, V.; COLINET, G.; BOCK, L.; VANVYVE, D.; REUSEN, Y.; DARDENNE, P. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 19, p. 117-138, 2011.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES JR, F. T.; GENEVE, R. **Plant propagation: principles and practices**. 8th. ed. Boston: Prentice-Hall, 2011. 915 p.

- KNADEL, M.; STENBERG, B.; DENG, F.; THOMSENA, A.; GREVE, M. H. Comparing predictive abilities of three visible-near infrared spectrophotometers for soil organic carbon and clay determination. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 21, p. 67-80, 2013.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1103-1113, 2013a.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Utilização de resíduos urbanos e agroflorestais para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 530-537, 2013b.
- MELO, L. A.; PEREIRA, G. A.; MOREIRA, E. J. C.; DAVIDE, A. C.; SILVA, E. V.; TEIXEIRA, L. A. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* e *Eremanthus erythropappus* sob diferentes formulações de substrato. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 2, p. 234-242, 2014.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa SDA Nº 17**. Diário Oficial da União- Seção 1, nº 99, 24 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos para Plantas e Condicionadores de Solo. Brasília, 2007.
- MORGANO, M. A.; FARIA, C. G.; FERRÃO, M. F.; FERREIRA, M. M. C. Determinação de açúcar total em café cru por espectroscopia no infravermelho próximo e regressão por mínimos quadrados parciais. **Química Nova**, v. 30, n. 2, 346-350, 2007
- MORON, A.; COZZOLINO, D. Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to study physical properties and microelementos in soils. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 11, p. 145-154, 2003.
- MUÑIZ, G. I. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base floresta. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, 2012.
- PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 14, n. 2, 198-219, 2003.
- SANTOS, G. A.; PEREIRA A. B.; KORNDÖRFER, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 100-108, 2010.
- SCHIMLECK, L. R.; DORAN, J. C.; RIMBAWANTO, A. Near infrared spectroscopy for cost-effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 51, p. 2433-2437, 2003.
- WENDLING, I.; GUASTALA, D; DEDECEK, R. Características físicas e químicas de substratos para produção de mudas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, p. 209-220, 2007.

WETTERLIND, J., STENBERG, B., ROSSEL, R. A. V. Soil analysis using visible and near infrared spectroscopy. In: MAATHUIS, F. J. M. (ed). Plant mineral nutrients: methods and protocols, methods in molecular biology. Vol. 953. Springer Science business media, 2013. p. 95-107.

WILLIAMS, P.; NORRIS, K. **Near-infrared technology**. 2nd ed. Saint Paul: American Association of Cereal Chemistry, 2001. 296 p.

## **CAPITULO 3 - ESPECTROFOTÔMETROS NIR PORTÁTIL E DE BANCADA PARA ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SUBSTRATOS**

### **RESUMO**

Diversos são os fatores que influenciam na qualidade dos modelos de calibração construídos, dentre eles, cita-se a dos espectrofotômetros NIRS, os quais diferenciam-se pela faixa e resoluções espectrais, bem como pela mobilidade. Diante disto, objetivou-se avaliar a eficiência de dois espectrofotômetros NIR para estimativa das propriedades físico-químicas de substratos para produção de mudas em recipientes. Para tanto foram formulados 110 substratos e avaliadas suas propriedades pelo método convencional e os espectros no infravermelho próximo foram obtidos nos espectrômetros de bancada FEMTO NIR 900 e portátil MicroPhazir PC, para posterior construção dos modelos de calibração PLS e comparação dos equipamentos. O espectrofotômetro portátil realiza a leitura dos espectros num intervalo de 1526 a 2336 nm com resolução espectral de 8 nm, totalizando 100 valores de reflectância, enquanto o espectrômetro de bancada realiza a aquisição de 1.100 a 2.500nm com resolução de 1 nm, totalizando 1400 valores de reflectância. Ambos equipamentos, trabalham em modo de reflexão difusa. Primeiramente, as amostras foram divididas em dois grupos: 2/3 (73 amostras) foram usadas para a construção do modelo de calibração PLS e 1/3 (37 amostras) para validação externa. Diferentes tratamentos matemáticos foram aplicados nos espectros e posteriormente foram selecionadas regiões espectrais significativas para construção dos modelos PLS. Como resultados, verificou-se que não foi possível construir modelos adequados para a porosidade total e potencial hidrogeniônico, utilizando o espectrofotômetro portátil, contudo este equipamento proporcionou a construção de modelos com maior precisão para a densidade aparente, macro e microporosidade. Em contrapartida, para a porosidade total, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica obteve-se melhores resultados com a utilização do espectrofotômetro de bancada. Os resultados denotam que a faixa espectral entre 1100 a 1526 nm é imprescindível para a construção dos modelos da Pt e pH e o espectrofotômetro portátil permite a leitura de amostras mais homogêneas, refletindo na qualidade dos espectros. Baseado nos resultados, conclui-se que apenas o espectrofotômetro de bancada apresentou-se viável para a estimativa de todas as propriedades físicas e químicas dos substratos.

**Palavras-chave:** FEMTO NIR 900. MicroPhazir PC. NIRS. Mudas florestais. Regressão dos mínimos quadrados parciais.

## CHAPTER 3 – PORTABLE AND TABLE SPECTROPHOTOMETERS NIRS FOR ESTIMATE OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SUBSTRATES

### ABSTRACT

There are several factors that influence the quality of the constructed calibration models, among them, it is cited of NIRS spectrophotometers, which are distinguished by the range and spectral resolutions and by mobility. Given this, aimed to evaluate the efficiency of two NIR spectrophotometers to estimate the physical and chemical properties of substrates for production of seedlings in containers. For both substrates 110 were formulated and evaluated their properties by the conventional method and the near infrared spectra were obtained on table 900 and NIR spectrometers FEMTO MicroPhazir portable PC for further construction of the PLS calibration models and comparison of equipment. The portable spectrophotometer performs the reading of the spectra in a range of 1526 to 2336 nm with spectral resolution of 8 nm, totaling 100 absorbance values, while the table spectrometer performs the acquisition of 1,100 to 2.500nm with a resolution of 1 nm, totaling 1400 values absorbance. Both equipment, work in diffuse reflection mode. First, the samples were divided into two groups: 2/3 (73 samples) were used to build the PLS calibration model, and third (37 samples) for external validation. Different mathematical treatments were applied in the spectra and significant spectral regions were subsequently selected for construction of the PLS models. As a result, it was found that it was not possible to construct appropriate models for the porosity and hydrogenic potential using a portable spectrophotometer, however this device provided the designs with greater precision for the bulk density, macro and microporosity. In contrast, for total porosity, hydrogen potential and electrical conductivity was obtained better results using the table spectrophotometer. The results show that the spectral range between 1100 to 1526 nm is essential for the construction of Pt and pH models and the portable spectrophotometer allows you to read more homogeneous samples, reflecting the quality of the spectra. Based on the results, it is concluded that only the table spectrophotometer showed to be feasible to estimate all physical and chemical properties of substrates.

**Keywords:** FEMTO NIR 900. MicroPhazir PC. NIRS. Forest seedlings. Partial least squares.

## 1 INTRODUÇÃO

A técnica espectroscopia no infravermelho próximo (*near infrared spectroscopy* - NIR) consiste na construção de um modelo estatístico multivariado, que relaciona os dados espectrais aos obtidos pelo método de referência (PASQUINI, 2003, p. 198). A faixa do espectro infravermelho próximo corresponde ao comprimento de onda entre 800 e 2.500 nm (BURNS; CIURCZAK, 2008, p. 17), entretanto diversos são os espectrofotômetros NIRS existentes no mercado, com diferentes faixas e resoluções espectrais (KALININ *et al.*, 2008, p.344; GE *et al.*, 2011, p.210; KNADEL *et al.*, 2011, p.69). Apesar da variedade de espectrofotômetros existentes, poucos são os trabalhos que estudaram a influência da qualidade dos espectros na precisão dos modelos construídos (KNADEL *et al.*, 2013, p.69).

Outros fatores, como o tempo de varredura, modo de leitura e mobilidade (portátil e fixo) diferenciam os espectrofotômetros (KALININ *et al.*, 2008, p.346; MILAGRES *et al.*, 2013, p.1167; HEIN *et al.*, 2009 a., p.122; MAZUR *et al.*, 2014, p.370). Cabe ressaltar, que além da qualidade técnica do espectrofotômetro, a sua escolha deve levar em consideração a aplicação, custo de aquisição, bem como a multifuncionalidade para analisar diferentes materiais (KNADEL *et al.*, 2013, p.68).

A técnica NIRS vem sendo utilizada para estimar propriedades químicas de solos, como nitrogênio, carbono e CTC (GENOT *et al.*, 2011, p. 126), bem como na determinação dos teores de areia, silte e argila (CURCIO *et al.*, 2013, p. 498), com satisfatória precisão. Com função similar ao solo, denota-se a importância da determinação das propriedades físico-químicas dos substratos para produção de mudas em recipiente, haja vista sua notável influência no crescimento das plantas (WENDLING *et al.*, 2007; KRATZ *et al.*, 2013b., p. 536; MELO *et al.*, 2014, p. 239). No Brasil, a análise das propriedades de substratos é regida pela instrução normativa nº 17 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007), contudo este processo é demorado e dispendioso, associado a reduzido número de laboratórios especializados.

Diante disto, o presente trabalho teve como objetivo comparar a eficiência de dois espectrofotômetros NIRS para estimativa das propriedades físico-químicas de substratos para produção de mudas em recipientes.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 PREPARO E ANALISE CONVENCIONAL DOS SUBSTRATOS

O preparo e as análises químicas dos substratos foram feitos no Laboratório de Propagação de espécies Florestais e Química do Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Florestas), e as análises físicas foram realizadas no Laboratório de Manejo de Bacias hidrográficas da Universidade Federal do Paraná.

Foram utilizados dois substratos comerciais (a base de turfa e casca de pinus semidecomposta) e misturas de diferentes componentes (casca de arroz carbonizada, carvão vegetal, fibra de coco, casca de pinus semidecomposta, vermiculita fina, bioossólido e turfa) para a formulação de 110 substratos (TABELA 3.1). Estes tiveram suas propriedades físico-químicas analisadas conforme a metodologia descrita na Instrução Normativa nº 17 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2007).

Obteve-se os valores de densidade aparente ( $D_{ap}$ ), capacidade de retenção de água a uma tensão de 10 cm (CRA 10) ou microporosidade (micro), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE). A partir destes resultados calculou-se a porosidade total (Pt) e macroporosidade (Macro). A Pt corresponde ao volume de água retido no substrato na tensão 0 hPa (totalmente saturado), enquanto que a macroporosidade consiste na diferença entre a Pt do substrato e o volume de água retido a 10 hPa (CRA 10 ou microporosidade) (DE BOODT; VERDONCK, 1972, p. 39, 40).

TABELA 3. 1 - MATERIAIS UTILIZADOS (%) NA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS (VOLUME/VOLUME).

S	CAC	C1	C2	FC	CP	VF	BIO	TF	S	CAC	C1	C2	FC	CP	VF	BIO	TF		
1	100								56		90						10		
2		100							57		70						30		
3			100						58		50						50		
4				100					59		30						70		
5					100				60		10						90		
6						100			61			90	10						
7							100		62			70	30						
8								100	63			50	50						
9	Substrato comercial a base de turfa											64		30	70				
10	Substrato comercial a base de casca de pinus											65		10	90				
11	90			10					66		90			10					
12	70			30					67		70			30					
13	50			50					68		50			50					
14	30			70					69		30			70					
15	10			90					70		10			90					
16	90				10				71		90				10				
17	70				30				72		70				30				
18	50				50				73		50				50				
19	30				70				74		30				70				
20	10				90				75		10				90				
21	90					10			76		90					10			
22	70					30			77		70					30			
23	50					50			78		50					50			
24	30					70			79		30					70			
25	10					90			80		10					90			
26	90						10		81		90						10		
27	70						30		82		70						30		
28	50						50		83		50						50		
29	30						70		84		30						70		
30	10						90		85		10						90		
31	90							10	86				10	90					
32	70							30	87				30	70					
33	50							50	88				50	50					
34	30							70	89				70	30					
35	10							90	90				90	10					
36		90		10					91					90	10				
37		70		30					92					70	30				
38		50		50					93					50	50				
39		30		70					94					30	70				
40		10		90					95					10	90				
41		90			10				96					90		10			
42		70			30				97					70		30			
43		50			50				98					50		50			
44		30			70				99					30		70			
45		10			90				100					10		90			
46		90				10			101					90			10		
47		70				30			102					70			30		
48		50				50			103					50			50		
49		30				70			104					30			70		
50		10				90			105					10			90		
51		90					10		106				90		10				
52		70					30		107				70		30				
53		50					50		108				50		50				
54		30					70		109				30		70				
55		10					90		110				10		90				

S- Substrato; CAC- Casca de arroz carbonizada; C1- carvão vegetal com granulometria entre 3- 5 mm; C2- carvão vegetal com granulometria entre 1- 3 mm; FC- fibra de coco; CP- casca de pinus semidecomposta; VF- vermiculita fina; BIO- bio sólido e TF- turfa.

## 2.2 OBTENÇÃO DOS ESPECTROS

As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Embrapa Florestas. Primeiramente os substratos (TABELA 3.1) foram secos em estufa a 65 °C por 48 horas e acondicionados em embalagem plástica, a fim de manter o material sem umidade e eliminar a influência da água nos espectros. As análises de refletância difusa de infravermelho próximo (NIRS) aplicadas aos substratos foram realizadas com o uso dos espectrofotômetros de bancada (FEMTO modelo FemWin 900) (FIGURA 3.1 A) e móvel ou portátil (MicroPhazir PC) (FIGURA 3.2 B), para posterior comparação.

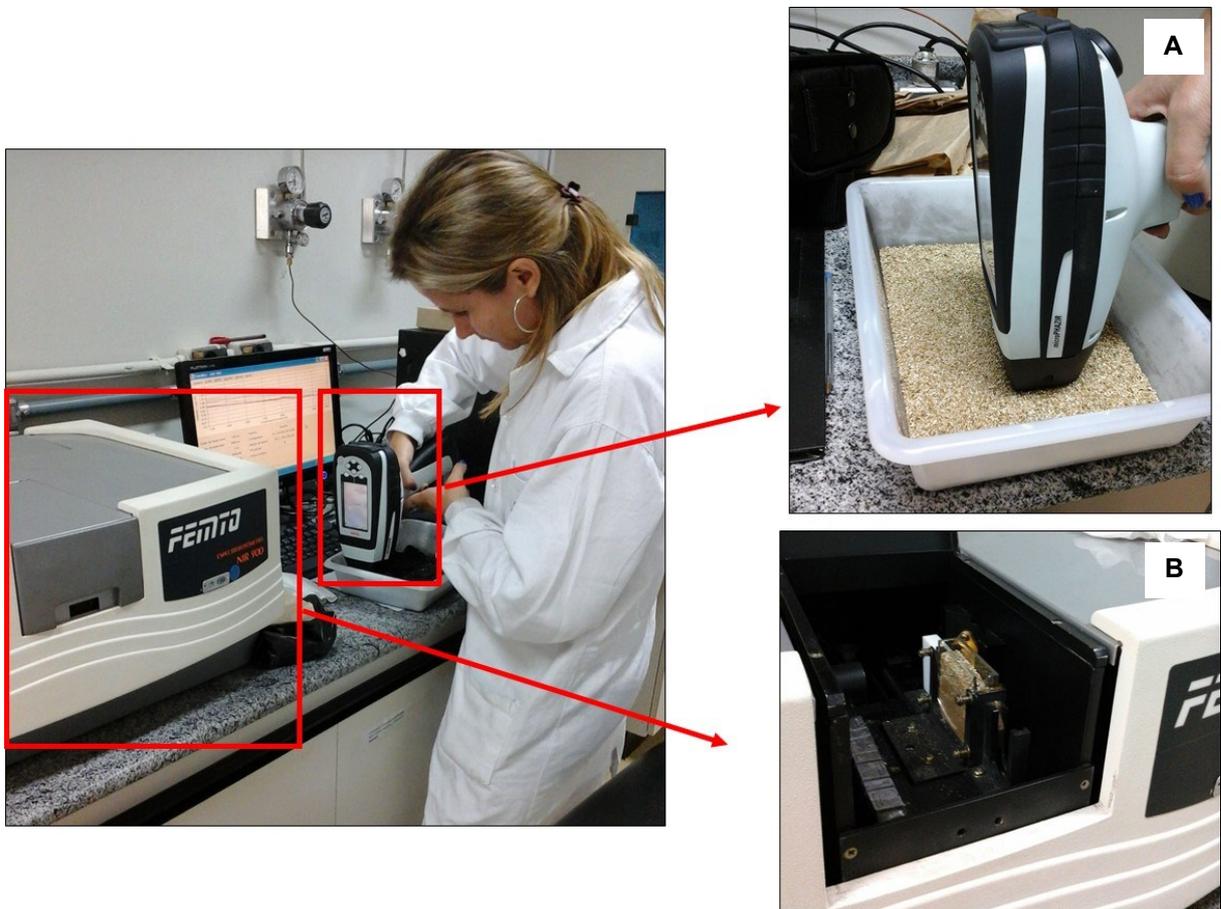


FIGURA 3. 1 - OBTENÇÃO DOS ESPECTROS NO ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL (A) E ESPECTROFOTÔMETRO DE BANCADA (B).

O espectrofotômetro portátil realiza a leitura dos espectros num intervalo de 1526 a 2336 nm com resolução espectral de 8 nm, totalizando 100 valores de absorbância, enquanto o espectrômetro de bancada realiza a aquisição de 1.100 a 2.500nm com resolução de 1 nm, totalizando 1400 valores de absorbância. Ambos

equipamentos, trabalham em modo de reflexão difusa ( $\log 1/R$ ) e a fonte de radiação luminosa consiste numa lâmpada de tungstênio.

Para a aquisição dos espectros no espectrofotômetro de bancada os substratos foram colocados na cubeta de quartzo e obtidos três espectros de cada amostra, enquanto que no espectrofotômetro portátil, as amostras foram dispostas em uma bandeja plástica (15 x 30 cm), obtendo-se dez espectros de cada amostra (FIGURA 3.1 A, B). Para a realização dos cálculos foi usado o espectro médio de três e dez espectros obtidos com o espectrofotômetro de bancada e portátil, respectivamente.

### 2.1.1 CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA

As amostras foram divididas em dois grupos: 2/3 (73 amostras) foram usadas para a construção do modelo de calibração e 1/3 (37 amostras) para a estimativa ou validação externa. Para tanto, para cada propriedade, as amostras foram organizadas em ordem ascendente, selecionando duas amostras a cada três, formando o grupo de calibração, e as amostras remanescentes formaram o grupo de estimativa. Este procedimento permite alto controle da variabilidade em cada subgrupo.

As calibrações foram ajustadas pelo método de regressão dos mínimos quadrados parciais (Partial Least Squares - PLS) utilizando o software Unscrambler® (CAMO AS, Norway) versão 10.2. Primeiramente, foram testados os seguintes tratamentos matemáticos nos espectros: alisamento (polinomial de segunda ordem e 5 e 2 pontos de cada lado), normalização máxima, standard normal variate (SNV), primeira e segunda derivadas (polinomial de segunda ordem e 5 e 2 pontos de cada lado). Posteriormente, as amostras classificadas como “*outliers*” ou anômalas no gráfico de resíduos de Student foram detectadas e excluídas dos modelos. A seguir foram selecionadas faixas espectrais que melhor se relacionaram com a propriedade de interesse, utilizando para tanto, o algoritmo Jack Knife.

Após o ajuste do modelo de calibração foi realizado a sua validação, utilizando os métodos de validação cruzada (Cross validation) e externa. A fim de avaliar a qualidade dos modelos utilizou-se os seguintes parâmetros estatísticos: número de fatores (LV – latent variables), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro

médio quadrático (RMSE - Root Mean Squared Error), erro padrão (SE – standard error) e a razão de performance (RDP - ratio deviation performance), índice correspondente a relação do desvio padrão dos dados obtidos convencionalmente e o erro padrão da validação (RPD= SD/SE). Para a classificação da qualidade dos modelos ajustados, levou-se em consideração o valor do RDP (Tabela 3.2).

TABELA 3. 2 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO AJUSTADO BASEADO NO ÍNDICE RAZÃO DE PERFORMANCE (RDP).

Qualidade do Ajuste	Valor do RDP
Muito bom	$\leq 2,01$
Bom	1,76 – 2,00
Satisfatório	1,50 – 1,75
Inadequado <sup>1</sup>	$\geq 1,49$

<sup>1</sup> Baseado em Schimleck *et al.* (2003).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros estatísticos descritivos, para os grupos de calibração e validação externa, mostraram alta variabilidade dos substratos estudados, aliado a não superposição dos espectros, para ambos equipamentos NIR, denotando potencial para obtenção de bons modelos de calibração e posterior estimativa das propriedades físico-químicas (TABELA 3.3, FIGURA 3.2).

TABELA 3.3 - RESUMO DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS DOS GRUPOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO EXTERNA. DENSIDADE APARENTE (Dap), POROSIDADE TOTAL (Pt), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Grupo de calibração					Grupo de validação externa				
	Min.	Máx.	Méd.	SD	CV	Min	Máx.	Méd.	SD	CV
Dap (Kg m <sup>3</sup> )	63,8	594,7	266,35	126,47	47,48	73,86	583,35	266,94	127,59	47,79
Pt (%)	41,17	81,27	67,65	8,75	12,93	42,14	80,02	67,63	8,80	13,01
Macro (%)	10,80	56,90	28,70	10,58	36,86	11,55	55,50	28,76	10,74	37,34
Micro (%)	11,36	61,20	38,87	10,12	26,03	16,31	58,39	38,97	10,05	25,78
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	0,03	4,26	0,83	1,18	142,16	0,03	4,11	0,83	1,20	144,57
pH	4,10	9,70	7,38	1,43	19,37	4,12	9,49	7,38	1,44	19,51

Min. – mínimo; Máx. - máximo; Méd. – média; SD- desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

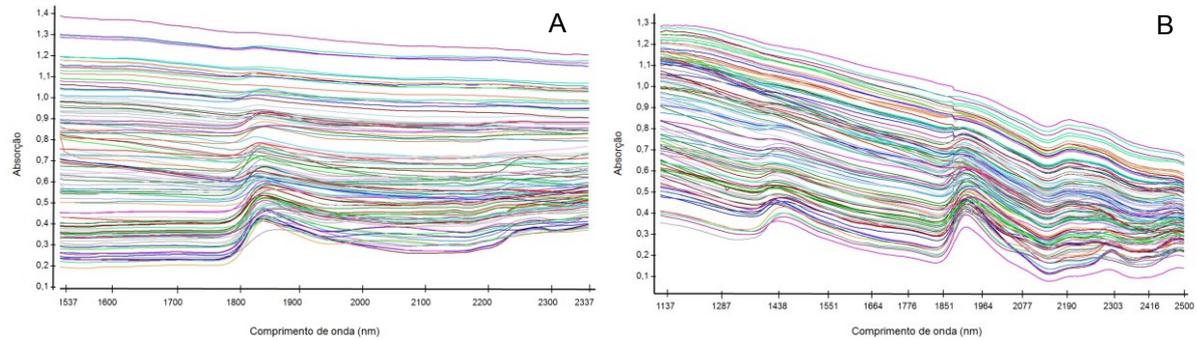


FIGURA 3.2 - ESPECTROS DOS SUBSTRATOS OBTIDOS NO ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL (A) E DE BANCADA (B).

A elaboração de um adequado grupo de calibração é imprescindível para efetividade dos modelos construídos, devendo representar toda a amplitude de variação das amostras (PASQUINI, 2003, p. 213; BAILLERES *et al.*, 2002, p. 485; WETTERLIND *et al.*, 2013, p. 96). Conforme observado na Tabela 3.3, o grupo de calibração contém os menores valores mínimos e maiores máximos, comparado ao grupo de validação. Desta maneira, qualquer amostra predita, estará dentro da faixa de valores utilizados na construção do modelo de calibração, diminuindo o erro de estimativa.

Verificou-se que até 6 variáveis latentes ou fatores PLS foram suficientes para o desenvolvimento de modelos com menor erro de estimativa, para ambos espectrofotômetros (TABELA 3.4). Estes resultados são similares aos verificados em trabalhos relacionados a materiais heterogêneos, como solos (GENOT *et al.*, 2011, p.128; GE *et al.*, 2011, p.207; KNADEL *et al.*, 2013, p. 75). Cabe ressaltar, que quanto maior o número de variáveis, maior a complexidade do modelo (MORGANO *et al.*, 2007, p. 348), bem como, aumento de ruídos (KNADEL *et al.*, 2013, p. 75).

TABELA 3.4 - RESULTADOS DO MODELO PLS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS. DENSIDADE APARENTE (DAP), POROSIDADE TOTAL (Pt), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Espect.	Trat	Fat. PLS	R <sup>2</sup> c	RMSE	SE	RDP
Dap (kg m <sup>-3</sup> )	banc.	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	2	0,92	36,39	36,64	3,45
	port.	1Dv. <sup>3</sup>	2	0,89	40,84	41,12	3,08
Pt (%)	banc.	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	2	0,66	5,04	5,07	1,73
	port.	-	-	-	-	-	-
Macro (%)	banc.	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	4	0,85	4,08	4,11	2,57
	port.	Als. <sup>4</sup>	6	0,80	4,74	4,77	2,22
Micro (%)	banc.	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	4	0,77	4,86	4,89	2,07
	port.	Als. <sup>4</sup> + 1Dv. <sup>3</sup>	6	0,83	4,14	4,16	2,43
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	banc.	Als. + 1Dv. <sup>1</sup>	4	0,89	0,39	0,39	3,03
	port.	Als. <sup>4</sup>	5	0,85	0,45	0,46	2,57
pH	banc.	Als. + 1Dv. <sup>2</sup>	6	0,69	0,79	0,80	1,79
	port.	-	-	-	-	-	-

1: Als. (alisamento - polinomial de segunda ordem e 5 pontos de cada lado) e 1 Dv. (primeira derivada - polinomial de segunda ordem e 5 pontos de cada lado); <sup>2</sup> (alisamento - polinomial de segunda ordem e 10 pontos de cada lado) e 1 Dv. (primeira derivada - polinomial de segunda ordem e 10 pontos de cada lado); <sup>3</sup>: 1 Dv. (primeira derivada - polinomial de segunda ordem e 2 pontos de cada lado); <sup>4</sup> Als. (alisamento - polinomial de segunda ordem e 2 pontos de cada lado).

Em se tratando dos tratamentos matemáticos aplicados aos espectros, a principal diferença, entre os espectrofotômetros, está no número de pontos utilizado na primeira derivada e alisamento, sendo 5 e 2 pontos, para o NIR de bancada e portátil, respectivamente. O menor número de pontos para o NIR portátil deve-se a menor quantidade de valores de absorvância do espectro, apenas 100, quando comparado com 1400 do NIR de bancada.

Dentre os diversos tratamentos matemáticos testados, para o NIR de bancada, obteve-se os melhores resultados tratando os espectros com alisamento seguido da primeira derivada, para todas as propriedades. Já para o NIR portátil, os melhores resultados foram encontrados ao aplicar apenas um tratamento, alisamento e primeira derivada, excetuando-se o modelo da microporosidade, no qual foi realizado o tratamento conjugado de alisamento seguido da derivada (TABELA 3.4). O alisamento proporciona redução dos ruídos e melhora a definição dos picos, enquanto a derivada realça as diferenças não observadas nos espectros originais e que apresentam importância na modelagem (GE *et al.*, 2011, p. 205).

Ambos os equipamentos NIR apresentaram maiores coeficientes de determinação, aliado aos menores erros e altos valores da relação de desvio de performance, nas propriedades com maior coeficiente de variação, densidade

aparente e condutividade elétrica. Em contrapartida, porosidade total e potencial hidrogeniônico apresentaram menor eficácia, sendo impossibilitada a geração de modelos utilizando o NIR portátil (TABELA 3.4).

De maneira geral, obteve-se os melhores resultados nos modelos construídos com os espectros do espectrofotômetro de bancada, excetuando-se o modelo da microporosidade. Cabe ressaltar que não foi possível construir modelos adequados para a porosidade total (Pt) e potencial hidrogeniônico (pH) utilizando o NIR portátil, dispensando a apresentação dos mesmos (TABELA 3.4). Esta resposta, deve-se a necessidade da utilização de um maior número de variáveis espectrais para a construção dos modelos para estas variáveis (FIGURA 3.3).

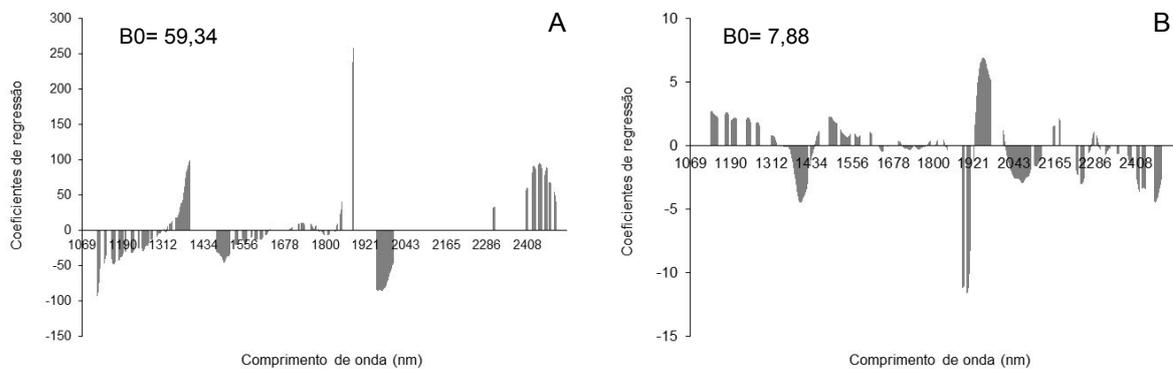


FIGURA 3.3 - COEFICIENTE DE REGRESSÃO UTILIZADOS NO MODELO PLS APÓS A SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPECTRAIS OBTIDOS COM O ESPECTROFOTÔMETRO DE BANCADA. POROSIDADE TOTAL (A) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (B).

Comparando os dois espectrofotômetros, verifica-se que regiões espectrais semelhantes foram utilizadas na construção dos modelos PLS, excetuando a região do infravermelho não mensurada pelo equipamento portátil, entre 1100 a 1526 nm, justificando os menores parâmetros de calibração obtidos nesse equipamento, principalmente para as propriedades Pt e pH (FIGURA 3.3, 3.4). Além dos picos observados nos espectros, verificou-se que outras faixas do espectro são importantes na construção dos modelos de estimativa, conforme também verificado por Curcio *et al.* (2013, p. 501) e Knadel *et al.* (2013, p. 77) na determinação da textura e matéria orgânica de solos, respectivamente.

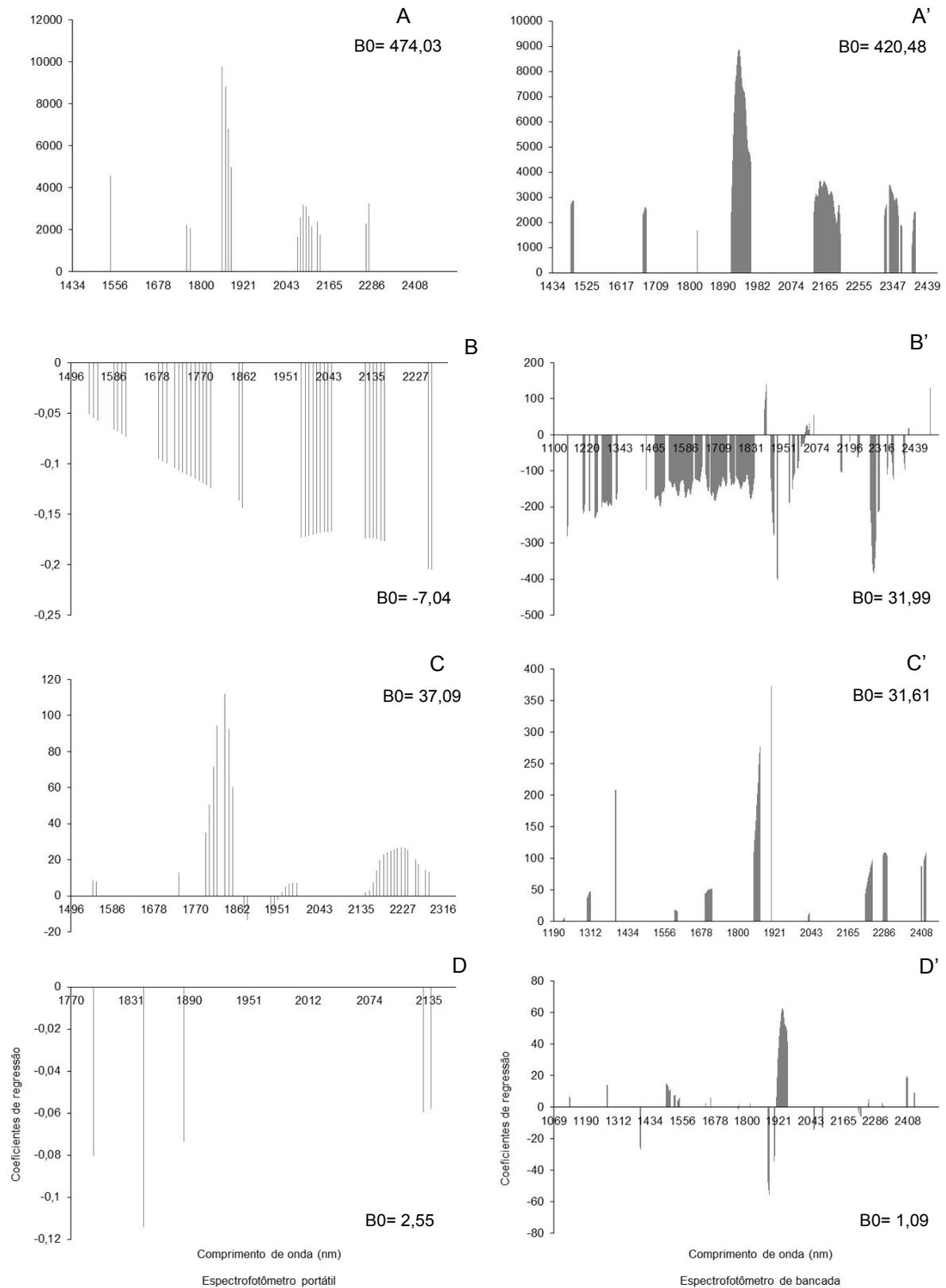


FIGURA 3.4 - COEFICIENTE DE REGRESSÃO UTILIZADOS NO MODELO PLS APÓS A SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPECTRAIS OBTIDOS COM OS ESPECTROFOTÔMETROS MÓVEL E DE BANCADA. DENSIDADE APARENTE (A). MACROPOROSIDADE (B). MICROPOROSIDADE (C). CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (D).

Os espectros dos substratos são semelhantes aos observados em solos, em que as bandas próximas a 1400, 1900 e 2000 nm apresentam maior absorvância, excetuando-se a faixa de 1400, não mensurada pelo equipamento portátil (FIGURA 3.2 A e B) (GENOT *et al.*, 2011, p. 125; GE *et al.*, 2011, p. 205; CURCIO *et al.*, 2013, p. 498; KNADEL *et al.*, 2013, p. 73). Diferentemente de outros trabalhos, com composição química conhecida, a determinação precisa dos grupos funcionais relacionados com as bandas de absorção é muito dificultada, pois diferentes materiais foram utilizados na formulação dos substratos (TABELA 3.1). Sugere-se que o resultado está correlacionado com composição orgânica dos substratos, aliado aos diferentes tamanhos das partículas e a porosidade entre elas, influenciando diretamente na reflectância.

Diversas partes do espectro infravermelho têm-se mostrado correlacionáveis com a matéria orgânica do solo (WETTERLIND *et al.*, 2013, p. 98; KNADEL *et al.*, 2013, p. 77). Sabidamente a matéria orgânica apresenta alta correlação com as propriedades físico-químicas dos substratos (KRATZ *et al.*, 2013a, p. 1106). Segundo Moron e Cozzolino (2003, p. 145) a matéria orgânica é formada principalmente por carbono e nitrogênio e apresenta grande correlação com as propriedades físicas e químicas dos solos, o que torna possível a estimativa destas propriedades via NIR.

Verificou-se maior viabilidade técnica na utilização do NIR de bancada para todas as propriedades, exceto a microporosidade, ao realizar a validação cruzada, em contrapartida na validação externa observou-se resultados superiores com a utilização do NIR portátil para a Dap, macro e microporosidade (TABELA 3.5). Cabe ressaltar que a validação cruzada justifica-se apenas quando se trabalha com um pequeno número de amostras (ANDRADE *et al.* 2012, p. 659). No entanto para comprovação da efetividade do modelo calibrado é preciso realizar a validação externa, a qual avalia o poder de previsão do modelo construído utilizando amostras que não participaram da etapa de calibração (MUÑIZ *et al.*, 2012, p. 869).

Exceto a Pt e pH, independentemente do equipamento utilizado, todos os modelos construídos podem ser considerados viáveis tecnicamente para a estimativa das propriedades físico-químicas dos substratos, principalmente ao levar em consideração o RDP (relação de desvio de performance), situado acima de 1,5 (TABELA 3.5). Estes resultados, denotam a possibilidade de substituição da análise convencional, sobretudo quando não faz-se necessário a exatidão dos valores (SCHIMLECK *et al.*, 2003; FUJIMOTO *et al.*, 2008, p. 534).

TABELA 3. 5 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA E EXTERNA DOS MODELOS GERADOS COM ESPECTROS DOS EQUIPAMENTOS DE BANCADA E PORTÁTIL. DENSIDADE APARENTE (Dap), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Espect.	Validação Cruzada				Validação Externa			
		R <sup>2</sup>	RMSE	SE	RDP	R <sup>2</sup>	RMSE	SE	RDP
Dap (kg m <sup>-3</sup> )	banc.	0,91	37,69	38,01	3,33	0,90	39,92	41,26	3,09
	port.	0,88	43,35	46,69	2,71	0,93	33,36	35,54	3,59
Pt (%)	banc.	0,63	5,35	5,39	1,62	0,74	4,39	4,43	1,99
	port.	-	-	-	-	-	-	-	-
Macro (%)	banc.	0,82	4,51	4,54	2,33	0,68	6,03	6,11	1,76
	port.	0,76	5,21	5,25	2,02	0,79	4,90	4,99	2,15
Micro (%)	banc.	0,72	5,40	5,44	1,86	0,60	6,23	6,30	1,60
	port.	0,78	4,76	4,79	2,11	0,77	4,72	4,93	2,04
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	banc.	0,86	0,44	0,45	2,62	0,94	0,27	0,30	4,00
	port.	0,83	0,49	0,49	2,41	0,91	0,36	0,39	3,08
pH	banc.	0,61	0,91	0,91	1,57	0,65	0,84	0,87	1,66
	port.	-	-	-	-	-	-	-	-

R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; RMSE - erro quadrático; SE - erro padrão; RDP - relação de desempenho do desvio.

Dentre as propriedades avaliadas, na validação externa, para a Pt, pH e CE o NIR de bancada apresentou melhor desempenho, com maior coeficiente de determinação, aliado a menores erros e maior RDP (TABELA 3.5). Este resultado está diretamente ligado à importância da faixa 1100 a 1526 nm na construção dos modelos, sendo imprescindível para Pt e pH. Em contrapartida, para as propriedades Dap, macro e microporosidade verificou-se maior viabilidade técnica do NIR portátil, com qualidade de ajuste considerado muito bom (Tabela 3.6).

Pt e pH apresentaram os menores coeficientes de determinação, maiores erros, associados a menores RDP para os modelos construídos utilizando os espectros do NIR de bancada, enquanto que a utilização dos espectros do NIR portátil não possibilitou a geração de modelos aceitáveis. Similarmente para a condutividade elétrica (CE), a faixa espectral não mensurada pelo equipamento portátil apresenta relevância, visto melhoria nos parâmetros do modelo de estimativa (TABELA 3.5). Desta maneira, ao realizar a análise de substratos via técnica NIRS, deve-se atentar para a faixa do espectro mensurada pelo equipamento, principalmente quando os parâmetros a serem avaliados apresentarem baixa amplitude de variação.

TABELA 3. 6 - QUALIDADE DOS MODELOS GERADOS COM ESPECTROS DOS EQUIPAMENTOS DE BANCADA E PORTÁTIL. DENSIDADE APARENTE (Dap), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (Macro), MICROPOROSIDADE (Micro), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).

Propriedade	Espectrofotômetro	Qualidade do ajuste
Dap (kg m <sup>-3</sup> )	Bancada	Muito bom
	Portátil	Muito bom
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	Bancada	Muito bom
	Portátil	Muito bom
Macro (%)	Bancada	Bom
	Portátil	Muito bom
Micro (%)	Bancada	Satisfatório
	Portátil	Muito bom
pH	Bancada	Satisfatório
	Portátil	Inadequado
Pt (%)	Bancada	Bom
	Portátil	Inadequado

Knadel *et al.* (2013, p. 78) ao comparar 3 espectrofotômetros, verificaram que a faixa espectral entre 2158-2500 nm, não mensurada por 1 equipamento, foi indispensável para determinação de matéria orgânica e argila em solos. Ge *et al.* (2011, p. 208) além de verificarem a influência de diferentes espectrofotômetros, observaram que os cuidados tomados no momento da coleta dos espectros são imprescindíveis para a obtenção de modelos adequados de estimativa. Dentre os cuidados, cita-se o adequado controle do ambiente e seguir rigorosamente o protocolo de análises do laboratório (KNADEL *et al.*, 2013, p. 78).

Supõe-se que o melhor desempenho do NIR portátil, para as propriedades Dap, macro e microporosidade, além da menor significância da faixa espectral entre 1100 a 1526 nm, deve-se a maior homogeneização das amostras, em relação ao NIR de bancada. Justifica-se pelo observado na prática, em que as sub amostras ao serem transferidas para a cubeta de quartzo, para posterior leitura no espectrofotômetro de bancada, sofrem fracionamento, principalmente aquelas formadas por componentes com diferentes tamanhos de partículas, como por exemplo moinha de carvão e biossólido. Em contrapartida, a leitura com o NIR portátil foi realizada diretamente na bandeja contendo as amostras homogeneizadas, em 10 pontos coletados aleatoriamente, diminuindo o erro causado pelo fracionamento.

Dentre as propriedades físicas avaliadas, a densidade aparente apresentou os melhores modelos, para ambos equipamentos testados, apresentando menores erros ao utilizar o modelo construído com os espectros do equipamento portátil

(TABELA 3.5, FIGURA 3.5 A e A'). Comportamento semelhante foi observado para a macro e microporosidade (TABELA 3.5, FIGURA 3.5 B e B', 3.5 C e C').

Independentemente do espectrofotômetro utilizado, para a macro e microporosidade, observa-se que os maiores erros encontram-se nas extremidades, enquanto que para a densidade aparente a distribuição do erro de estimativa é mais homogênea (FIGURA 3.5). Este resultado demonstra que a amostragem foi mais adequada para a Dap. O que pode ser relacionado ao fato que a elaboração dos tratamentos foi baseada nesta propriedade, sendo escolhidos como componentes materiais com densidades variadas, desde o biossólido ( $583,3 \text{ kg m}^{-3}$ ), material mais denso, até materiais leves como a fibra de coco ( $79,4 \text{ kg m}^{-3}$ ) e casca de arroz carbonizada ( $96,4 \text{ kg m}^{-3}$ ).

Observa-se maior erro nas amostras com maior macroporosidade e menor microporosidade, tendo seus valores sub e superestimados, respectivamente (FIGURA 3.5 C e D), para ambos equipamentos. Estes resultados podem ser melhorados, em trabalhos futuros, ao aumentar a intensidade amostral nestes pontos com maior deficiência.

O modelo construído para a Pt apresenta tendência de superestimar os valores de porosidade na extremidade inferior, até o valor de referência de 60 %, a partir deste ponto, observa-se tendência contrária, com subestimativa de algumas amostras (FIGURA 3.6 A). Este resultado está aliado a existência de poucas amostras, no grupo de calibração, com baixos valores e um grande número de amostras com baixa amplitude de variação. Sabidamente, esta propriedade apresenta baixa variabilidade entre os diferentes substratos, os quais diferenciam-se principalmente pela proporção de macro e microporos (KRATZ *et al.*, 2013 a, p. 1106).

Em relação ao pH, verifica-se maior precisão de estimativa na extremidade superior, com uma leve tendência de subestimar as amostras básicas. Em contrapartida, na extremidade inferior, observa-se tendência de superestimar os valores das amostras ácidas e na faixa com pH neutro o erro está distribuído de forma aleatória (FIGURA 3.6 B). Esta resposta está associada ao menor número de amostras com pH alcalino utilizada na construção do modelo de calibração e para a correção deste inconveniente, sugere-se aumentar a densidade amostras nesta região.

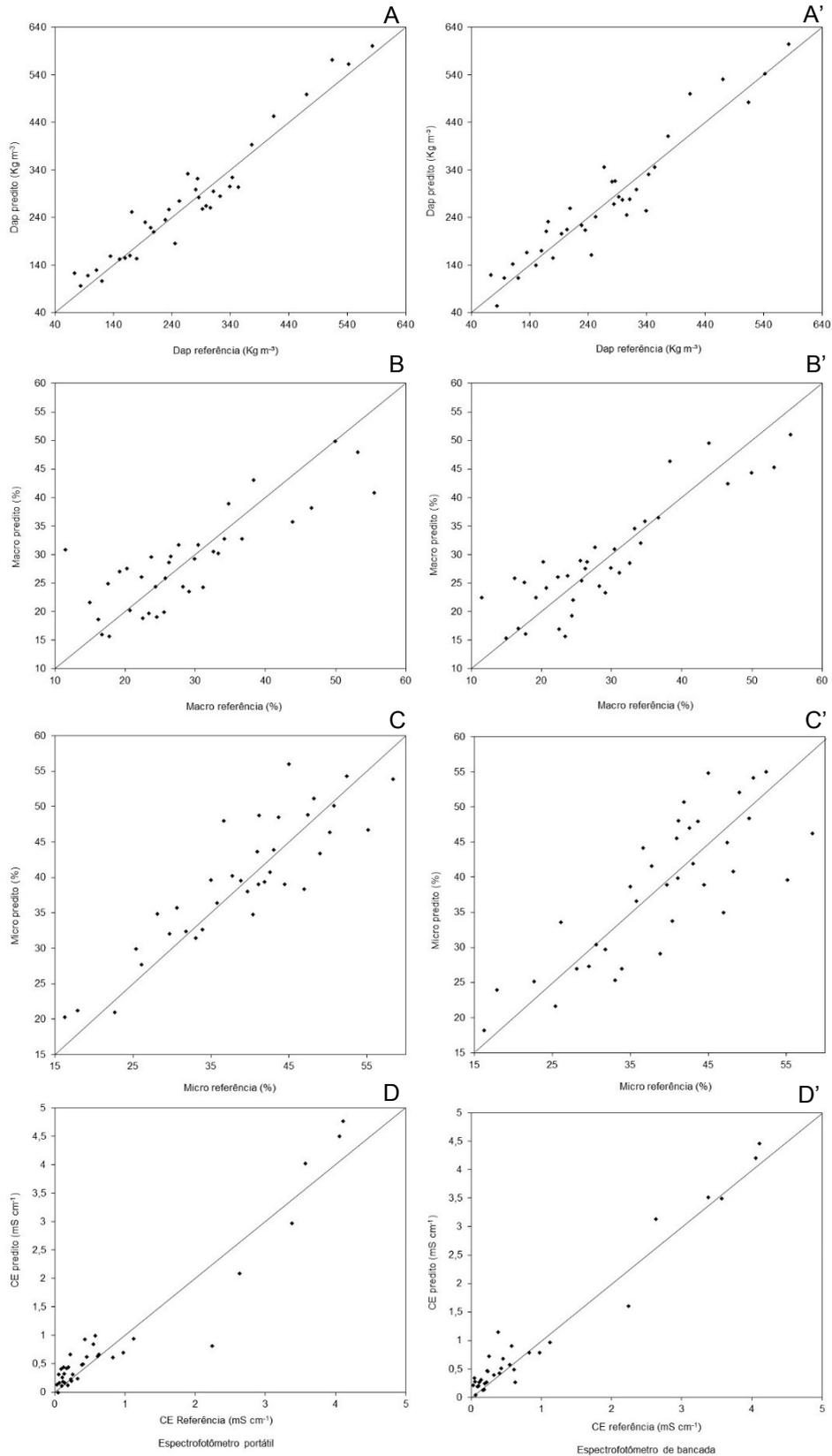


FIGURA 3.5 - VALORES DE REFERÊNCIA VERSUS OS PREDITOS PELO NIR NA VALIDAÇÃO EXTERNA, UTILIZANDO OS ESPECTROFOTÔMETROS PORTÁTIL E DE BANCADA. DENSIDADE APARENTE (A), MACROPOROSIDADE (C), MICROPOROSIDADE (D) E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (D).

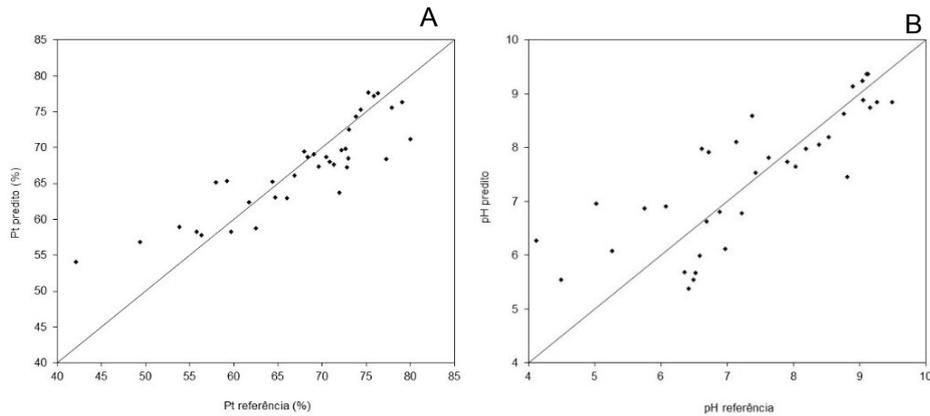


FIGURA 3.6 - VALORES DE REFERÊNCIA VERSUS OS PREDITOS PELO NIR, UTILIZANDO O ESPECTROFOTÔMETRO DE BANCADA. POROSIDADE TOTAL (A) E POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (B).

Os resultados observados, sugerem maior importância a adequada amostragem do que o espectrofotômetro, visto que as propriedades com menor amplitude amostral, porosidade total e potencial hidrogeniônico, apresentaram dependência da faixa do espectro não mensurada pela NIR portátil, para geração de modelos aceitáveis de estimativa.

#### 4 CONCLUSÕES

- Apenas o espectrofotômetro de bancada apresentou-se viável para a estimativa de todas as propriedades físicas e químicas dos substratos.
- Não foi possível construir modelos adequados de estimativa para as propriedades: porosidade total e potencial hidrogeniônico utilizando o espectrofotômetro portátil.
- O espectrofotômetro portátil proporcionou a construção de modelos com maior precisão para as propriedades: densidade aparente, macro e microporosidade. Em contrapartida para a porosidade total, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica, obteve-se melhores resultados com a utilização do espectrofotômetro de bancada.
- A faixa do espectro entre 1100 a 1526 nm, mostrou-se imprescindível para a construção dos modelos da porosidade total e potencial hidrogeniônico.
- O espectrofotômetro portátil permite a leitura de amostras mais homogêneas, refletindo na qualidade dos espectros.

## 5 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; VIEIRA, R. S; LIMA, J. T.; SOUSA, L. C. Estimation of mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 291-298, 2010.
- BAILLERES, H.; DAVRIEUX, F.; HAM-PICHAVANT, F. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a Eucalyptus breeding program. **Forestry Science**, Les Ulis, v.59, p.479-490, 2002.
- CURCIO, D.; CIRAULO, G., D'ASAROA, F., MINACAPILLIA, M. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. **Procedia Environmental Sciences** v. 19, p. 494 – 503, 2013.
- DE BOODT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in: Floriculture. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v.26, p.37-44, 1972.
- FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO, K.; TSUCHIKAWA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v.16, p.529-537, 2008.
- GE, Y.; MORGAN, C. L. S.; GRUNWALD, S.; BROWN, D.; SARKHOT, D. V. Comparison of soil reflectance spectra and calibration models obtained using multiple spectrometers. **Geoderma**, Amsterdam, v. 161, p. 202–211, 2011.
- GENOT, V.; COLINET, G.; BOCK, L.; VANVYVE, D.; REUSEN, Y.; DARDENNE, P. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 19, p. 117-138, 2011.
- HEIN, P. R. G.; CAMPOS, A. C. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestales**, Piracicaba. v. 37, n. 82, p.119-129, 2009a.
- HEIN, P. R. G.; CAMPOS, A. C. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, 2009b.
- KALININ, A.; KRIVTSUN, V.; KRASHENINNIKOV, V.; SADAUSKIY, S.; DENISOVIVH, H.; YUROVA, H. Calibration models for multi-component quantitative analyses of dairy with the use of two different types of portable near infrared spectrometer. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 16, p. 343-348, 2008.
- KNADEL, M.; STENBERG, B.; DENG, F.; THOMSENA, A.; GREVE, M. H. Comparing predictive abilities of three visible-near infrared spectrophotometers for soil organic carbon and clay determination. **Journal of near infrared spectroscopy**, Chichester, v. 21, p. 67-80, 2013.
- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1103-1113, 2013a.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Utilização de resíduos urbanos e agroflorestais para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 530-537, 2013b.

LAZZAROTTO, M.; SILVA, P. R.; PUGSLEY, B.; HANSEL, F. A.; MAGALHÃES, W. L. E. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição rápida de concentração de etanol em fermentados. **Comunicado técnico**, 335. Embrapa Florestas. Colombo, Paraná. 2014.

MAZUR, L.; OLIVEIRA, G. A. de, BICUDO, M. O. P.; RIBANI, R. H.; NAGATA, N.; PERALTA-ZAMORA, P. Multivariate calibration and moisture control in yerba mate by near infrared spectroscopy. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 36, n. 2, p. 369-374, 2014.

MELO, L. A.; PEREIRA, G. A.; MOREIRA, E. J. C.; DAVIDE, A. C.; SILVA, E. V.; TEIXEIRA, L. A. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* e *Eremanthus erythropappus* sob diferentes formulações de substrato. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 2, p. 234-242, 2014.

MILAGRES, F. R.; GOMIDE, J. L.; MAGATON, A.; FANTUZZI NETO, H. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.6, p.1165-1173, 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Instrução Normativa SDA Nº 17**. Diário Oficial da União- Seção 1, nº 99, 24 de maio de 2007. Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos para Plantas e Condicionadores de Solo. Brasília, 2007.

MORON, A.; COZZOLINO, D. Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to study physical properties and microelementos in soils. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 11, p. 145-154, 2003.

MUÑIZ, G. I. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base floresta. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, 2012.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 14, n. 2, 198-219, 2003.

SANTOS, G. A.; PEREIRA A. B.; KORNDÖRFER, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 100-108, 2010.

SCHIMLECK, L. R.; DORAN, J. C.; RIMBAWANTO, A. Near infrared spectroscopy for cost-effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 51, p. 2433-2437, 2003.

WENDLING, I.; GUASTALA, D; DEDECEK, R. Características físicas e químicas de substratos para produção de mudas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, p. 209-220, 2007.

WETTERLIND, J., STENBERG, B., ROSSEL, R. A. V. Soil analysis using visible and near infrared spectroscopy. In: MAATHUIS, F. J. M. (ed). **Plant mineral nutrients: methods and protocols**, methods in molecular biology. Vol. 953. Springer Science business media, 2013. p. 95-107.

WILLIAMS, P.; NORRIS, K. **Near-infrared technology**. 2nd ed. Saint Paul: American Association of Cereal Chemistry, 2001. 296 p.

## APÊNDICES

APÊNDICE 1.1 - MÉDIA (X), DESVIO PADRÃO (S) E CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS: ALTURA AOS 90 E 120 DIAS (H 90, H 120), DIÂMETRO DE COLO AOS 90 E 120 DIAS (D 90, D120), SOBREVIVÊNCIA DAS MUDAS (SOB) BIOMASSA SECA AÉREA (BSA), BIOMASSA SECA RADICIAL (BSR) DE MUDAS DE *E. benthamii*.

	<b>X</b>	<b>S</b>	<b>H 90</b>	<b>D 90</b>	<b>H120</b>	<b>D120</b>	<b>BSA</b>
H 90	19,92	4,66					
D 90	1,54	0,49	0,96**				
H120	25,99	4,42	0,85**	0,79**			
D120	2,41	0,52	0,90**	0,90**	0,90**		
BSA	0,93	0,36	0,89**	0,85**	0,98**	0,96**	
BSR	0,38	0,14	0,90**	0,86**	0,98**	0,97**	1,00**

\* e \*\* significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente e <sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

APÊNDICE 1.2 - ALTURA (H 90, H120), DIÂMETRO DE COLO (DC 90, DC 120), BIOMASSA SECA AÉREA (BSA) E BIOMASSA SECA RADICIAL (BSR) DE MUDAS DE *E. benthamii*, PRODUZIDAS EM DIFERENTES SUBSTRATOS AOS 90 E 120 DIAS.

Substrato	H 90	DC 90	H120	DC 120	BSA 120	BSR 120
	cm <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>	cm <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>	mg <sup>-1</sup>	
CAC	20,54	1,59	25,56	2,48	0,92	0,38
C1	13,10	0,96	19,65	1,70	0,41	0,19
C2	12,48	0,97	17,85	1,79	0,34	0,17
FC	15,77	1,13	29,83	2,11	1,04	0,41
CPI	14,99	1,05	21,97	1,85	0,57	0,24
VF	23,27	2,23	26,44	3,21	1,17	0,49
BIO	19,19	1,20	30,77	2,62	1,23	0,49
TF	28,97	2,58	34,87	3,33	1,63	0,65
SC1	27,49	2,43	31,84	3,54	1,53	0,63
SC2	20,38	1,71	23,82	2,60	0,87	0,37
90 CAC/ 10 FC	21,17	1,53	26,05	2,54	0,96	0,40
70 CAC/ 30 FC	21,40	1,77	27,83	2,58	1,06	0,44
50 CAC/ 50 FC	19,25	1,45	30,26	2,75	1,24	0,5
30 CAC/ 70 FC	14,45	0,99	31,41	2,44	1,21	0,48
10 CAC/ 90 FC	18,26	1,19	29,38	2,63	1,16	0,47
90 CAC / 10 CP	21,73	1,64	27,24	2,5	1,01	0,41
70 CAC/ 30 CP	18,30	1,32	25,09	1,98	0,76	0,31
50 CAC/ 50 CP	18,10	1,21	26,83	2,55	1,01	0,41
30 CAC / 70 CP	18,14	1,23	26,43	2,21	0,89	0,36
10 CAC/ 90 CP	13,35	0,96	18,29	1,79	0,36	0,17
90 CAC / 10 VF	18,88	1,5	23,46	2,32	0,77	0,33
70 CAC / 30 VF	23,75	1,97	28,91	2,91	1,21	0,50
50 CAC / 50 VF	24,10	2,02	27,27	2,38	0,98	0,40
30 CAC/ 70 VF	23,17	1,87	27,60	2,34	0,99	0,40
10 CAC/ 90 VF	21,59	1,97	24,68	2,80	0,97	0,41
90 CAC/ 10 BIO	22,83	1,71	28,72	2,67	1,14	0,46
70 CAC/ 30 BIO	19,81	1,59	28,83	2,89	1,20	0,49
50 CAC/ 50 BIO	23,93	2,01	28,22	2,80	1,15	0,47
30 CAC/ 70 BIO	23,54	1,88	29,46	2,74	1,19	0,48
10 CAC/ 90 BIO	13,99	0,93	17,87	1,42	0,24	0,12
90 CAC / 10 TF	25,55	1,98	31,23	2,90	1,33	0,53
70 CAC/ 30 TF	28,34	2,35	33,57	3,37	1,58	0,63
50 CAC/ 50 TF	27,01	2,24	31,42	3,13	1,40	0,57
30 CAC/ 70 TF	29,80	2,47	35,3	3,41	1,67	0,67
10 CAC / 90 TF	28,18	2,51	34,36	3,38	1,62	0,65
90 C1/ 10 CP	18,51	1,17	25,4	2,02	0,79	0,32
70 C1/ 30 CP	16,55	1,12	23,26	1,74	0,60	0,25
50 C1/ 50 CP	15,92	0,96	21,75	1,71	0,52	0,22
30 C1/ 70 CP	16,09	1,00	20,12	1,84	0,47	0,21
10 C1/ 90 CP	14,92	1,21	20,58	1,90	0,51	0,23
90C1/ 10 VF	16,17	1,11	21,4	2,16	0,62	0,27
70 C1 / 30 VF	19,58	1,37	25,96	2,40	0,92	0,38
50 C1 / 50 VF	21,02	1,61	26,27	2,21	0,88	0,36
30 C1 / 70 VF	17,42	1,31	22,63	2,16	0,68	0,29
10 C1/ 90 VF	21,15	1,88	25,46	2,67	0,97	0,41
90 C1/ 10 BIO	20,43	1,47	25,83	2,12	0,84	0,34
70 C1/ 30 BIO	17,48	1,39	23,87	2,35	0,80	0,34
50 C1/ 50 BIO	17,47	1,11	28,39	2,31	1,02	0,41
30 C1/ 70 BIO	19,23	1,46	26,73	2,45	0,97	0,4
10 C1/ 90 BIO	14,98	1,11	25,61	2,61	0,96	0,4
90 C1/ 10 TF	19,39	1,39	27,24	2,26	0,95	0,38
70 C1/ 30 TF	22,10	1,76	25,98	2,44	0,93	0,39
50 C1/ 50 TF	28,11	2,27	31,63	3,18	1,42	0,58
30 C1/ 70 TF	27,36	2,4	30,56	3,08	1,34	0,55

Continua...

## Apêndice 1.2. Continuação...

Substrato	H 90 cm <sup>-1</sup>	DC 90 mm <sup>-1</sup>	H120 cm <sup>-1</sup>	DC 120 mm <sup>-1</sup>	BSA 120	BSR 120
					mg <sup>-1</sup>	
10 C1/ 90 TF	29,30	2,58	34,50	3,59	1,68	0,68
90 C2/ 10 CP	17,19	1,15	21,27	1,74	0,50	0,22
70 C2/ 30 CP	15,72	1,25	20,91	1,96	0,54	0,24
50 C2/ 50 CP	14,48	0,92	20,08	1,65	0,42	0,19
30 C2/ 70 CP	16,45	1,08	22,30	1,87	0,59	0,25
10 C2/ 90 CP	17,50	1,18	22,83	1,80	0,60	0,25
90 C2/ 10 VF	15,43	1,03	21,34	1,77	0,51	0,22
70 C2/ 30 VF	13,58	0,84	23,94	2	0,71	0,30
50 C2/ 50 VF	21,48	1,59	27,45	2,32	0,98	0,40
30 C2/ 70 VF	22,64	1,74	28,09	2,62	1,09	0,45
10 C2/ 90 VF	24,06	1,96	28,31	2,92	1,18	0,49
90 C2/ 10 BIO	18,76	1,17	25,41	2,19	0,84	0,34
70 C2/ 30 BIO	16,92	1,20	23,71	2,02	0,7	0,29
50 C2/ 50 BIO	11,24	0,86	21,68	1,93	0,57	0,25
30 C2/ 70 BIO	19,07	1,31	26,31	2,16	0,87	0,36
10 C2/ 90 BIO	9,77	0,67	14,63	1,41	0,07	0,06
90 C2 / 10 TF	18,58	1,20	23,89	2,04	0,72	0,3
70 C2 / 30 TF	25,79	2,30	30,6	3,00	1,32	0,54
50 C2/ 50 TF	21,88	1,63	27,16	2,46	1,00	0,41
30 C2/ 70 TF	25,36	2,06	29,74	3,03	1,29	0,53
10 C2/ 90 TF	25,54	2,08	29,66	2,70	1,19	0,48
90 CP/ 10 FC	17,40	1,21	22,48	1,88	0,60	0,26
70 CP/ 30 FC	15,76	1,13	21,50	1,84	0,54	0,23
50 CP/ 50 FC	14,71	1,10	19,64	1,83	0,44	0,20
30 CP/ 70 FC	14,74	1,18	20,15	1,86	0,48	0,21
10 CP/ 90 FC	13,06	1,16	17,93	1,84	0,36	0,18
90 CP/ 10 VF	22,18	1,63	25,26	2,10	0,80	0,33
70 CP/ 30 VF	13,62	0,98	20,49	1,96	0,52	0,23
50 CP/ 50 VF	17,56	1,33	22,46	2,18	0,68	0,29
30 CP/ 70 VF	22,39	1,70	27,46	2,46	1,02	0,41
10 CP/ 90 VF	20,94	1,69	25,57	2,60	0,96	0,40
90 CP/ 10 BIO	24,01	1,93	26,97	2,76	1,07	0,45
70 CP/ 30 BIO	20,38	2,08	27,04	2,58	1,03	0,42
50 CP/ 50 BIO	20,22	1,56	25,80	2,39	0,91	0,38
30 CP/ 70 BIO	19,39	1,40	29,54	2,65	1,17	0,47
10 CP/ 90 BIO	13,48	0,93	16,01	1,27	0,10	0,07
90 CP/ 10 TF	16,34	1,32	20,82	1,92	0,53	0,23
70 CP/ 30 TF	25,75	2,19	30,59	3,09	1,35	0,55
50 CP/ 50 TF	28,92	2,50	33,55	3,34	1,57	0,63
30 CP/ 70 TF	27,18	2,36	31,52	3,22	1,43	0,58
10 CP/ 90 TF	28,97	2,4	33,97	3,48	1,63	0,65
90 FC/ 10 VF	17,24	1,17	29,11	2,42	1,09	0,44
70 FC/ 30 VF	20,89	1,72	26,39	2,54	0,98	0,41
50 FC/ 50 VF	14,78	1,04	25,74	2,24	0,87	0,36
30 FC/ 70 VF	23,18	1,98	28,46	2,76	1,15	0,47
10 FC / 90 VF	19,44	1,55	26,26	2,61	0,99	0,41
Média	19,92	1,54	26,00	2,41	0,93	0,38
Desvio padrão	4,68	0,49	4,44	0,53	0,36	0,14
CV (%)	23,50	31,68	17,09	21,78	39,08	36,29

SC1 - Substrato comercial a base de turfa; SC2- substrato comercial a base de casca de pinus; CAC- Casca de arroz carbonizada; C1- carvão vegetal com granulometria entre 1- 3 mm; C2- carvão vegetal com granulometria entre 3- 5 mm; FC- fibra de coco; CP- casca de pinus semidecomposta; VF- vermiculita fina; BIO- biossólido; TF- turfa; S1-substrato comercial a base de turfa e S2- substrato comercial a base de casca de pinus semidecomposta; CV- coeficiente de variação.

APÊNDICE 1.3 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS OBTIDOS NA REGRESSÃO POLINOMIAL. MÉDIA (X), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (R<sup>2</sup>), DESVIO PADRÃO (S<sub>XY</sub>), NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (A) COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV), QUADRADO MÉDIO (QM).

Equação	X	R <sup>2</sup>	S <sub>xy</sub>	α	CV (%)	QM		
						Regressão	Resíduo	
CAC	FC	28,62	0,90	0,81	0,00	2,83	13,21	0,65
	CP	24,49	0,62	2,44	0,14	9,96	19,62	5,96
	VF	26,27	0,37	1,79	0,38	6,81	3,91	1,21
	TF	32,33	0,75	2,04	0,05	6,31	26,01	4,18
	BIO	28,81	0,72	1,08	0,07	3,77	6,09	5,16
C1	CP	21,82	0,10	2,32	0,80	10,63	1,23	0,22
	VF	23,97	0,60	2,10	0,15	8,76	13,47	4,42
	BIO	25,83	0,58	2,77	0,17	10,72	21,51	7,71
	TF	29,2	0,86	2,45	0,01	8,39	74,61	6,02
C2	CP	21,03	0,61	1,27	0,15	6,04	5,14	1,62
	VF	24,78	0,98	0,65	0,00	2,64	46,02	0,42
	BIO	24,90	0,69	2,9	0,09	11,65	38,79	8,45
	TF	27,68	0,75	3,34	0,06	12,07	67,36	11,20
CP	FC	22,94	0,85	1,64	0,02	7,15	31,39	2,70
	VF	24,24	0,43	2,39	0,32	9,86	8,76	5,72
	BIO	27,46	0,76	1,82	0,05	6,63	21,30	3,31
	TF	29,61	0,88	2,39	0,01	8,07	89,74	5,73
FC	VF	27,46	0,57	1,30	0,18	4,73	4,558	1,702

CAC- Casca de arroz carbonizada; C1- carvão vegetal com granulometria entre 1- 3 mm; C2- carvão com granulometria entre 3- 5 mm; FC- fibra de coco; CP- casca de pinus semidecomposta; VF- vermiculita fina; BIO- biossólido e TF- turfa.

APÊNDICE 1.4 - CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DOS SUBSTRATOS E AS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DAS MUDAS DE *E. benthamii*. ALTURA AOS 120 DIAS (H 120), DIÂMETRO DE COLO AOS 120 DIAS (D120), BIOMASSA SECA AÉREA (BSA), BIOMASSA SECA RADICIAL (BSR), DENSIDADE APARENTE (DA), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO), MICROPOROSIDADE (MICRO), PH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE), POTÁSSIO (K), CÁLCIO (CA), MAGNÉSIO (MG), FÓSFORO (P), NITROGÊNIO (N) E ENXOFRE (S).

	Dap	Pt	Micro	Macro	pH	CE	Mg	K	P	Ca	N	C	S
H120	-0,24 <sup>*</sup>	0,26 <sup>**</sup>	0,20 <sup>*</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	-0,48 <sup>**</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>	-0,12 <sup>ns</sup>	-0,20 <sup>*</sup>	-0,27 <sup>**</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>**</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>
D120	-0,23 <sup>*</sup>	0,28 <sup>**</sup>	0,24 <sup>*</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	-0,51 <sup>**</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,27 <sup>**</sup>	-0,24 <sup>*</sup>	0,20 <sup>*</sup>	0,35 <sup>**</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>
BSA	-0,24 <sup>*</sup>	0,28 <sup>**</sup>	0,22 <sup>*</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	-0,50 <sup>**</sup>	-0,09 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,23 <sup>*</sup>	-0,26 <sup>**</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>**</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>
BSR	-0,24 <sup>*</sup>	0,28 <sup>**</sup>	0,23 <sup>*</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	-0,51 <sup>**</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,24 <sup>*</sup>	-0,26 <sup>**</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	0,37 <sup>**</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>

<sup>\*</sup> e <sup>\*\*</sup> significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente e <sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F.