

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO- OESTE**

**LETICIA MIRANDA**

**CONTROLE GENÉTICO PARA CRESCIMENTO VOLUMÉTRICO E MODELOS DE  
CALIBRAÇÃO NIRS PARA PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS PARA  
*Corymbia spp.***

**TESE DE DOUTORADO**

**IRATI - PR**

**2022**

LETICIA MIRANDA

CONTROLE GENÉTICO PARA CRESCIMENTO VOLUMÉTRICO E MODELOS DE  
CALIBRAÇÃO NIRS PARA PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS PARA  
*Corymbia spp.*

Tese de Doutorado apresentada à  
Universidade Estadual do Centro-Oeste,  
como parte das exigências do Programa  
de Pós-Graduação em Ciências Florestais,  
área de concentração em Manejo  
Sustentável dos Recursos Florestais, para  
a obtenção do título de Doutor.

Profº Dr. Evandro Vagner Tambarussi.

Orientador

Dra Regiane Abjaud Estopa

Coorientadora

IRATI - PR

2022





## TERMO DE APROVAÇÃO

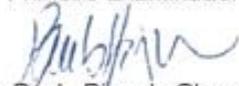
Defesa Nº 35

**Letícia Miranda**

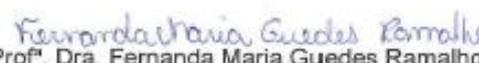
**“Controle genético para crescimento volumétrico e modelos de calibração NIRS para propriedades físicas e químicas para *Corymbia* spp.”**

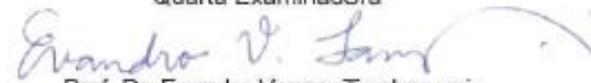
Tese aprovada em 18/08/2022, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

  
Prof. Dr. Celso Luis Marino  
Universidade Estadual Paulista  
Primeiro Examinador

  
Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein  
Universidade Federal de Lavras  
Segundo Examinador

  
Prof. Dra. Fabiana Schmidt Bandeira Peres  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Terceira Examinadora

  
Prof. Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho  
Klabin  
Quarta Examinadora

  
Prof. Dr. Evandro Vagner Tambarussi  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati – PR  
2022

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Salvatore Renna – Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 - FAX: (42) 3621-1090  
CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus Cedeteg: Alameda Élio Antonio Della Vecchia, 838, Bairro Vila Carlí – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-187 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000  
CEP 84.505-877 – IRATI – PR

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, primeiramente, eu agradeço a vida, força e perseverança por ter conseguido chegar até aqui, conciliando doutorado e trabalho.

Aos meus pais, Maria de Lourdes Miranda e Pedro Miranda, por terem me dado a vida, o amor incondicional, o maior bem que eu tenho, a educação, e todas as oportunidades para que eu pudesse ser quem sou hoje.

As minhas irmãs, Fabrícia e Renata, por todo o amor e incentivo, e ao meu sobrinho Matheus, que é a luz de nossas vidas e que tem todo o meu coração.

A empresa Klabin, que me acolheu, me ensinou, me formou como profissional e possibilitou essa capacitação por meio do doutorado e desenvolvimento deste projeto. Aproveito para agradecer ao Bruno Afonso Magro, Carlos A. S. Amaral Santos, José Artemio Totti e Francisco C. Razzolini pela confiança e apoio neste projeto.

Agradeço ao Mario G. Ladeira, por ter me incentivado a iniciar essa jornada, e a Regiane A. Estopa por ter estado comigo ao longo de todo o caminho, por ser coorientadora, colega, amiga e minha maior mentora. Ao Teotônio Assis, por toda sua contribuição na minha jornada profissional, por seus conselhos contribuições e amizade.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. Evandro V. Tambarussi, por toda a infinita paciência que teve comigo, por sua verdadeira orientação, disponibilidade, atenção, humildade e humanidade. Te admito muito como pessoa e como profissional e vou leva-lo como exemplo sempre.

A todos os professores que contribuíram para minha formação, em especial a Prof<sup>a</sup> Dra. Fabiana Bandeira e ao Prof<sup>o</sup> Dr. Celso Marino por toda contribuição e participações na qualificação e por aceitarem fazer parte da defesa e ao Prof.<sup>o</sup> Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein por aceitar participar da defesa.

Aos colegas Regiane Estopa, Flaviana Milagres, João Gabriel Z. Paludeto e Fernanda M. G. Ramalho por toda a ajuda concedida neste trabalho. Este resultado também é de vocês.

Aos meus colegas e amigos da Pesquisa Florestal Regiane, Fabrício, Mariane, James, Marco Figura, Caio, Marina e João Gabriel por todo o apoio e incentivo. Em especial agradeço a Gisele A. Moreira que é meu braço direito e com

quem aprendo a cada dia, e ao Valdir Moura por toda a incansável ajuda neste trabalho.

A todos os meus amigos, que incansavelmente me ouviram e me apoiaram, em especial aqueles que perto ou longe estiveram muito próximos nesta jornada, Fernanda Szekut, João Eduardo, Vanessa Romão, Ludmila, Bruna e Graziella, a amizade e apoio de vocês foi meu alicerce.

Aos meus amigos, familiares, colegas e professores que contribuíram para essa jornada, e que mesmo distante torcem por mim, Obrigada!

*As palavras sempre ficam. Lembrem-se do poder das palavras. Quem escreve constrói um castelo, e quem lê passa a habitá-lo.*

Markus Zusak (A menina que roubava livros).

A minha mãe, dedico.

## BIOGRAFIA

LETICIA MIRANDA, filha de Maria de Lourdes Miranda e Pedro Miranda, nasceu em 18 de outubro de 1988 na cidade de Lages, Santa Catarina.

Em agosto de 2006 ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), SC, diplomando-se em julho de 2011. De fevereiro a outubro de 2012 participou de intercâmbio de língua inglesa em Dublin na Irlanda.

Em fevereiro de 2013 ingressou no Curso de Mestrado em Ciências Florestais, na área de atuação de Silvicultura, pelo Programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu* da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) no Estado do Paraná, submetendo-se a defesa de dissertação intitulada “Efeito de Fitorreguladores e Rizobactérias Promotoras de Crescimento na Produção de Mudas Clonais de *Pinus taeda*” em agosto de 2015.

Ingressou em setembro de 2014 na área de Pesquisa Florestal da empresa Klabin S/A em Telêmaco Borba - PR, onde atua desde então, como Pesquisadora da área de Clonagem de Pinus e Eucalipto.

Em fevereiro de 2019 ingressou no curso de Doutorado em Ciência Florestais do Programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu* da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) no Estado do Paraná, na área de atuação de Genética e Melhoramento de Florestal.

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I - PARÂMETROS GENÉTICOS, INTENSIDADE DE SELEÇÃO E SELEÇÃO PRECOCE EM TESTES DE PROGÊNIES DE TRÊS ESPÉCIES DE *Corymbia spp.*

- Tabela 1. Origem e procedência das sementes de *C. citriodora*, *C. variegata* e *C. torelliana* que deram origem aos testes de progênie utilizados neste trabalho. ....24
- Tabela 2. Testes de progênies (TP) de *C. citriodora* (CCT), *C. variegata*, (CCV) e *C. torelliana* (CTO), localizados na Fazenda Monte Alegre, município de Telêmaco Borba, Paraná, instalados nos anos de 2014 a 2016. ....26
- Tabela 3. Modelos mistos para análise dos testes genéticos de *C. citriodora*, *C. torelliana* e *C. variegata*, em arranjo experimental *linear plot* (LP) e *single tree plot* (STP) com ou sem testemunha, instalados na Fazenda Monte Alegre em Telêmaco Borba – PR entre janeiro de 2014 e fevereiro de 2016. ....27
- Tabela 4. Estatística descritiva da análise dos testes de progênies de *C. citriodora* (CCT), *C. variegata* (CCV) e *C. torelliana* (CTO) instalados na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR entre janeiro de 2014 e fevereiro de 2016. ....32
- Tabela 5. Significância dos efeitos aleatórios de progênie e parcelas (Qui-quadrado – teste LRT) e efeitos fixos de repetição e testemunha (quadrado médio – teste F) para a variável volume individual (VOL) em m<sup>3</sup>, avaliados nos testes de progênies de *C. citriodora* (CCT) aos 2, 6 e 8 anos de idade, *C. variegata* (CCV) aos 2 e 8 anos de idade e *C. torelliana* (CTO) aos 2, 6 e 7 anos de idade, instalados na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR. 33
- Tabela 6. Parâmetros genéticos e componentes de variância para o caráter volume individual (VOL), de quatro testes de progênie (TP1, TP2, TP3 e TP4) de *C. citriodora* (CCT), aos 2, 6 e 8 anos de idade (I), dois testes de progênie (TP5 e TP6) de *C. variegata* (CCV), aos 2 e 8 anos de idade (I), e, quatro testes de progênie (TP7, TP8, TP9 e TP10) de *C. torelliana* (CTO), aos 4, 6 e 7 anos de idade (I), instalados em Telêmaco Borba – PR. ....34

- Tabela 7. Comparação entre diferentes intensidades de seleção clonal (i=1%, i=5% e i=10%) para número de indivíduos selecionados e tamanho efetivo populacional ( $N_e$ ), para quatro testes de *C. citriodora* (CCT), dois testes de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de *C. torelliana* (CTO), em Telêmaco Borba – PR, onde espécie (ESP), grupo (G) e idade (I, em anos). .....38
- Tabela 8. Comparação entre diferentes intensidades de seleção clonal (i=1%, i=5% e i=10%) para ganho genético em porcentagem e ganho genético absoluto em VOL (m<sup>3</sup>) para quatro testes de *C. citriodora* (CCT), dois testes de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de *C. torelliana* (CTO), em Telêmaco Borba – PR, onde espécie (ESP), grupo (G) e idade (I, em anos).....39
- Tabela 9. Correlação genética e correlação fenotípica entre idades de seleção, do volume individual (VOL) de um teste de *C. citriodora* (CCT) aos 2 e 6 anos de idade, e dois testes de *C. torelliana* (CTO) aos 4 e 7 anos de idade, instalados na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR. ....41

## **CAPÍTULO II - MODELOS DE ESPECTROSCOPIA NIR PARA FENOTIPAGEM DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus dunnii*.**

- Tabela 1. Modelos de espectroscopia NIR para espécies do gênero *Eucalyptus* presentes na literatura para predição de propriedades físicas e químicas da madeira, ligadas ao processo de produção de polpa celulósica. ....64
- Tabela 2. Normas e referências utilizadas como metodologia de análises químicas e físicas para obtenção das propriedades da madeira de amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*. ....69
- Tabela 3. Caracterização físico-química da madeira de 25 amostras de *C. citriodora* x *C. torelliana* (CTOxCCT) e 36 amostras de *E. dunnii* (EDU), para densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total (%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%). ....72
- Tabela 4. Calibração do modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Abordagem 1) de predição de espectros NIR para densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total

(%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%). .....75

Tabela 5. Calibração do modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* (Abordagem 2) de predição de espectros NIR para densidade básica da madeira (DBM) de cavacos ( $\text{Kg.cm}^{-3}$ ), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total (%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%). .....78

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I - PARÂMETROS GENÉTICOS, INTENSIDADE DE SELEÇÃO E SELEÇÃO PRECOCE EM TESTES DE PROGÊNIES DE TRÊS ESPÉCIES DE *Corymbia spp.*

- Figura 1. (A) Mapa da área de ocorrência natural do *Corymbia citriodora* na Austrália. Fonte: Reis et al. (2013). (B) Mapa da área de ocorrência natural da *Corymbia torelliana* na Austrália. Fonte: Reis et al. (2014). .....22
- Figura 2. Herdabilidade no sentido restrito ( $h^2$ ) e distribuição do erro padrão para o caráter volume individual (VOL) em m<sup>3</sup> de quatro testes de progênie (TP1, TP2, TP3 e TP4) de *C. citriodora* (CCT); dois testes de progênies (TP5 e TP6) de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de progênie (TP7, TP8, TP9 e TP10) de *C. torelliana* (CTO), instalado na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR, sendo Idade em anos. ....36
- Figura 3. Gráfico de ranking de clones selecionados dos testes: (A) TP3 de *C. citriodora* (CCT) aos 2 e 6 anos de idade; (B) TP7 de *C. torelliana* (CTO) aos 4 e 7 anos de idade; (C) TP8 de *C. torelliana* (CTO) aos 4 e 7 anos de idade, na intensidade de seleção de 10% ( $i=10\%$ ), instalado na Fazenda Monte Alegre em Telêmaco Borba – PR. ....42

### CAPÍTULO II - MODELOS DE ESPECTROSCOPIA NIR PARA FENOTIPAGEM DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus dunnii*.

- Figura 1. Amostra de serragem, processada em moinho ciclone, para coleta de espectros NIR. ....67
- Figura 2. Espectros não tratados, registrados nas 61 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*. ....73
- Figura 3. Análise de componentes principais dos espectros NIR das amostras de serragem de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*. ....74
- Figura 4. Correlação entre os valores de referência e os valores preditos por espectros NIR para modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Abordagem 1) para: (A) densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>); (B) teor de extrativos solúveis em acetona (%); (C) teor de lignina total (%); (D) relação

lignina siringil/guaiacil (S/G) e (E) rendimento depurado de polpa celulósica (%).....76

Figura 5. Correlação entre os valores de referência e os valores preditos por espectros NIR para modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* (Abordagem 2) para: (A) densidade básica da madeira (DBM) de cavacos ( $\text{Kg.cm}^{-3}$ ); (B) teor de extrativos solúveis em acetona (%); (C) teor de lignina total (%); (D) relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e (E) rendimento depurado de polpa celulósica (%). .....79

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>16</b>
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>17</b>

<b>CAPÍTULO I - PARÂMETROS GENÉTICOS, INTENSIDADE DE SELEÇÃO E SELEÇÃO PRECOCE EM TESTES DE PROGÊNIES DE TRÊS ESPÉCIES DE <i>Corymbia spp.</i></b> .....	<b>18</b>
--	-----------

<b>RESUMO</b> .....	<b>18</b>
---------------------	-----------

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>20</b>
-----------------------	-----------

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
----------------------------	-----------

<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
------------------------------------	-----------

2.1. MATERIAL EXPERIMENTAL.....	24
---------------------------------	----

2.2. ANÁLISE DOS DADOS.....	27
-----------------------------	----

2.3. PARÂMETROS GENÉTICOS .....	28
---------------------------------	----

2.3.1. <i>Tamanho efetivo populacional e Ganho de Seleção</i> .....	29
---	----

2.3.2. <i>Idade de Seleção</i> .....	30
--------------------------------------	----

<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
----------------------------	-----------

3.1. PARÂMETROS GENÉTICOS .....	34
---------------------------------	----

3.2. TAMANHO EFETIVO POPULACIONAL ( $N_E$ ) .....	37
---	----

3.3. IDADE DE SELEÇÃO .....	40
-----------------------------	----

<b>4. DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>
---------------------------	-----------

4.1. PARÂMETROS GENÉTICOS .....	44
---------------------------------	----

4.2. TAMANHO EFETIVO POPULACIONAL ( $N_E$ ) E GANHO DE SELEÇÃO .....	48
--	----

4.3. IDADE DE SELEÇÃO .....	50
-----------------------------	----

<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>51</b>
---------------------------	-----------

<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>53</b>
--	-----------

<b>CAPÍTULO II - MODELOS DE ESPECTROSCOPIA NIR PARA FENOTIPAGEM DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE <i>Corymbia torelliana</i> X <i>Corymbia citriodora</i> E <i>Eucalyptus dunnii</i>.</b> .....	<b>58</b>
--	-----------

<b>RESUMO</b> .....	<b>58</b>
---------------------	-----------

<b>ABSTRACT.....</b>	<b>60</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>62</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
2.1. MATERIAL GENÉTICO .....	66
2.2. COLETA, PREPARO DAS AMOSTRAS E LEITURAS NO ESPECTROFOTÔMETRO NIR .....	66
2.3. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) .....	67
2.4. COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES DE REFERÊNCIA .....	68
2.5. ANÁLISES DE REFERÊNCIA .....	68
2.5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA MADEIRA .....	68
2.5.2. <i>Polpação kraft</i> .....	69
2.6. CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	70
<b>3. RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
3.1. PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	72
3.2. ESPECTROS NO NIR E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	73
3.3. MODELOS DE ESPECTROSCOPIA NIR .....	74
<b>4. DISCUSSÃO .....</b>	<b>81</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA.....	81
4.1.1. DENSIDADE BÁSICA DE CAVACOS.....	81
4.1.2. TEOR DE EXTRATIVOS.....	82
4.1.3. LIGNINA TOTAL E RELAÇÃO LIGNINA S/G .....	84
4.1.4. RENDIMENTO DEPURADO DE POLPA CELULÓSICA .....	85
4.2. ESPECTROS NO NIR E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	86
4.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO CRUZADA DE MODELOS DE ESPECTROSCOPIA NIR.....	87
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>93</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>100</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....</b>	<b>101</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor de florestas plantadas no Brasil vem crescendo, e apostando cada vez mais no desenvolvimento de pesquisas e produtos ligados a bioeconomia. Em 2020, a área de florestas plantadas chegou à marca de 9,55 milhões de hectares, sendo 78% dessas florestas cultivadas com espécies do gênero *Eucalyptus* L' Heritier (IBA, 2021).

Com mais de 50 anos de melhoramento genético, a produtividade média dos plantios de eucalipto no Brasil, registrada em 2020, foi de  $36,8 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Essa produtividade sofreu uma queda de  $1,8 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  quando comparado ao ano de 2019, que vem sendo justificada por fatores bióticos e abióticos, além de mudanças no clima e expansões da fronteira de plantios (IBA, 2021).

A utilização de espécies e procedências adequadas e adaptadas aos fatores edafoclimáticos da região de plantio, bem como materiais genéticos de qualidade são essenciais para o sucesso da produção de florestas plantadas (MOURA, 2001). Fica evidente, portanto, que cada vez mais, faz-se necessário estudos de novas espécies e gêneros com o potencial de substituição de espécies tradicionais da eucaliptocultura no Brasil, principalmente para esses novos ambientes onde florestas estão sendo alocadas.

O gênero *Corymbia* K.D.Hill & L.A.S.Johnson, é conhecido principalmente por conter espécies com madeiras de qualidade e caracteres desejados nos setores de florestas plantadas, como alta densidade básica, altos níveis de extrativos e carboidratos e baixo percentual de lignina (LEE et al., 2009; SEGURA, 2015). Com valores de densidade básica da madeira acima de  $600 \text{ Kg.m}^{-3}$  aos sete anos, sua madeira tem sido alvo de programas de melhoramento genético principalmente nos setores de energia de biomassa e celulose e papel (ASSIS, 2011).

Os plantios de espécies puras de *Corymbia*, tem apresentado um crescimento inferior a muitas espécies de eucalipto, e esta pode ser a razão pela qual esse gênero ainda está sendo pouco explorado (ASSIS, 2014). Esta comparação pode ser injusta, quando observado o tempo dedicado ao melhoramento de cada um desses dois gêneros, além disso, a hibridação entre as espécies de *Corymbia* apresenta grande potencial para reunir os principais caracteres das espécies puras

desse gênero, gerando materiais genéticos potenciais para matéria prima de carvão, madeira serrada, energia e celulose (LEE et al. 2009; ASSIS, 2014).

Outro fator que impacta a produtividade dessas espécies é o fato de que a maioria dos plantios comerciais ainda são feitos pela via seminal, uma vez que as espécies do gênero *Corymbia*, com exceção do *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, são consideradas recalcitrantes ao enraizamento (REIS et al., 2013). Neste sentido, a hibridação, além de reunir caracteres de interesse, é uma ferramenta poderosa no programa de melhoramento genético para seleção e clonagem de indivíduos de alta produtividade. Segundo Reis et al. (2013), os primeiros clones, híbridos provenientes do cruzamento entre *C. torelliana* e *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, tem apresentado aumento de crescimento, facilidade na propagação vegetativa, além de maior tolerância a fatores bióticos, como pragas e doenças, tais como, *Cryphonectria cubensis* e *Puccinia psidii* (ALFENAS et al., 2004) e abióticos, como tolerância ao calor e estresse hídrico.

Existem diversos métodos e estratégias que podem ser adotados dentro de um programa de melhoramento genético. Segundo Fonseca et al. (2010), devido à heterose, o foco vem sendo a produção híbridos interespecíficos e posterior clonagem. Porém, para essa estratégia ter sucesso, é indispensável que se tenha um bom entendimento das preferências, sistema de reprodução e parâmetros genéticos das populações a serem trabalhadas, pois as estratégias serão norteadas com base nessas informações (TAMBARUSSI et al., 2018).

O tempo dispendido para a seleção em espécies florestais devido seu longo ciclo é um dos principais desafios dentro dos métodos de melhoramento praticados, e requer uma constante sofisticação (KAGEYAMA e VENCOVSKY, 1983). Visando a redução do tempo de obtenção de clones ou sementes melhoradas, a seleção precoce, tem se mostrado eficiente dentro dos programas de melhoramento genéticos de *Eucalyptus*, tanto para a seleção em testes de progênies de meios-irmãos, quanto para a seleção de clones híbridos (FONSECA et al., 2010).

Além disso, outros fatores são importantes dentro de um programa de melhoramento, sendo o principal deles o alinhamento entre floresta e indústria para que possa ocorrer a priorização e direcionamento dos caracteres a serem melhorados. Apesar do aumento recente em estudos envolvendo o gênero *Corymbia*, muitos

fatores importantes para um programa de melhoramento genético dessas espécies ainda precisam ser explorados, como os de qualidade da madeira.

A técnica espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) vem se mostrando uma boa alternativa diante da necessidade de análises precoces e não destrutivas para avaliar amostras que contenham ligações C-H, O-H, N-H, S-H ou C=O (PASQUINI, 2003), como é o caso da madeira. Para que o uso dessa alternativa seja eficiente, é necessário a construção de um modelo de predição, baseado em análises laboratoriais que serão utilizadas para gerar as referências necessárias para a construção e calibração desse modelo (ESTOPA et al., 2017).

## 2. OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa visou estimar e avaliar os parâmetros genéticos, idade ótima de seleção e tamanho efetivo de testes de progênies *Corymbia*, bem como a construção de um modelo de predição de espectroscopia NIR para propriedades da madeira de *Corymbia spp.* e *Eucalyptus dunnii*.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Investigar o controle genético do caráter volume individual (VOL), avaliar a capacidade de seleção precoce, por meio da correlação genética e fenotípica desse caráter em duas diferentes idades, e, comparar o efeito de três diferentes intensidades de seleção ( $i=1\%$ ,  $i=5\%$  e  $i=10\%$ ) no ganho genético e tamanho efetivo em populações de *Corymbia* em Telêmaco Borba, PR.
- Estabelecer modelos multivariados baseados em espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIRS) para estimativa de teor extrativos, teor de lignina total, relação S/G, densidade básica de cavacos e rendimento de polpa celulósica de *E. dunnii* e do híbrido de *C. torelliana* x *C. citriodora*.

### 3. REFERÊNCIAS

ALFENAS, A.C.; ZAURA, E.A.V.; MAFIA, R.G.; ASSIS, T.F. **Clonagem e Doenças do Eucalipto**. Viçosa: Editora UFV, 2004. 422 p.

ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: Desafios e perspectivas. **3º Encontro Brasileiro de Silvicultura**. 2014.

ASSIS, T. F. Hybrids and mini-cutting: a powerful combination that has revolutionized the *Eucalyptus* clonal forestry. In: **BMC Proceedings**. BioMed Central, p. 118, 2011.

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, R. F.; GOMES, F. J. B.; AMARAL, C. A. S. Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia NIR. **O Papel**, v.78, p.75, 2017.

FONSECA, S. M.; RESENDE, M. D. V.; ALFENAS, A. C.; GUIMARÃES, L. M. S.; ASSIS, T. F.; GRATTAPAGLIA, D. **Manual prático de melhoramento genético do eucalipto**. Viçosa, UFV, v.1, 200 p., 2010.

IBÁ - Instituto Brasileiro de Árvores. **Relatório IBÁ 2021**. Brasília: IBÁ, 2021.

KAGEYAMA, P. Y.; VENCOVSKY, R. Variação genética em progênies de uma população de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. **IPEF**, Piracicaba, v. 24, p. 9-26, 1983.

LEE D. J., HUTH J. R., BRAWNER J., DICKINSON G. R. Comparative performance of *Corymbia* hybrids and parental species in subtropical Queensland and implications for breeding and deployment. **Silvae Genetica**, v. 58 p. 205–212, 2009.

MOURA, V. P. G. **Potencial e uso de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* de acordo com locais e usos**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 32 p., 2001.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.14, n.2, p.198-219, 2003.

REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia citriodora*: Estado da Arte de Pesquisas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 32 p., 2013.

SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando a produção de celulose Kraft branqueada**. 2015. 198 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' – ESALQ, Piracicaba. 2015.

TAMBARUSSI, E. V.; PEREIRA, F. B.; DA SILVA, P. H. M.; LEE, D.; BUSH, D. Are tree breeders properly predicting genetic gain? A case study involving *Corymbia* species. **EUPHYTICA**, v. 214, p. 1-11, 2018.

## CAPÍTULO I - PARÂMETROS GENÉTICOS, INTENSIDADE DE SELEÇÃO E SELEÇÃO PRECOCE EM TESTES DE PROGÊNIES DE TRÊS ESPÉCIES DE *Corymbia spp.*

### RESUMO

A aptidão de crescimento e características da madeira das espécies do gênero *Corymbia* tem ganhado atenção especial dos programas de melhoramento florestal no Brasil, porém, seu potencial e variabilidade genética ainda precisam ser explorados. Dessa forma, esta pesquisa teve como principal objetivo investigar o controle genético do caráter volume individual (VOL), a correlação desse caráter em duas idades diferentes e a comparação entre três diferentes intensidades de seleção ( $i=1\%$ ,  $i=5\%$  e  $i=10\%$ ), seu efeito no ganho genético e tamanho efetivo das populações de *Corymbia* em Telêmaco Borba, PR. Para isso, 10 testes de progênies foram avaliados, sendo quatro testes de *C. citriodora* (CCT), dois testes de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de *C. torelliana* (CTO). As herdabilidades no sentido restrito ( $\hat{h}_a^2$ ) variaram de 0,24 a 0,62 entre os testes de CCT; de 0,07 a 0,21 entre os testes de CCV, e de 0,14 a 0,69 entre os testes de CTO. Os coeficientes de variação genético individual  $c\hat{v}_{gi}(\%)$  foram de 22,5 a 63,9 entre os testes de CCT; de 20,5 a 32,4% entre os testes de CCV, e de 22,9 a 41,3 entre os testes de CTO. Considerando uma intensidade de seleção (IS) de 10%, o  $N_e$  após a seleção ficará entre 31 e 98; 36 a 47 e 45 a 62 para os testes de CCT, CCV e CTO, respectivamente, sendo que para dois testes de CTO recomenda-se uma intensidade de seleção superior a 10%. Considerando também IS=10%, os ganhos genéticos ficaram entre 37% a 129%; 30% a 46% e 39 a 79% respectivamente para os testes de CCT, CCV e CTO. As correlações genéticas  $r_{g(x,y)}$  encontradas para VOL aos 2 e VOL aos 6 anos de idade em um teste de CCT e VOL aos 4 anos e VOL aos 7 anos de idade em dois testes de CTO, foram de 0,96; 0,98 e 0,93, respectivamente. Esse resultado aponta para uma alta e positiva correlação entre as idades de 2 e 6 anos para CCT e 4 e 7 anos para CTO, e possibilidade de seleção e captura de ganhos em idade precoce. O melhoramento genético das populações das três espécies estudadas de *Corymbia* na região de Telêmaco Borba, apresenta variabilidade genética significativa, tamanho efetivo adequado para a manutenção da variabilidade, e possibilidades de ganhos

absolutos e percentuais as intensidades de seleção de 5 e 10%, podendo ser a seleção precoce uma ferramenta eficiente para o uso do melhorista.

**Palavras chave: Testes de progênies, crescimento, volume, idade de seleção.**

## CHAPTER I - GENETIC PARAMETERS, SELECTION INTENSITY AND EARLY SELECTION IN THREE SPECIES PROGENE TESTS OF *Corymbia* spp.

### ABSTRACT

The growth aptitude and wood characteristics of *Corymbia* species have gained special attention from forest improvement programs in Brazil, however, their potential and genetic variability still need to be explored. Thus, the main objective of this research was to investigate the genetic control of the individual volume trait (VOL), the correlation of this trait at two different ages and the comparison between three different selection intensities ( $i=1\%$ ,  $i=5\%$  and  $i=10\%$ ), its effect on genetic gain and effective size of *Corymbia* populations in Telêmaco Borba, state of Paraná. For this, 10 progeny tests were evaluated, being four tests of *C. citriodora* (CCT), two tests of *C. variegata* (CCV) and four tests of *C. torelliana* (CTO). Narrow-sense heritabilities ( $\hat{h}_a^2$ ) ranged from 0,24 to 0,62 between CCT tests, from 0,07 to 0,21 between CCV tests, and from 0,14 to 0,69 between CTO tests. The individual genetic variation coefficients  $c\hat{v}_{gi}(\%)$  ranged from 22,5% to 63,9% between the CCT tests, from 20,5% to 32,4% between the CCV tests, and from 22,9% to 41,3% between the CTO tests. Considering a selection intensity (IS) of 10%, the  $N_e$  after selection will be between 31 and 98 for the CCT tests, from 36 to 47 for the CCV tests and from 45 to 62 for the CTO tests, and for two CTO tests a selection intensity greater than 10% is recommended. Also considering IS=10%, genetic gains ranged from 37% to 129% for CCT tests, from 30 to 46% between CCV tests, and from 39 to 79% for CTO tests. The genetics correlations  $r_{g(x,y)}$  found for VOL at 2 and VOL at 6 years in a CCT test and VOL at 4 years and VOL at 7 years in two CTO tests, were 0,96; 0,98 and 0,93; respectively. This result points to a high and positive correlation between the ages of 2 and 6 years for CCT and 4 and 7 years for CTO, and the possibility of selection and capture of gains at an early age. The genetic improvement of the populations of the three studied species of *Corymbia* in the region of Telêmaco Borba, presents significant genetic variability, adequate effective size for the maintenance of the variability, and possibilities of absolute and percentage gains the intensities of selection of 5 and 10%, being able to be early selection an efficient tool for the breeder to use.

**Keywords: Progeny tests, growth, volume, age of selection.**

## 1. INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* L' Heritier, tem passado por diversas revisões e reclassificações taxonômicas nos últimos 20 anos, fazendo com que muitas espécies previamente introduzidas no Brasil passassem a ser identificadas como do gênero *Corymbia* K.D. Hill & L.A.S. Johnson, ambos pertencentes a família Myrtaceae (Hill & Johnson, 1995). Com suas espécies originalmente distribuídas principalmente na Austrália, o gênero *Corymbia* é atualmente composto por 113 espécies e 23 subespécies (WANG, 2002).

Com o aumento da ameaça de mudanças climáticas e ocorrência de eventos bióticos e abióticos que tem afetado os plantios de eucalipto no Brasil e a tendência ao aumento de ocorrência de pragas e doenças devido à expansão das áreas de plantações comerciais (WINGFIELD et al., 2008), o interesse por espécies do gênero *Corymbia* vem aumentando significativamente.

O *Corymbia* spp. mostra diferenças na resistência e tolerância ao calor, estresse hídrico e resistência a pragas e doenças em relação às espécies de *Eucalyptus* (BRAWNER et al., 2011). Essas diferenças podem ser usadas com vantagem quando espécies e híbridos de *Corymbia* são plantados como componentes de uma mistura mais diversa de espécies de plantação.

Como principais espécies temos *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, *Corymbia maculata* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson, *Corymbia variegata* (F. Muell.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson e *Corymbia henryi* (S.T. Blake) K.D. Hill & L.A.S. Johnson. Essas quatro últimas espécies em particular pertencem a seção Politaria e, possuem muitas similaridades fenotípicas e morfológicas, e sua identificação, muitas vezes, só é precisa se amostradas em procedências específicas e previamente identificadas na Austrália, ou com o uso de marcadores moleculares (MCDONALD; BEAN, 2000).

Após a reclassificação de algumas espécies de *Eucalyptus* para o gênero *Corymbia* houve um aumento dos estudos moleculares para a classificação de suas espécies, o que resultou na reclassificação da espécie *C. citriodora* em duas subespécies, a *C. citriodora* subsp. *citriodora* e a *C. citriodora* subsp. *variegata*. Essa segunda subespécie era anteriormente classificada como parte da espécie *Eucalyptus maculata*, que atualmente é a espécie, *C. maculata* (LAN, 2011).

A *C. citriodora* possui ocorrência natural se estendendo por toda a faixa leste da Austrália, com maior concentração ao sul do estado de *Queensland* (Figura 1A). A espécie *C. torelliana*, por outro lado, tem sua ocorrência natural restrita a uma pequena área situada ao norte de *Queensland* (Figura 1B) (BOLAND et al., 2006).

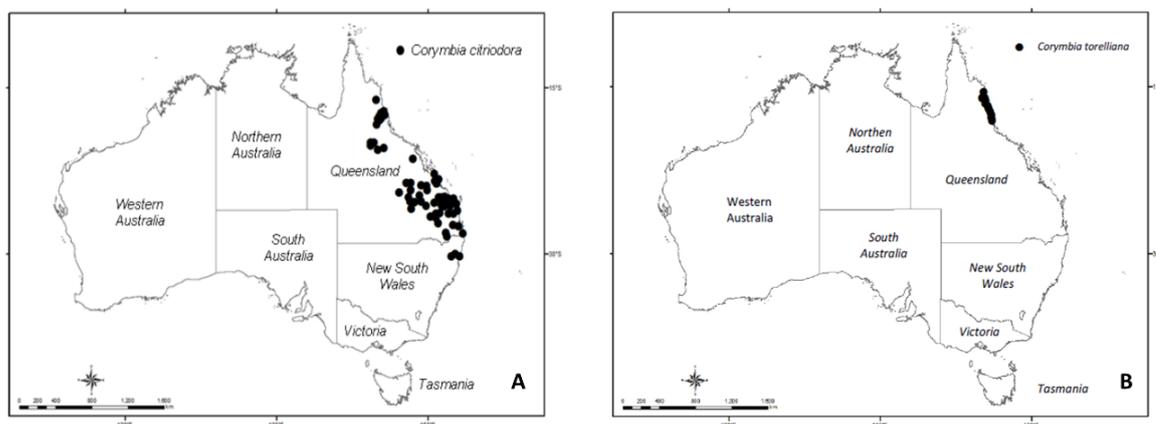


Figura 1. (A) Mapa da área de ocorrência natural do *Corymbia citriodora* na Austrália. Fonte: Reis et al. (2013). (B) Mapa da área de ocorrência natural da *Corymbia torelliana* na Austrália. Fonte: Reis et al. (2014).

Sendo uma das espécies de *Corymbia* mais cultivadas em todo o mundo, o *C. citriodora* tem como principais caracteres sua forma do tronco retilínea e madeira de alta densidade. No Brasil, seus plantios iniciais tinham como objetivo a produção de carvão vegetal, posteriormente observou-se potencialidades também nos ramos de serraria, energia, e a extração de óleo essencial de suas folhas (REIS et al., 2013).

Como espécie pura, *C. citriodora* tem potencial para produção silvicultural, apresentando boa forma e bom crescimento, mostrando em plantios seminais grande variabilidade com potencial de seleção de genótipos superiores. Sua madeira possui cerne duro, forte e resistente, com estimativas de densidade básica variando entre 950 a 1010 Kg.m<sup>-3</sup> (BOLAND et al., 2006).

Como espécie pura, *C. torelliana* é pouco cultivada no Brasil (LORENZI et al., 2003), o que pode estar relacionado a alguns aspectos silviculturais apresentados pela espécie, como sua arquitetura de formação de copa e baixo crescimento em altura, principalmente quando comparado a espécies de eucalipto (MOURA, 2001). Além disso, seu fuste pode apresentar protuberâncias resultantes da cicatrização de galhos, porém essa característica não é vista na maioria dos híbridos interespecíficos da espécie (REIS et al., 2014).

Na Austrália, um programa de polinização controlada para a produção de híbridos de *Corymbia* foi iniciado em 1999, e teve seus primeiros testes instalados em 2001. A maioria dos cruzamentos realizados tem como genitor feminino *C. torelliana*, por apresentar uma produção de sementes até quatro vezes maior que os demais cruzamentos testados (LEE, 2007).

Por se tratar de uma espécie que está fora da secção Politaria, os híbridos obtidos entre *C. torelliana* e as espécies dessa secção tem apresentado caracteres de crescimento, densidade da madeira, e forma de fuste semelhantes aos clones de *Eucalyptus*, além de apresentar tolerância a eventos bióticos e abióticos e aumento da predisposição a propagação vegetativa (LEE, 2007). Devido ao seu bom desempenho, especialmente o híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* têm sido o principal alvo de investimento em pesquisas no Brasil (REIS et al., 2014).

A *C. torelliana* apresenta maior capacidade de enraizamento quando comparada às demais espécies do gênero, com uma taxa de enraizamento média de 30%, podendo chegar a 80% dependendo do genótipo (ASSIS, 2000), o que torna essa espécie importante na composição de híbridos com a finalidade de seleção clonal, sendo atualmente este o seu maior interesse nos programas de melhoramento florestal.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi investigar o controle genético do caráter volume individual (VOL), a capacidade de aplicação da seleção precoce desse caráter, por meio da correlação genética e fenotípica em duas diferentes idades, e, comparar o efeito de três diferentes intensidades de seleção ( $i=1\%$ ,  $i=5\%$  e  $i=10\%$ ) no ganho genético e tamanho efetivo em populações de *Corymbia* em Telêmaco Borba, PR.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material Experimental

As populações em estudo estão distribuídas em dez testes de progênie (TP) de polinização aberta, sendo quatro testes de *C. citriodora* subsp. *citriodora* (CCT), quatro testes de *C. torelliana* (CTO) e dois testes de *C. citriodora* subsp. *variegata*, (CCV) localizado na Fazenda Monte Alegre, município de Telêmaco Borba, Paraná.

O clima da localidade é classificado como Cfb, mesotérmico úmido e sem estiagem, com temperatura média variando entre 16,3 °C e 23,2 °C nos meses mais frios e quentes, respectivamente, e precipitação média anual de 1.478 mm (KÖPPEN, 1936).

Os materiais genéticos estudados são originados da *Australia* que contem procedências selvagens e material selecionado de ensaios e populações de reprodução no Brasil, Austrália e África, (Tabela 1).

Tabela 1. Origem e procedência das sementes de *C. citriodora*, *C. variegata* e *C. torelliana* que deram origem aos testes de progênie utilizados neste trabalho.

<b>Espécie</b>	<b>Origem/Procedências</b>	<b>Local de coleta</b>
<i>C. citriodora</i>	Austrália, Woondum National Park (Queensland,) e Wondai (Queensland).	Zimbábue e Rio Claro, Estado de São Paulo, 1987.
<i>C. variegata</i>	Austrália, Woondum National Park (Queensland,) e Wondai (Queensland).	Estação Experimental de Anhembi, (Esalq/USP), 1987.
<i>C. torelliana</i>	Austrália, Helenvale e Kuranda, (Queensland).	

Para nenhuma das espécies foi possível a especificação de origem por progênie, visto que já eram populações introduzidas no Brasil, o que impossibilita a identificação de cada procedência e, portanto, a estimação da variabilidade genética que as diferenciam.

Os testes foram instalados no delineamento de blocos casualizados (DBC) com bordadura dupla, em dois arranjos experimentais, o *single tree plot* (STP) e *linear plot* (LP). Demais detalhes dos testes estão descritos na Tabela 2.

Para fins de análise e comparação dos resultados, os testes foram divididos em cinco grupos, em que se considerou como testes de um mesmo grupo, aqueles que tinham mais de 50% dos tratamentos (progênies) em comum. Os testes foram medidos em duas idades, sendo a primeira idade 2 anos para o TP1, TP3, TP4 e TP5, e 4 anos para o TP7, TP8, TP9 e TP10 e a segunda idade 6 anos para o TP3, TP9 e TP10, 7 anos para o TP7 e TP8, e 8 anos para o teste TP1, TP2, TP5 e TP6. O TP2 de CCT e TP6 de CCV não foram medidos aos 2 anos, portanto foram avaliados apenas na idade de 8 anos, e o TP4 de CCT não possui a segunda medição.

Tabela 2. Testes de progênies (TP) de *C. citriodora* (CCT), *C. variegata*, (CCV) e *C. torelliana* (CTO), localizados na Fazenda Monte Alegre, município de Telêmaco Borba, Paraná, instalados nos anos de 2014 a 2016.

Espécie	CCT				CCV		CTO			
	G1		G2		G3		G4		G5	
Grupo	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10
Implantação	23/01/14	02/05/14	05/02/16	03/06/16	17/02/14	02/05/14	28/01/15	23/04/15	19/02/15	01/06/15
Delineamento	DBC									
Tipo Parcela	Linear	Linear	STP	Linear	Linear	Linear	STP	STP	Linear	Linear
Plantas/ parcela	5	5	1	5	5	5	1	1	6	6
Repetições	10	10	20	10	10	10	30	20	6	6
Tratamentos	60	40	49	79	27	25	55	51	14	9
Total Plantas	3000	2000	980	3950	1350	1250	1650	1020	504	324
Espaçamento (m)	3x3	3x3	3,3x1,82	3,3x1,82	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3
Área Total (ha)	3,11	2,14	0,76	2,7	1,51	1,41	1,8	1,84	0,61	0,47
Tipo Solo	LVd1	LVd3	CXbd1	LVd3	LVd4	LVd3	LVw2	CXbd1	LVw2	LVd1
Testemunha	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não
Idade 1 (anos)	2	-	2	2	2	-	4	4	4	4
Idade 2 (anos)	8	8	6	-	8	8	7	7	6	6

CXbd1 - Cambissolo Háplico, textura média, floresta, relevo suave ondulado e ondulado; LVd1 - Latossolo vermelho, textura argilosa e muito argilosa, floresta, relevo suave ondulado e ondulado; LVd3 - Latossolo Vermelho, textura argilosa e muito argilosa, campo, relevo suave ondulado e ondulado; LVd4 – Latossolo Vermelho, textura média, campo, relevo suave ondulado e ondulado; LVw2 - Latossolo Vermelho Distroférico, textura argilosa e muito argilosa, campo, relevo suave ondulado e ondulado.

## 2.2. Análise dos Dados

As mensurações fenotípicas realizadas foram de CAP (circunferência a altura do peito, cm) à 1,30 m do solo e ALT (altura, m) de cada árvore, e com isso foi possível estimar o DAP (Diâmetro a Altura do Peito, cm), VOL (volume individual, m<sup>3</sup>) de acordo com as equações abaixo. As árvores quebradas, caídas, mortas e que por algum outro motivo não foi possível realizar as medições fenotípicas foram excluídas da análise.

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad , \quad VOL = \left( f \times \frac{DAP^2 \times \pi}{40000} \right) \times ALT..$$

Onde:  $f$  = fator de forma, igual a 0,5;  $\pi$  = 3,1416.

Para fins de estimativas dos parâmetros genéticos, apenas o caráter VOL foi considerado, já que os demais caracteres são altamente correlacionados (BELTRAME et al., 2012). Os dados fenotípicos coletados foram analisados por meio do pacote LME4 (BATES et al., 2015) e Sommer (COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016), no ambiente estatístico R (R CORE TEAM, 2019), que utiliza o procedimento de Máxima Verossimilhança Restrita (REML) para estimar os componentes de variância. A análise foi feita pelos modelos mistos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos mistos para análise dos testes genéticos de *C. citriodora*, *C. torelliana* e *C. variegata*, em arranjo experimental *linear plot* (LP) e *single tree plot* (STP) com ou sem testemunha, instalados na Fazenda Monte Alegre em Telêmaco Borba – PR entre janeiro de 2014 e fevereiro de 2016.

Arranjo Experimental	Modelo
LP com testemunha	$y = Xb + Ct + Za + Wp + e$
LP sem testemunha	$y = Xb + Za + Wp + e$
STP com testemunha	$y = Xb + Ct + Za + e$

$y$  = mensuração fenotípica do caráter de interesse;  $b$  = vetor de efeitos fixos associados à interação entre bloco e ambiente;  $t$  = efeito fixo para diferenciação de testemunhas;  $a$  = efeito aleatório associado aos efeitos genéticos aditivos individuais;  $p$  = efeito aleatório associado a parcela;  $e$  = erro experimental;  $X, C, Z$  e  $W$  = matrizes de incidência dos respectivos efeitos.

Os testes TP3 e TP4 de CCT e TP7 e TP8 de CTO, contém duas testemunhas comerciais (clones de *E. urophylla* x *E. grandis*), e para estes casos, considerou-se o efeito de testemunha como efeito fixo. A inclusão deste efeito é crucial

nessa análise já que o desempenho das testemunhas comerciais é comumente superior.

### 2.3. Parâmetros Genéticos

Os componentes de variância foram estimados de acordo com o delineamento experimental. No caso do modelo de LP com testemunha, os componentes de variância estimados foram o efeito aditivo ( $\hat{\sigma}_a^2$ ), de parcela ( $\hat{\sigma}_{parc}^2$ ) e residual ( $\hat{\sigma}_e^2$ ).

Os componentes de variância associados aos efeitos aleatórios foram estimados por meio do método da máxima verossimilhança restrita (REML) utilizando o pacote *sommer* (COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016), os quais serviram de base para a estimativa da variância fenotípica.

A significância dos efeitos aleatórios foi testada utilizando o teste da razão de verossimilhança (LRT), utilizando distribuição de qui-quadrado com um grau de liberdade. Já para os efeitos fixos, foi utilizado o teste *F* com aproximação de Satterthwaite (SATTERTHWAITE, 1946). Todas as análises e estimativas de parâmetros a seguir foram realizadas com o ambiente estatístico *R* (R CORE TEAM, 2019). Os parâmetros genéticos estimados foram:

- a) Herdabilidade no sentido restrito ( $\hat{h}_a^2$ ):  $\hat{h}_a^2 = \frac{\hat{\sigma}_a^2}{\hat{\sigma}_F^2}$ ;
- b) Herdabilidade média de famílias ( $\hat{h}_m^2$ ):  $\hat{h}_m^2 = \frac{\hat{\sigma}_g^2}{\hat{\sigma}_g^2 + \frac{\hat{\sigma}_{parc}^2}{n} + \frac{\hat{\sigma}_e^2}{k}}$
- c) Acurácia genética: ( $\hat{r}_{ac}$ ):  $\hat{r}_{ac} = \sqrt{\hat{h}_m^2}$ ;
- d) Acurácia genética na seleção individual ( $\hat{r}_{aci}$ ):  $\hat{r}_{aci} = \sqrt{\hat{h}_a^2}$ ;
- e) Coeficiente associado ao efeito da parcela ( $\hat{c}_{parc}^2$ ):  $\hat{c}_{parc}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{parc}^2}{\hat{\sigma}_F^2}$ , apenas para os testes com parcela linear;
- f) Coeficiente de variação genética aditiva individual:  $c\hat{v}_{gi}(\%) = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_a^2}}{x} \cdot 100$ ;

g) As estimativas do coeficiente de variação experimental ( $c\hat{v}_e(\%)$ ) variaram com os diferentes modelos/delineamentos, sendo estimado conforme consta na Tabela 3.

h) Coeficiente de variação relativo ( $\hat{b}$ ):  $\hat{b} = \frac{c\hat{v}_g(\%)}{c\hat{v}_e(\%)}$  (VENCOVSKY e BARRIGA, 1992).

Onde:  $\hat{\sigma}_F^2$ : variância fenotípica;  $\hat{\sigma}_a^2$ : variância genética aditiva;  $\hat{\sigma}_{\text{parc}}^2$ : variância entre parcelas,  $\hat{\sigma}_g^2$ : variância genotípica,  $\hat{\sigma}_e^2$ : variância residual,  $n$ : número de repetições,  $k$ : número de repetições x número de árvores na parcela,  $c\hat{v}_g(\%)$ : coeficiente de variação genética.

Tabela 3. Componentes de estimativas do coeficiente de variação experimental de testes de progênie de *C. citriodora* (CCT), *C. variegata*, (CCV) e *C. torelliana* (CTO), localizados na Fazenda Monte Alegre, município de Telêmaco Borba, Paraná, instalados nos anos de 2014 a 2016.

Arranjo Experimental	Modelo
Linear plot (LP)	$c\hat{v}_e(\%) = \frac{\sqrt{\frac{0,75 \hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2}{arv} + \hat{\sigma}_{\text{parc}}^2}}{\bar{x}} \cdot 100$
Single tree plot (STP)	$c\hat{v}_e(\%) = \frac{\sqrt{0,75 \hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2}}{\bar{x}} \cdot 100$

Onde:  $\hat{\sigma}_a^2$ : variância genética aditiva;  $\hat{\sigma}_{\text{parc}}^2$ : variância entre parcelas;  $\hat{\sigma}_e^2$ : variância residual;  $c\hat{v}_e(\%)$ : coeficiente de variação experimental em porcentagem;  $arv$  = número de plantas por parcela,  $\bar{x}$ = média do caráter.

Os erros padrão dos componentes de variância e herdabilidades foram estimados por meio da inversa da matriz de informação de Fisher (*Average information matrix*) utilizando a função *pin* do pacote *sommer* (COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016).

### 2.3.1. Tamanho efetivo populacional e Ganho de Seleção

Foi realizada uma análise de seleção individual, com o objetivo de simular três cenários de seleção para a produção de populações para melhoramento a curto prazo. 1) intensidade seleção (i), i=1% dos indivíduos da população; 2) intensidade seleção (i), i=5% dos indivíduos da população; 3) intensidade seleção (i), i=10% dos indivíduos da população.

A seleção individual foi simulada com base no valor genético predito (BLUP), estimado para VOL das progênie e por fim estimado o tamanho efetivo populacional ( $N_e$ ) conforme descrito por Resende (2002), pela expressão:

$$i) \text{ Tamanho efetivo populacional } (N_e) = N_e = \frac{4N_f \cdot \bar{k}_f}{\bar{k}_f + 3 + \left(\frac{\sigma_{k_f}^2}{\bar{k}_f}\right)}$$

Em que,  $\bar{k}_f$  é o número médio de indivíduos selecionados por matriz;  $\sigma_{k_f}^2$  é a variância do número de indivíduos selecionados por matriz e  $N_f$  é o número de matrizes selecionadas.

O ganho genético percentual foi calculado pela média do valor genético dos indivíduos selecionados, dividido pela média fenotípica do teste. O ganho genético absoluto para volume da madeira ( $m^3$ ) é a média do ganho genético dos indivíduos selecionados.

### 2.3.2. Idade de Seleção

A fim de avaliar a eficácia da seleção precoce dentro das espécies de *Corymbia* estudadas, foi realizada uma análise de correlação genética e fenotípica para os três testes em delineamento experimental *single tree plot* (STP): TP3 de *C. citriodora* (CCT) e os testes TP7 e TP8 de *C. torelliana*.

Para a obtenção das correlações genéticas o mesmo modelo foi ajustado, entretanto de forma multivariada com volume individual (VOL), em  $m^3$ , na idade precoce e na idade de rotação como caracteres resposta, o que permitiu a obtenção das covariâncias e variâncias genéticas aditivas entre os caracteres avaliados, possibilitando o cálculo da correlação por meio da seguinte formula:

$$j) \text{ Coeficiente de correlação genética } (r_{g(x,y)}): r_{g(x,y)} = \frac{Cov_{g(x,y)}}{\sqrt{\sigma_{g(x)}^2 \cdot \sigma_{g(y)}^2}};$$

$$k) \text{ Covariância genética } (Cov_{g(x,y)}): Cov_{g(x,y)} = \frac{\sigma_{g(x,y)}^2 - (\sigma_{g(x)}^2 + \sigma_{g(y)}^2)}{2}.$$

Onde:  $Cov$  = covariância genética entre tratamentos  $x$  e  $y$ ;  $x$  = volume individual (VOL) na idade precoce;  $y$  = volume individual (VOL) na idade de rotação;  $\sqrt{\hat{\sigma}_a(x)}$  para o caráter (VOL) em idade precoce;  $\sigma_{g(x)}^2$ : variância genética de  $x$ ;  $\sigma_{g(y)}^2$ : variância genética de  $y$ .

Os erros padrões das correlações genéticas foram obtidos de acordo com o método delta com uma aproximação de segunda ordem (Lynch; Walsh, 1998). O coeficiente de correção fenotípica ( $r_F$ ) foi calculado pelo método de correlação de Pearson e obtidas pela função *cor* do pacote *stats* no ambiente estatístico R (R Core Team 2019).

### 3. RESULTADOS

Os testes apresentaram sobrevivências que variaram de 61,2% a 96,0% (Tabela 4). Para os testes que possuem duas medições, percebe-se que não houve grande variação da sobrevivência entre a primeira e a segunda medição, sendo os testes de CTO aqueles que apresentaram as maiores sobrevivências, com média de 91,9% entre todas as medições (Tabela 4).

Tabela 4. Estatística descritiva da análise dos testes de progênies de *C. citriodora* (CCT), *C. variegata* (CCV) e *C. torelliana* (CTO) instalados na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR entre janeiro de 2014 e fevereiro de 2016.

Espécie	Teste	Idade	Média VOL	DP	Vivas	CV%	NA	SOB%	
CCT	TP1	2	0,022	0,011	2053	52,7	947	68,4	
		8	0,281	0,181	1835	64,2	1165	61,2	
	TP2	8	0,267	0,216	1548	81,0	452	77,4	
		2	0,030	0,018	926	61,6	54	94,5	
CCV	TP3	6	0,151	0,110	873	72,9	107	89,1	
		2	0,023	0,016	3634	67,2	316	92,0	
	TP4	2	0,024	0,010	1235	44,1	115	91,5	
		8	0,256	0,160	1185	62,6	165	87,8	
	TP5	8	0,386	0,284	796	73,5	454	63,7	
		4	0,144	0,082	1464	57,1	186	88,7	
	CTO	TP6	7	0,295	0,174	1462	59,0	188	88,6
			4	0,104	0,063	443	60,2	61	87,9
		TP7	6	0,222	0,140	443	63,,3	61	87,9
			4	0,065	0,045	974	69,7	46	95,5
TP8		7	0,155	0,108	971	69,7	49	95,2	
		4	0,070	0,037	311	53,3	13	96,0	
6	0,188	0,110	309	58,4	15	95,4			

Onde = Idade: idade em anos; VOL: média do volume individual, em m<sup>3</sup>; DP: desvio padrão; Vivas: número de árvores vivas; CV%: coeficiente de variação experimental; NA: número de plantas mortas; SOB%: sobrevivência.

As progênies de CCT apresentaram VOL médio de 0,026 m<sup>3</sup> aos 2 anos de idade; 0,151 m<sup>3</sup> aos 6 anos e 0,274 m<sup>3</sup> aos 8 anos, enquanto as progênies de CCV apresentaram VOL médio de 0,024 m<sup>3</sup> aos 2 anos e 0,321 m<sup>3</sup> aos 8 anos de idade, o que comparativamente indicam as progênies de CCV com maior potencial de crescimento, especialmente as do teste TP6, que apresentaram um volume superior aos demais testes na mesma idade de avaliação (Tabela 4).

Entre os testes de CTO, as médias de volume individual foram de 0,096 m<sup>3</sup> aos 4 anos; 0,205 m<sup>3</sup> aos 6 anos e 0,225 m<sup>3</sup> aos 7 anos (Tabela 4).

A análise de significância dos efeitos aleatórios de progênie e parcela, por meio do teste da razão de verossimilhança LRT foram significativas a 5% de probabilidade para o teste TP6 e a 1% de probabilidade para todos os demais testes, e demonstra haver variabilidade a ser explorada entre progênies para todas as populações e testes avaliados para o caráter volume individual (VOL) em m<sup>3</sup>, para todas as idades (Tabela 5). O efeito fixo de testemunha foi significativo para todos os testes onde este efeito estava presente (Tabela 5).

Tabela 5. Significância dos efeitos aleatórios de progênie e parcelas (Qui-quadrado – teste LRT) e efeitos fixos de repetição e testemunha (quadrado médio – teste F) para a variável volume individual (VOL) em m<sup>3</sup>, avaliados nos testes de progênies de *C. citriodora* (CCT) aos 2, 6 e 8 anos de idade, *C. variegata* (CCV) aos 2 e 8 anos de idade e *C. torelliana* (CTO) aos 2, 6 e 7 anos de idade, instalados na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR.

Espécie	Grupo	TESTE	Efeitos Aleatórios		Efeitos Fixos	
			Idade 1	Idade 2	Idade 1	Idade 2
CCT	G1	TP1	69,3 **	37,5 **	0,0012 **	0,1044 ns
			7,3 **	0,0 ns	- -	- -
		TP2	- -	117,6 **	- -	0,0202 ns
	- -		0,0 ns	- -	- -	
	G2	TP3	19,3 **	27,4 **	0,0004 **	0,0074 ns
			- -	- -	0,0615 **	1,2395 **
TP4		112 **	- -	0,0019 **	- -	
	40,2 **	- -	0,0507 **	- -		
CCV	G3	TP5	20,2 **	21,3 **	0,0001 ns	0,0539 ns
			2,4 ns	0,8 ns	- -	- -
		TP6	- -	2,8 *	- -	0,061 ns
- -	0 ns		- -	- -		
CTO	G4	TP7	166,7 **	124,6 **	0,0047 ns	0,0344 **
			- -	- -	0,4448 **	1,8303 **
		TP8	7,1 **	10,4 **	0,0185 **	0,0598 **
	- -		- -	0,0806 **	2,5628 **	
	G5	TP9	12,1 **	11,1 **	0,0029 ns	0,0312 ns
			0 ns	0,0 ns	- -	- -
TP10		6 **	13,5 **	0,0001 ns	0,0008 ns	
	1,1 -	0,0 ns	- -	- -		

ns: não significativo ; \*: significativo a 5% de probabilidade; \*\*: significativo a 1% de probabilidade, -: não estimado.

### 3.1. Parâmetros Genéticos

A variação genética individual percentual expressa pelo  $c\hat{v}_{gi}(\%)$  apresentou valores de 31,65% e 63,9% para os testes TP1 e TP2 de CCT aos 8 anos de idade, e 34,36% no teste TP3 aos 6 anos de idade (Tabela 6). O coeficiente de correlação relativo ( $\hat{b}$ ) na idade de 8 anos para CCT, foi de 1,14 no TP1, e 1,91 no TP2, e de 0,6 aos 6 anos para o teste TP3 (Tabela 6).

Tabela 6. Parâmetros genéticos e componentes de variância para o caráter volume individual (VOL), de quatro testes de progênie (TP1, TP2, TP3 e TP4) de *C. citriodora* (CCT), aos 2, 6 e 8 anos de idade (I), dois testes de progênie (TP5 e TP6) de *C. variegata* (CCV), aos 2 e 8 anos de idade (I), e, quatro testes de progênie (TP7, TP8, TP9 e TP10) de *C. torelliana* (CTO), aos 4, 6 e 7 anos de idade (I), instalados em Telêmaco Borba – PR.

Teste	I	$\hat{\sigma}_a^2$	$\hat{\sigma}_F^2$	$\hat{h}_a^2$	$\hat{h}_m^2$	$\hat{r}_{ac}$	$\hat{r}_{aci}$	$c\hat{v}_{gi}$	$c\hat{v}_e$	$\hat{b}$
TP1	2	4,8x10 <sup>-5</sup>	1,2x10 <sup>-4</sup>	0,38	0,85	0,86	0,67	31,84	24,30	1,31
	8	0,008	0,032	0,24	0,80	0,81	0,58	31,65	27,74	1,14
TP2	8	0,029	0,048	0,62	0,95	0,92	0,8	63,94	33,54	1,91
TP3	2	4,5x10 <sup>-5</sup>	1,8x10 <sup>-4</sup>	0,26	0,63	0,73	0,57	22,53	43,09	0,52
	6	0,003	0,008	0,33	0,71	0,77	0,62	34,36	57,30	0,60
TP4	2	5,4x10 <sup>-5</sup>	1,5x10 <sup>-4</sup>	0,36	0,82	0,87	0,66	31,41	26,02	1,21
TP5	2	2,1 x10 <sup>-5</sup>	1,1x10 <sup>-4</sup>	0,19	0,72	0,8	0,54	19,38	20,55	0,94
	8	0,005	0,025	0,21	0,75	0,81	0,55	28,28	28,34	1,00
TP6	8	0,006	0,081	0,07	0,48	0,55	0,37	19,26	32,64	0,59
TP7	4	0,003	0,005	0,69	0,94	0,9	0,83	40,35	44,10	0,91
	7	0,013	0,024	0,57	0,91	0,88	0,77	39,34	48,41	0,81
TP8	4	2x10 <sup>-4</sup>	0,002	0,14	0,44	0,62	0,45	22,79	60,30	0,38
	7	0,001	0,008	0,17	0,51	0,67	0,5	23,41	55,14	0,42
TP9	4	0,001	0,004	0,29	0,78	0,81	0,61	32,61	23,74	1,37
	6	0,005	0,02	0,27	0,77	0,8	0,59	32,69	24,92	1,31
TP10	4	4x10 <sup>-4</sup>	0,001	0,3	0,75	0,79	0,6	29,55	23,45	1,26
	6	0,006	0,012	0,49	0,89	0,85	0,72	41,34	23,09	1,79

Onde:  $\hat{\sigma}_a^2$ : variância genética aditiva;  $\hat{\sigma}_F^2$ : variância fenotípica;  $\hat{h}_a^2$ : herdabilidade no sentido restrito;  $\hat{h}_m^2$ : herdabilidade média;  $\hat{r}_{ac}$ : Acurácia genética;  $\hat{r}_{aci}$ : Acurácia genética na seleção individual;  $c\hat{v}_{gi}$ : Coeficiente de variação genética aditiva individual em porcentagem;  $c\hat{v}_e(\%)$ : coeficiente de variação experimental em porcentagem; e, ( $\hat{b}$ ): coeficiente de correlação relativo.

Já para os testes TP5 e TP6 de CCV, os coeficientes de variação genética individual foram de 28,28% e 19,26% aos 8 anos de idade (Tabela 6). Nos testes de CCV, o ( $\hat{b}$ ) foi de 0,59 no TP6 e no teste TP5 os valores foram de 1,0 aos 8 anos de idade, e de 0,94 aos 2 anos de idade (Tabela 6).

Para os testes TP9 e TP10 de CTO, os valores de  $c\hat{v}_{gi}$  foram de 32,69% e 41,34% aos 6 anos de idade, e para os testes TP7 e TP8 de 39,34% e 23,41% aos 7 anos de idade (Tabela 6). Na espécie CTO o ( $\hat{b}$ ) foi de 0,81 e 0,42 aos 7 anos de idade, e de 1,31 e 1,79 aos 6 anos de idade para testes TP7, TP8, TP9 e TP10, respectivamente (Tabela 6).

As herdabilidades médias ( $\hat{h}_m^2$ ) das progênies de CCT para o caráter VOL encontradas foram de 0,85 e 0,80 aos 2 e 8 anos de idade para o teste TP1, e de 0,95 para o teste TP2 aos 8 anos de idade (Tabela 6). O teste TP3 de CCT apresentou valores de 0,63 e 0,71 aos 2 e 6 anos de idade, respectivamente, enquanto o teste TP4 obteve o valor de 0,82 aos 2 anos de idade (Tabela 6). Nos testes de CCV, as herdabilidades médias foram de 0,72 e 0,75 no teste TP5 aos 2 e 8 anos de idade, e de 0,48 no teste TP6 aos 8 anos de idade (Tabela 6).

Entre os testes de CTO, as herdabilidades médias das progênies aos 4 anos de idade foram de 0,94 e 0,44 e aos 7 anos de idade foram de 0,91 e 0,51 para os testes TP7 e TP8, respectivamente (Tabela 6). As herdabilidades médias de progênies estimadas no teste TP9 foram de 0,78 e 0,77 e no teste TP10 de 0,75 e 0,89 aos 4 e 6 anos, respectivamente (Tabela 6).

A herdabilidade no sentido restrito ( $\hat{h}_a^2$ ) para o caráter VOL variou entre as espécies. No CCT, os valores aos 8 anos foram de 0,24 no teste TP1; de 0,62 no teste TP2 e de 0,33 no teste TP3 aos 6 anos. Para as idades precoces, podemos observar os valores de ( $\hat{h}_a^2$ ) de 0,38 para o TP1, 0,26 para o TP3 e 0,36 para o teste TP4 (Figura 2A).

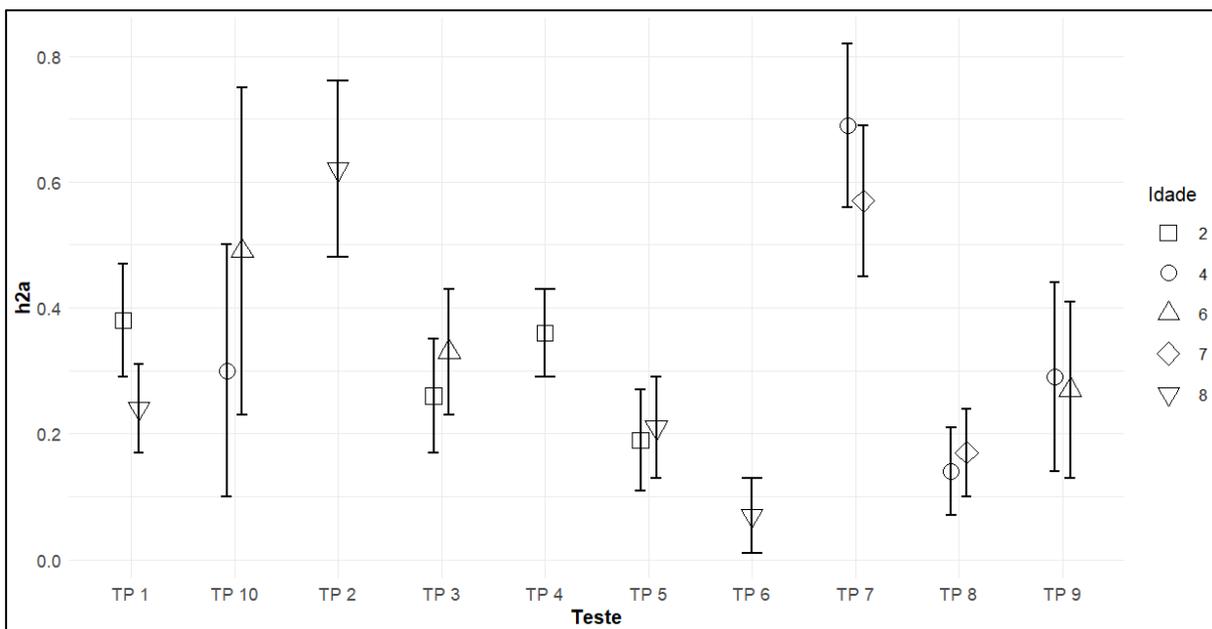


Figura 2. Herdabilidade no sentido restrito ( $\hat{h}_a^2$ ) e distribuição do erro padrão para o caráter volume individual (VOL) em m<sup>3</sup> de quatro testes de progênie (TP1, TP2, TP3 e TP4) de *C. citriodora* (CCT); dois testes de progênies (TP5 e TP6) de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de progênie (TP7, TP8, TP9 e TP10) de *C. torelliana* (CTO), instalado na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR, sendo Idade em anos.

Nas progênies de CCV, a herdabilidade ( $\hat{h}_a^2$ ) também apresentou uma alta amplitude aos 8 anos, com um valor de 0,07 para o teste TP6 e 0,21 para o teste TP5 (Figura 2). Dentro do CTO, as herdabilidades foram, de 0,69 e 0,14 para os testes TP7 e TP8 respectivamente aos 4 anos, e de 0,57 e 0,17 para os mesmos testes aos 7 anos (Figura 2). Neste caso, esse resultado pode estar relacionado aos altos valores de coeficiente de variação ambiental  $c\hat{v}_e$ , principalmente para o TP8 (60,3% aos 4 anos e 55,1% aos 7 anos), conforme Tabela 6. Os testes TP9 e TP10 de CTO apresentaram valores de herdabilidade baixos, ficando abaixo de 0,3 para o TP9 e abaixo de 0,5 para o TP10 em ambas as idades de predição (Figura 2).

Entre os testes de CCT, as acurácias genéticas ( $\hat{r}_{ac}$ ) apresentaram valores de 0,81 e 0,92 no TP1 e TP2 aos 8 anos, respectivamente (Tabela 6). Também na CCT, as acurácias foram de 0,73 e 0,77 no TP3 aos 2 e 6 anos de idade, respectivamente, e de 0,87 no TP4 aos 2 anos de idade (Tabela 6). Nos testes de CCV, as acurácias foram de 0,80 e 0,81 aos 2 e 8 anos respectivamente no TP5, e de 0,55 no TP6 aos 8 anos de idade (Tabela 6).

Nos testes de CTO, as acurácias encontradas foram de 0,90 e 0,88 no TP7 e 0,62 e 0,67 no TP8 aos 4 e 7 anos respectivamente (Tabela 6). Já nos testes TP9 e

TP10 as acurácias foram de 0,81 e 0,79 aos 4 anos e 0,80 e 0,85 aos 6 anos de idade (Tabela 6).

As acurácias genéticas na seleção individual ( $\hat{r}_{aci}$ ) apresentaram uma média geral de 0,65 entre todas as medições dos testes de CCT, 0,49 entre as medições dos testes de CCV, e 0,65 entre as medições dos testes de CTO (Tabela 6). Todas as medições dos testes de CCT apresentaram altos valores de acurácia individual, que variaram de 0,57 a 0,80 (Tabela 6). O teste TP6 aos 8 anos apresenta a menor herdabilidade individual, e também possui o menor valor de acurácia (0,37) (Tabela 6). Para os testes de CTO nas idades de 7 e 6 anos, os valores ficaram entre 0,5 e 0,8, considerados valores adequados, apresentando apenas um valor abaixo de 0,5 para o teste TP8 aos 4 anos (Tabela 6).

### **3.2. Tamanho efetivo populacional ( $N_e$ )**

Foi realizada uma análise de seleção clonal em cada um dos testes de progênies, em que foram comparadas três intensidades de seleção clonal, seleção de 1% dos melhores indivíduos ( $i=1\%$ ); seleção de 5% dos melhores indivíduos ( $i=5\%$ ); e seleção de 10% dos melhores indivíduos ( $i=10\%$ ), e seu efeito no número de indivíduos selecionados, tamanho efetivo populacional (Tabela 7), ganho genético percentual e ganho genético em metros cúbicos (Tabela 8).

Tabela 7. Comparação entre diferentes intensidades de seleção clonal (i=1%, i=5% e i=10%) para número de indivíduos selecionados e tamanho efetivo populacional ( $N_e$ ), para quatro testes de *C. citriodora* (CCT), dois testes de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de *C. torelliana* (CTO), em Telêmaco Borba – PR, onde espécie (ESP), grupo (G) e idade (I, em anos).

ESP	G	Teste	I	Vivas	Indivíduos Selecionados			Tamanho Efetivo ( $N_e$ )			
					i=1%	i=5%	i=10%	Geral	i=1%	i=5%	i=10%
CCT	G1	TP1	2	2053	21	103	205	217	17	48	68
			8	1835	18	92	184	213	14	48	73
		TP2	8	1548	15	77	155	147	7	25	43
	G2	TP3	2	926	9	46	93	169	7	21	31
			6	873	9	44	87	166	9	22	34
		TP4	2	3634	36	182	363	296	18	66	98
CCV	G3	TP5	2	1235	12	62	124	101	10	33	47
			8	1185	12	59	119	100	10	30	41
		TP6	8	796	8	40	80	89	7	24	36
CTO	G4	TP7	4	1464	15	73	146	195	11	38	57
			7	1462	15	73	146	194	12	41	62
		TP8	4	974	10	49	97	176	8	32	51
	G5	TP9	7	971	10	49	97	176	8	28	45
			4	443	4	22	44	51	3	11	17
		TP10	6	443	4	22	44	51	3	10	16
			4	311	3	16	31	33	2	8	13
			6	309	3	15	31	33	2	7	10

Onde, i=1%: intensidade de seleção de 1%; i=5%: intensidade de seleção de 5% e i=10%: intensidade de seleção de 10%.

Considerando a manutenção de um tamanho efetivo ( $N_e$ ) mínimo de 30, para os testes de CCT, o TP1 e TP4 a intensidade de seleção ideal é de 5% (Tabela 7). Para o TP2, mesmo sendo um teste com uma quantidade razoavelmente grande de indivíduos (1.548), a intensidade de seleção adequada para a manutenção de um  $N_e$  mínimo de 30, foi de 10%, o que também ocorre para o teste TP3 com 873 indivíduos. O CCV indica uma intensidade de seleção de 5% e 10% para os testes TP5 e TP2, respectivamente (Tabela 7).

Tabela 8. Comparação entre diferentes intensidades de seleção clonal (i=1%, i=5% e i=10%) para ganho genético em porcentagem e ganho genético absoluto em VOL (m<sup>3</sup>) para quatro testes de *C. citriodora* (CCT), dois testes de *C. variegata* (CCV) e quatro testes de *C. torelliana* (CTO), em Telêmaco Borba – PR, onde espécie (ESP), grupo (G) e idade (I, em anos).

ESP	G	Teste	I	Vivas	Ganho genético (%)			Ganho genético (m <sup>3</sup> )		
					i=1%	i=5%	i=10%	i=1%	i=5%	i=10%
CCT	G1	TP1	2	2.053	86	63	52	0,019	0,014	0,011
			8	1.835	84	65	55	0,236	0,183	0,153
	G2	TP2	8	1.548	238	162	129	0,635	0,432	0,346
			2	926	67	46	37	0,020	0,014	0,011
		TP3	6	873	92	71	59	0,139	0,106	0,089
			2	3.634	90	63	52	0,021	0,015	0,012
CCV	G3	TP5	2	1.235	49	35	30	0,012	0,008	0,007
			8	1.185	78	56	46	0,199	0,143	0,118
		8	796	68	48	40	0,263	0,185	0,153	
CTO	G4	TP7	4	1.464	134	97	79	0,193	0,140	0,114
			7	1.462	133	93	76	0,393	0,274	0,223
	G5	TP8	4	974	95	52	39	0,062	0,034	0,025
			7	971	81	50	39	0,126	0,078	0,060
		TP9	4	443	97	67	57	0,101	0,070	0,059
			6	443	108	73	58	0,239	0,162	0,128
	G4	TP10	4	311	90	58	47	0,063	0,040	0,033
			6	309	157	99	76	0,295	0,186	0,142

Onde, i=1%: intensidade de seleção de 1%; i=5%: intensidade de seleção de 5% e i=10%: intensidade de seleção de 10%.

Para o CTO, o grupo G4 que possui testes com uma maior quantidade de indivíduos indica uma intensidade de seleção máxima adequada de 5%. Para o grupo G5, mesmo 10% de intensidade de seleção não captura um tamanho efetivo populacional adequado, provavelmente influenciado pela quantidade de indivíduos nos testes (entre 300 e 450) (Tabela 7). Para estes casos, é recomendada uma seleção menos rigorosa, mesmo que o ganho não seja alto.

Os ganhos genéticos percentuais variam de acordo com o teste, idade e intensidade de seleção. O maior ganho genético, de 238%, foi observado no TP2 de

CCT, na idade de 8 anos e  $i=1\%$ , e o menor ganho no teste TP5 na idade de 2 anos e  $i=10\%$ . Analisando apenas os testes na idade de rotação, para a espécie de *C. citriodora* (CCT) o teste TP1 aos 8 anos tem como intensidade de seleção recomendada de 5% ( $N_e = 48$ ), com ganho genético de 65% ou um adicional de 0,183 m<sup>3</sup> na média geral, para 92 indivíduos selecionados. O teste TP3, com 87 indivíduos selecionados aos 6 anos de idade, para uma intensidade de seleção de 10% ( $N_e = 34$ ), apresenta 59% de ganho genético, ou um adicional de 0,089 m<sup>3</sup> na média geral. Para o teste TP2, aos 8 anos de idade o ganho genético fica em 129% ou 0,346 m<sup>3</sup> somados à média geral, para uma intensidade de seleção de 10% ( $N_e = 43$ ) (Tabela 8).

A mesma análise nos testes de *C. variegata* (CCV), mostra 119 indivíduos selecionados do teste TP5 aos 8 anos, a uma intensidade de seleção de 5% ( $N_e= 30$ ), com um ganho genético de 56% ou 0,143 m<sup>3</sup> adicionados a média geral. E, para o teste TP6 da mesma espécie, na intensidade de seleção de 10% ( $N_e = 36$ ), um ganho genético de 40% ou 0,153 m<sup>3</sup> adicionados a média geral, para 80 indivíduos selecionados aos 8 anos (Tabela 7 e Tabela 8).

Para os quatro testes de *C. torelliana* (CTO), seguindo a premissa de tamanho efetivo mínimo, apenas os testes TP7 e o TP8 possuem indivíduos selecionados nas intensidades de seleção propostas. O teste TP7, apresenta 73 indivíduos selecionados com  $i=5\%$  e  $N_e=41$ , com um ganho genético de 93% ou 0,274 m<sup>3</sup> somados a média geral do teste, aos 7 anos. E, para o teste TP8, o ganho genético capturado pela clonagem dos 97 indivíduos selecionados a uma intensidade de seleção de 10% ( $N_e= 45$ ) é de 39%, ou 0,060 m<sup>3</sup> somados a média geral do teste.

### 3.3. Idade de Seleção

A correlação genética para o caráter volume individual (VOL), em diferentes idades, foi significativa e de alta magnitude para três testes, TP3, TP7 e TP8. No teste TP3, de *C. citriodora* (CCT), observou-se um coeficiente de correlação genética de 0,96; seguidos de 0,98 e 0,93 nos testes TP7 e TP8 de *C. torelliana* (CTO), respectivamente. Os erros padrões das três análises foram baixos, na magnitude de 0,004 para os testes TP3 e TP7 e 0,019 para a estimativa do coeficiente do teste TP8 (Tabela 9).

Tabela 9 – Correlação genética e correlação fenotípica entre idades de seleção, do volume individual (VOL) de um teste de *C. citriodora* (CCT) aos 2 e 6 anos de idade, e dois testes de *C. torelliana* (CTO) aos 4 e 7 anos de idade, instalados na Fazenda Monte Alegre, em Telêmaco Borba – PR.

Idades (anos)	CCT	CTO	
	TP3	TP7	TP8
	<b>2 e 6</b>	<b>4 e 7</b>	<b>4 e 7</b>
$r_{g(x,y)} (e)$	0,96 (0,004)	0,98 (0,004)	0,93 (0,019)
$r_F$	0,90**	0,91**	0,54**

Onde:  $r_{g(x,y)}$  = coeficiente de correlação genética;  $e$  = erro padrão;  $r_F$  coeficiente de correlação fenotípica; \*\* = significativo a 1% de probabilidade.

A correlação fenotípica também apresentou valores estatisticamente significativos e altos para o teste TP3 de *C. citriodora* (CCT), com um coeficiente de correlação fenotípica ( $r_F$ ) de 0,90. Para os testes de *C. torelliana* (CTO), a correlação fenotípica foi alta e estatisticamente significativa para o teste TP7, com  $r_F$  de 0,91, e de média magnitude para o teste TP8, com um coeficiente estatisticamente significativo de 0,54 (Tabela 9).

No teste TP3, de *C. citriodora* (CCT), a assertividade da seleção precoce aos 2 anos de idade foi de 64,4%, uma vez que dos 87 indivíduos selecionados na intensidade de seleção de 10% ( $i=10\%$ ), 56 indivíduos estão nas duas seleções (Figura 5A).

No teste TP7, de *C. torelliana* (CTO), 97 indivíduos foram selecionados com  $i=10\%$ , dos quais 67 indivíduos estão nas duas idades de seleções, o que nos mostra uma aderência de 69,1% na seleção aos 4 anos (Figura 5B).

No teste TP8, de *C. torelliana* (CTO), dos 146 indivíduos selecionados, 103 estão nas duas seleções, aos 4 e 7 anos, resultando em 70,5% de assertividade da seleção aos 4 anos (Figura 5C).

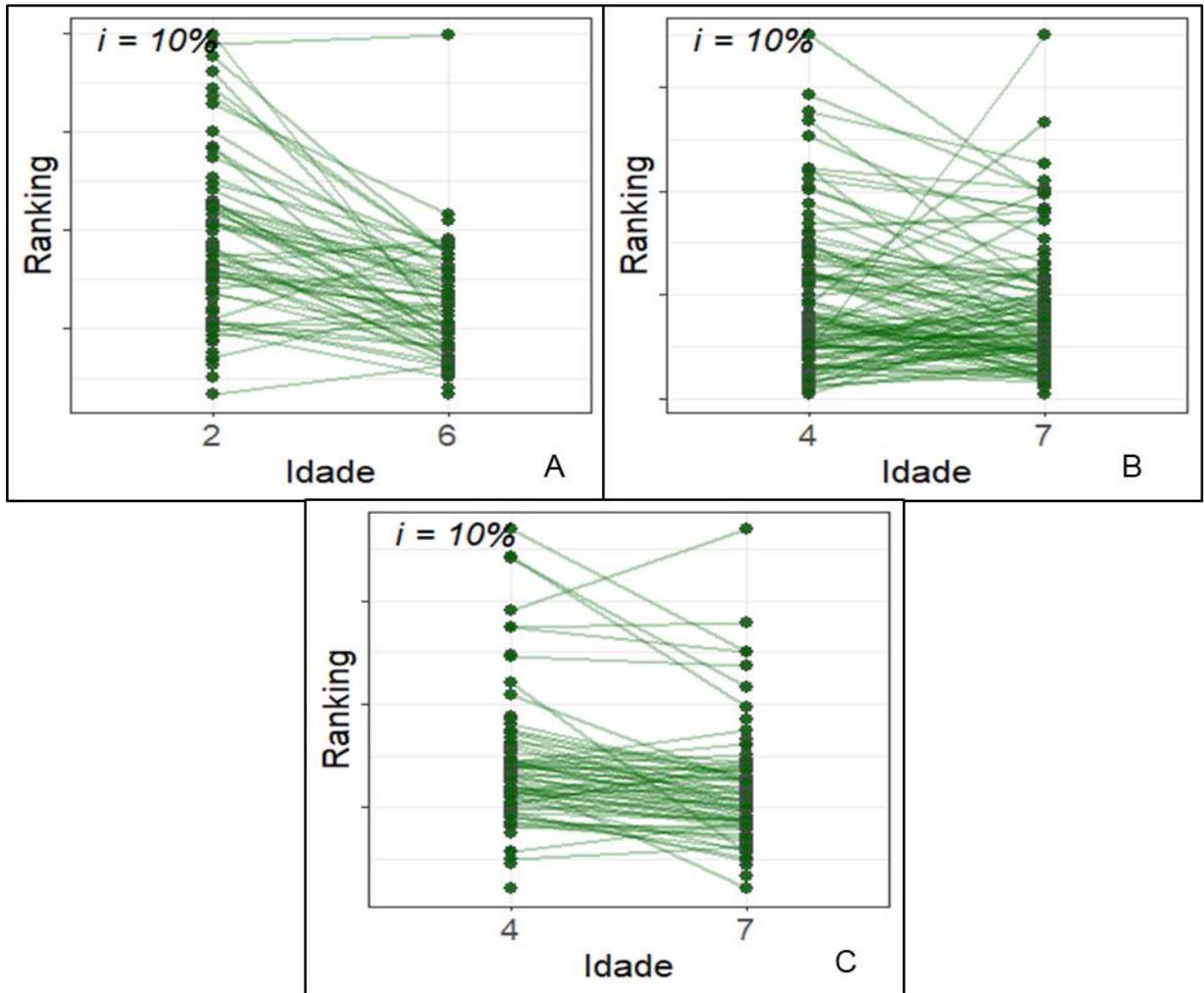


Figura 3. Gráfico de ranking de clones selecionados dos testes: (A) TP3 de *C. citriodora* (CCT) aos 2 e 6 anos de idade; (B) TP7 de *C. torelliana* (CTO) aos 4 e 7 anos de idade; (C) TP8 de *C. torelliana* (CTO) aos 4 e 7 anos de idade, na intensidade de seleção de 10% ( $i=10\%$ ), instalado na Fazenda Monte Alegre em Telêmaco Borba – PR.

#### 4. DISCUSSÃO

O potencial de crescimento de algumas progênies de três espécies puras de *Corymbia* foram exploradas neste trabalho. Os resultados de crescimento mostram que sete dos testes avaliados apresentaram produtividade em IMA acima da média de produtividade de *Eucalyptus* no Brasil, que em 2019 foi de 35,3 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> (IBÁ, 2020), mostrando o potencial de adaptação das espécies e progênies no ambiente de implantação do estudo, porém a seleção de progênies e indivíduos destas populações deve ser baseada nos resultados dos parâmetros genéticos encontrados, para que os ganhos genéticos possam evoluir nas próximas gerações.

Para a espécie *C. torelliana*, que geralmente é utilizada como genitora feminina em programas de hibridação para garantir um melhor enraizamento dos híbridos (ASSIS, 2000), ela apresenta um elevado potencial de crescimento em VOL (m<sup>3</sup>) e variabilidade genética com potencial para estratégias de seleção recorrente recíproca e intrapopulacional, aproveitando os melhores indivíduos como matrizes para pomares de cruzamentos controlados intra e interespecíficos (LEE et al., 2005; LEE, 2007; REIS et al., 2014).

Todos os testes foram estatisticamente significativos para o teste de LRT, para o efeito de progênie. O LRT revela a existência de variância entre as progênies, uma condição altamente desejada para a seleção genética dos genótipos avaliados.

A utilização das testemunhas como efeito fixo na análise, garantiu não somente a predição mais adequada dos parâmetros genéticos, como também a seleção individual mais adequada, isto porque as testemunhas utilizadas nos testes eram clones comerciais de *Eucalyptus spp* (RESENDE, 2007b). A utilização de clones de *Eucalyptus spp*. como testemunha em testes genéticos de *Corymbia spp*. pode ser uma estratégia do melhorista para análise da adaptação das progênies ou procedências na região de estudo, porém a comparação entre crescimento e produtividade desses materiais seria injusta, uma vez que o grau de melhoramento entre os dois gêneros é discrepante (MORAIS, et al., 2011; REIS et al., 2013).

#### 4.1. Parâmetros Genéticos

A obtenção de ganhos genéticos por meio dos métodos de melhoramento está diretamente relacionada com a verificação da presença de variabilidade entre os materiais (NAMKOONG et al., 1988), dessa forma, a avaliação da eficiência das estratégias do melhorista está orientada na obtenção das estimativas dos parâmetros genéticos, sendo os principais deles o coeficiente de herdabilidade e variação genética, pois estes servirão de base para a predição dos ganhos genéticos da população de estudo (VENCOVSKY, 1969).

Uma estratégia de seleção que pode aumentar a eficiência de ganhos é a seleção de indivíduos a partir da média de progênes (SAMPAIO et al., 2002). Essa pode ser uma estratégia adequada para os genótipos em estudo, por meio da seleção combinada de famílias e clones, ou seleção entre e dentro de progênes.

As herdabilidades médias de progênes ( $\hat{h}_m^2$ ) variaram de 0,63 a 0,95 para os testes de CCT, de 0,48 a 0,75 para os testes de CCV e de 0,51 a 0,94 para os testes de CTO. Estes valores estão de acordo com os obtidos por Araujo et al. (2020), que obteve  $\hat{h}_m^2$  de 0,20 e 0,49 para *C. torelliana*, 0,81 e 0,85 para *C. variegata* e de 0,74 e 0,73 para *C. citriodora* aos 2 e 3 anos de idade, respectivamente. Este parâmetro é essencial para o direcionamento do melhorista na seleção entre progênes, uma das estratégias adotadas para testes dessas espécies.

Houve variação dos valores de herdabilidade no sentido restrito ( $\hat{h}_a^2$ ) dentro de um mesmo grupo de progênes em diferentes locais, como por exemplo no grupo 1 (G1),  $\hat{h}_a^2 = 0,24$  para o TP1 e  $\hat{h}_a^2 = 0,62$  para o TP2 aos 8 anos de idade. Esta variação pode estar associada à interação dos genótipos nos ambientes estudados, ou ao coeficiente de variação genético ( $C\hat{v}_{gi}(\%)$ ), que neste caso foi de 31,6% e 63,9% respectivamente. A herdabilidade, que é um parâmetro que expressa a influência genética das variações encontradas na população, e não é um valor fixo, pois, sendo uma razão entre variâncias, ela tem sua oscilação em função da espécie, idade, condições ambientais e caráter estudado (ZOBEL; TALBERT, 1984), explicando os valores encontrados.

Valores de herdabilidades no sentido restrito ( $\hat{h}_a^2$ ) são classificados como baixos, se menor ou igual a 2,79%, moderados, se entre 2,79% e 36,47%, altos se entre 36,47% a 53,32% e muito altos, quando apresentam valores maiores que

53,32% (ZIEGLER; TAMBARUSSI, 2022). Para CCT as herdabilidades no sentido restrito para volume individual de madeira encontradas (de 0,24 a 0,62) variaram de moderadas a altas, exceto para o teste TP2, que apresentou uma herdabilidade de 0,62, e, portanto, muito alta. Este alto valor de herdabilidade aponta para um alto ganho genético deste teste. Valores similares foram encontrados para o caráter DAP por Araujo et al. (2020), que obtiveram para testes de *C. variegata* valores de 0,58 e 0,69 e para *C. citriodora* 0,46 e 0,41 aos 2 e 3 anos de idade respectivamente.

Os testes de CCV apresentam  $\hat{h}_a^2$  moderadas, com valores entre 0,07 e 0,21. Valores similares foram observados por Araujo et al. (2020), que obtiveram  $\hat{h}_a^2$  de 0,07 e 0,21 para o caráter DAP em um teste de *C. torelliana* aos 2 e 3 anos de idade respectivamente. Os testes de CTO apresentam  $\hat{h}_a^2$  moderadas para os testes TP8 e TP9, alta para o teste TP10 aos 6 anos, e muito altas para as duas idades de medições do teste TP7 (ZIEGLER; TAMBARUSSI, 2022).

Os valores moderados de herdabilidade podem estar relacionados aos valores dos coeficientes de variação experimental, como por exemplo, nos testes TP5 e TP6, onde  $C\hat{v}_e(\%)$  (TP5 – 20,5% aos 2 anos e 28,3% aos 8 anos; TP6 – 32,6% aos 8 anos) maiores que os coeficientes de correlação genético  $c\hat{v}_{gi}(\%)$  (TP5 – 19,4 aos 2 anos e 28,3 aos 8 anos; TP6 – 19,3 aos 8 anos).

As amplitudes de valores de herdabilidades estimados para o caráter volume individual, apresentam a mesma tendência dos valores encontrados (de 0,35 a 0,74) por Tambarussi et al. (2018) para os caracteres DAP e ALT aos 18 e 36 meses para as espécies de CCT e CCV, que ressaltam que essa variação pode ser uma influência do efeito que o ambiente exerce sobre os fenótipos.

Além da herdabilidade, a estimativa do coeficiente de variação genético ( $CV_g\%$ ) é outro parâmetro comumente utilizado para avaliação e indicação de seleção de testes genéticos, pois expressa a variabilidade entre progênies do caráter de interesse. Ou, em caso de seleção dentro de progênies, o parâmetro utilizado deve ser o coeficiente de variação genética individual, pois esta será a variabilidade que será transmitida para a próxima geração, ou capturada pela clonagem (RESENDE, 2002). Segundo Ziegler e Tambarussi (2022) os coeficientes de variação genética individual para volume individual que estiverem entre 8,52 e 35,12% são considerados moderados, de 35,12% a 48,43% altos, e acima deste valor muito altos.

Os valores de  $C\hat{v}_{gi}$  obtidos nos testes de CCT são moderados, exceto para o teste TP2, que apresentou um  $C\hat{v}_{gi}$  de 63,94%, e é, portanto, considerado muito alto, indicando uma grande variabilidade genética nesta população, e conseqüentemente uma situação muito favorável para a seleção de progênies e indivíduos superiores. Nos testes de CCV, o  $C\hat{v}_{gi}$  é moderado, e nos testes de CTO, moderados, e altos nos testes TP7, E TP10 aos 6 anos de idade.

Estes resultados de  $C\hat{v}_{gi}$  moderados também foram encontrados por Paludeto et al. (2020) para as variáveis DAC e alturas (de 14,06% a 23,26%) em diferentes idades para *E. viminalis*. Já Moraes et al. (2015) encontraram  $C\hat{v}_g$  para a variável VOL aos 12, 18 e 36 meses em *E. dunnii* valores baixos e moderados ( de 7,91 a 17,34), dependendo do local de avaliação.

Valente (2017) encontrou valores de  $C\hat{v}_{gi}$  de 27,5% e 25,6% para sobrevivência e Incremento médio anual, respectivamente. Esta mesma autora ressaltou que esses valores indicam a existência de variabilidade, e portanto, possibilidade de seleção entre os materiais genéticos. Segundo Paula et al. (2002), as variabilidades existentes nos materiais genéticos utilizados no setor florestal possibilitam a seleção direta e indireta e conseqüentemente bons resultados no melhoramento florestal.

Valores de coeficiente de variação genética muito altos, como os encontrados para o teste TP2 não são comuns na literatura, porém, indicam a existência de alta variabilidade entre as progênies estudadas, e, é possível de acontecer em populações que ainda estão nas fases iniciais de melhoramento, como é o caso deste teste.

O coeficiente de correlação relativo ( $\hat{b}$ ) apresentou valores altos em todos os testes analisados, para VOL. Obteve-se valores de  $\hat{b}$  maiores que 1,0 para todos os testes dos grupos G1 e G5 de *C. citriodora* e *C. torelliana* respectivamente, e para outros testes em idades pontuais, como o teste TP4 aos 2 anos e para o teste TP5 aos 8 anos, indicando maior variabilidade que estes experimentos possuem ambientes adequados para a prática de seleção (VENCOVSKY, 1987).

É desejável que a relação entre o coeficiente de variação genética e o coeficiente de variação experimental ( $\hat{b} = CVg/CV$ ) seja superior a 1,0, já que dessa forma a variação genética será superior a variação ambiental (VENCOVSKY, 1987; MASSARO et al., 2010). Coeficientes  $\hat{b}$  maiores que 1,0 indicam maiores chances de

obtenção de ganhos genéticos e assertividade de seleção (VENCOVSKY, 1987; PALUDETO et al., 2020).

A acurácia é o parâmetro que está diretamente relacionado à precisão de seleção (RESENDE; BARBOSA, 2005). Essa medida demonstra a relação entre os valores genéticos verdadeiros e predito, e é o único componente genético que pode ser manipulado para maximizar os ganhos obtidos (RESENDE, 2002). Altos valores de acurácia indicam qualidade experimental e rigor técnico nos experimentos (VALENTE, 2017). Olhando para a chamada “Equação do Melhorista”,  $G_S = \frac{k \cdot \hat{r}_{ac} \cdot \hat{\sigma}_a^2}{L}$ , onde  $k$  = a intensidade de seleção,  $\hat{r}_{ac}$  = acurácia,  $\hat{\sigma}_a^2$  = variabilidade genética e  $L$  = tempo, observamos que a acurácia está diretamente relacionada aos ganhos genéticos, uma vez que esse valor é multiplicado pela variância genética aditiva, portanto, e quanto maior for a acurácia, maior será a possibilidade de captura da variabilidade existente na população em estudo.

Os valores de acurácia encontrados para experimentos de avaliação de cultivares menores que 0,40 são considerados baixos, valores entre 0,50 e 0,65 moderados, de 0,7 a 0,85 altos, e acima disso, muito altos. (RESENDE, 2007).

De maneira geral, os testes de *C. variegata* apresentaram baixos valores de acurácia genética na seleção individual ( $\hat{r}_{aci}$ ) e herdabilidades no sentido restrito moderadas, indicando uma baixa precisão de predição dos valores genéticos na seleção individual dessas progênies para o caráter avaliado. Porém, os valores encontrados para acurácia genética e herdabilidade média no teste TP5, permite a seleção entre as famílias presentes no teste. Segundo Rezende et al. (2021), a seleção com base no caráter não é indicada quando encontrado baixos valores de herdabilidade, pois caracteriza um baixo controle genético.

Para o caráter volume, Moraes et al. (2014) observaram acurácias variando entre 0,59 a 0,75 para testes de progênies de *E. grandis*, valores próximos aos observados neste trabalho. Baroni (2018) avaliando *C. variegata* encontrou acurácias variando entre 0,20 a 0,25 para altura e 0,42 para DAP, demonstrando valores similares aos encontrados para acurácia genética na seleção individual nos testes TP6 e TP8.

Para o teste de TP1 de *C. citriodora*, aos 8 anos de idade, a seleção clonal com base no volume individual (VOL) não é recomendada devido à baixa estimativa de acurácia genética na seleção individual obtida para este caráter. Neste caso a

seleção pode ser feita por famílias, pois o teste apresenta uma acurácia genética e herdabilidade médias adequadas, ou com base em outro caráter de interesse caso este apresente valores de acurácia acima dos encontrados para VOL e satisfatórios. Os testes TP2 aos 8 anos de idade, e o teste TP3 aos 6 anos também de *C. citriodora*, apresentaram acurácias satisfatórias para conduzir a seleção com base no caráter VOL.

Para *C. torelliana* a seleção tanto individual quanto de famílias com base no caráter volume individual (VOL) é recomendada para os testes TP7 aos 7 anos e TP10 aos 6 anos, fundamentado nos valores de herdabilidade e acurácia. Já os testes TP8 aos 7 anos e TP9 aos 6 anos, apresentam baixos valores de acurácia, não sendo recomendado a seleção com base nesse caráter.

#### **4.2. Tamanho Efetivo Populacional ( $N_e$ ) e Ganho de Seleção**

A seleção de indivíduos e progênies superiores para o avanço de gerações e clonagem é a premissa básica quando se avalia um teste de progênies, porém, tão importante quanto a seleção é a manutenção de uma proporção da variabilidade genética da sua população atual, que está diretamente ligada a intensidade de seleção e ao tamanho efetivo populacional (FONSECA et al., 2010). A manutenção de genótipos em plantios de campo é um método de conservação *ex situ* da diversidade genética (PAIVA; VALOIS, 2001). Esta estratégia, auxilia tanto na conservação de espécies, quanto na disponibilização de variabilidade genética para um programa de melhoramento (FALEIRO et al., 2011).

Tanto a herdabilidade quanto a variação genética presente na população interferem no ganho esperado, ou resposta à seleção, podendo ser influenciado pelo número de indivíduos selecionados, por decisão do melhorista (PIRES et al., 2011). O tamanho efetivo populacional ( $N_e$ ) adequado garante a obtenção de ganhos genéticos de forma mais segura, mitigando o risco de perda de alelos favoráveis de uma população (RESENDE et al., 1995). Um tamanho efetivo populacional adequado para a conservação da variabilidade genética, encontra-se entre 30 a 60, e deve ser considerado em cada etapa da seleção (VENCOVSKY, 1988).

Os testes foram submetidos a intensidades de seleção de 1, 5 e 10%, com ganhos genéticos variando entre 35 a 129% dependendo da espécie, teste e idade,

simulando uma seleção de clones. Porém, a seleção de clones não é uma estratégia popular dentro dos programas de melhoramento de espécies puras do gênero *Corymbia*, isso, porque, as espécies *C. citriodora* e *C. variegata* são consideradas recalcitrantes ao enraizamento adventício, com índices de enraizamento abaixo de 5% (REIS et al., 2013). O *C. torelliana*, por outro lado, é a única espécie até então conhecida dentro do gênero, que possui a maior capacidade de enraizamento adventício (ASSIS, 2000), porém seu baixo crescimento em altura, e sua arquitetura de copa esgalhada, tem desestimulado seu plantio como espécie pura (MOURA, 2001), tornando a hibridação entre espécies, uma estratégia altamente sugerida para o programa do gênero *Corymbia*, principalmente devido a existência do efeito materno no enraizamento, colocando a espécie *C. torelliana* como genitor feminino (ASSIS, 2000).

Com base no exposto, a seleção entre e dentro de progênie, e seleção de genitores, são estratégias adequadas para a população de estudo (NAMKOONG, et al., 1988). Segundo Fonseca et al. (2010), o número de genitores selecionados para recombinação visando a obtenção da maior acurácia depende da herdabilidade obtida em cada teste, varia de acordo com a estratégia de seleção. Em uma seleção de progênie de meios-irmãos com herdabilidades acima de 0,15 cerca de 100 indivíduos por progênie conduzem a acurácias superiores a 0,90.

Diversas estratégias de melhoramento podem ser empregadas nas populações estudadas. As estratégias de seleção recorrente recíproca são adequadas para o melhoramento das três espécies puras. Neste caso, a seleção de genitores para recombinação deve ser feita nos resultados da população híbrida com base em características de herdabilidade aditiva mais baixa (FONSECA et al., 2010), como por exemplo volume individual, porém, como a seleção dos genitores para cruzamentos é baseada na população híbrida, esta estratégia exige mais um ciclo de melhoramento, e, portanto, um tempo maior, uma vez que a população deste estudo é a população base F1 (RESENDE; BARBOSA, 2005).

Uma estratégia de curto prazo, e, portanto, mais imediata para as populações em estudo seria a seleção recorrente intrapopulacional. A seleção de genitores potenciais para cruzamentos selecionados nos testes de famílias é baseada em seus valores genéticos aditivos ou valores alélicos, os BLUP's (RESENDE; BARBOSA, 2005). A adoção dessa estratégia, leva a seleção de genitores para

cruzamentos em pomares de polinização controlada, e hibridação entre as espécies em estudo, visando a exploração da heterose, e efeito materno do enraizamento, para a seleção de clones de *Corymbia spp.*

### 4.3. Idade de Seleção

Os altos coeficientes de correlação genéticas obtidos nas análises para os três testes para volume individual nas duas idades analisadas, mostram que para as espécies de *Corymbia*, é possível a obtenção de alta assertividade na seleção em idade precoce em torno de 2 anos para *C. citriodora* e 4 anos para *C. torelliana*, desde que se tenha variabilidade genética e um bom controle experimental, que pode ser estimado e avaliado por meio da acurácia. Altas correlações, não exigem a avaliação dos parâmetros genéticos e estimativa dos ganhos de seleção na população, apenas encurtam o tempo em que esses ganhos podem ser capturados.

Para a *C. citriodora*, a idade de dois anos, além do alto coeficiente de correlação genético e fenotípico, a análise do *ranking* dos clones selecionados mostra que é possível a seleção de indivíduos superiores dessa espécie na idade de 2 anos. Esta mesma possibilidade de seleção precoce poderá ocorrer para a espécie *C. variegata*, uma vez que os comportamentos fenotípicos das espécies foram muito semelhantes. Segundo Fonseca et al. (2010), para a maioria das condições climáticas brasileiras, a idade de 2 anos pode ser considerada segura para a seleção precoce de árvores.

Devido a arquitetura dos galhos, que geram uma dificuldade operacional de caminhamento dentro dos testes de *C. torelliana*, sua medição precoce foi adiada dos 2 para os 4 anos. Esta espécie é considerada uma “floresta fechada”, com baixa incidência de luz e sub-bosque pouco desenvolvido (SCHUMACHER, 1992). Para a *C. torelliana*, a seleção precoce aos 4 anos de idade, se mostrou factível devido aos altos coeficientes de correlação genética encontrados, com aderência de *ranking* em torno de 70% quando comparado aos 7 anos, demonstrando a eficiência dessa técnica. A seleção precoce dos 2 aos 4 anos de idade, já é uma técnica adotada de forma comum nos programas de melhoramento genéticos de *Eucalyptus* em todo o Brasil, e diversos estudos demonstram o sucesso dessa estratégia (PINTO et al. 2014; MASSARO et al. 2010; GONÇALVES et al. 1998; PEREIRA et al. 1997).

## 5. CONCLUSÃO

As progênies de *C. citriodora*, *C. variegata* e *C. torelliana* presentes nos testes analisados, mostram adaptação nas condições edafoclimáticas da região de Telêmaco Borba - PR, apresentando sobrevivências variando entre 61,2% e 96,0%, e crescimento volumétrico médio de 0,245 m<sup>3</sup> entre 6 e 8 anos, valores próximos aos encontrados em testes de progênies de *Eucalyptus* com baixo grau de melhoramento.

As progênies estudadas apresentam variabilidade genética significativa entre elas nas três espécies, apresentando herdabilidades no sentido restrito variando entre 0,24 e 0,62 entre os testes de CCT, de 0,07 a 0,21 entre os testes de CCV e de 0,14 a 0,69 entre os testes de CTO, classificadas como de magnitude entre moderadas a altas, e em alguns casos muito altas, demonstrando um grande potencial de seleção entre e dentro de progênies nesses testes de campo. Sugerindo assim, como estratégia de melhoramento a seleção recíproca intrapopulacional e interpopulacional, e seleção de genitores para possibilitar futuramente a exploração do potencial de heterose por meio da geração de híbridos.

A estimativa dos ganhos genéticos por meio de diferentes intensidades de seleção, aponta que para a manutenção de um tamanho efetivo mínimo de 30, as intensidades de 5% e 10% seriam adequadas para a maioria dos testes estudados, possibilitando a obtenção de genitores com altos percentuais de ganhos e boa produtividade, mantendo a variabilidade para estratégias futuras. A intensidade de 1%, reduziu o  $N_e$  dos testes a níveis entre 2 e 18, sendo não recomendado para programas que tenham como objetivo o avanço de gerações de melhoramento dentro dessas populações.

A correlação genética para o caráter volume nas duas idades avaliadas para *C. citriodora* e *C. torelliana* mostram o potencial para a seleção precoce aos 2 e 4 anos respectivamente com base nesse caráter, de progênies e indivíduos dessas espécies, pois apresentaram correlações genéticas de magnitude alta, com valores de 0,96 para o *C. citriodora* e de 0,98 e 0,93 para o *C. torelliana*.

O melhoramento genético das populações das três espécies estudadas de *Corymbia* na região de Telêmaco Borba, apresenta variabilidade genética significativa, tamanho efetivo adequado para a manutenção da variabilidade, e possibilidades de ganhos absolutos e percentuais na seleção de indivíduos e famílias para gerações

futuras do programa de melhoramento, podendo ser a seleção precoce uma ferramenta eficiente para o uso do melhorista.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: Desafios e perspectivas. **3º Encontro Brasileiro de Silvicultura**. 2014.

ASSIS, T. F. Hybrids and mini-cutting: a powerful combination that has revolutionized the *Eucalyptus* clonal forestry. In: **BMC Proceedings**. BioMed Central, p. 118, 2011.

ASSIS, T. F. Production and use of Eucalyptus hybrids for industrial purposes. In: **QFRI/CRC-SPF SYMPOSIUM**. Noosa - Queensland. Hybrid breeding and genetics of forest trees: Proceedings. Brisbane: Department of Primary Industries, p. 63-75, 2000.

BARONI, G. R. **Crescimento inicial e parâmetros genéticos de populações para melhoramento de *Corymbia spp.* e *Eucalyptus pilularis* Smith**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP. Botucatu, 2018.

BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S.; Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v.67, p. 1–48. 2015.

BELTRAME, R.; BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; SANTOS, G. A. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 47, n. 6, 2012.

CORNELIUS, J. Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v.24, p. 372-379, 1994.

COVARRUBIAS-PAZARAN, G., Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. **PLoS One** v.11, p. 156-744, 2016.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Modelos biométricos aplicadas ao melhoramento genético. 3ª ed. Viçosa, UFV, v.1, 480 p., 2014.

HARDY, O. J.; VEKEMANS, X. SPAGeDI: a versatile computer program to analyze spatial genetic structure at the individual or population levels. **Molecular Ecology Notes**, vol. 2, p. 618-620, 2002.

FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M.; REIS JUNIOR, F. B.; Biotecnologia: estado da arte e aplicações na agropecuária. Planaltina: **Embrapa Cerrados**. 2011.

FONSECA, S. M.; RESENDE, M. D. V. de; ALFENAS, A. C.; GUIMARÃES, L. M. S.; ASSIS, T. F.; GRATTAPAGLIA, D. **Manual prático de melhoramento genético do eucalipto**. Viçosa, MG: UFV, 2010. v. 1. 200 p.

FREITAS, R. G.; VASCONCELOS, E. S.; CRUZ, C. D.; ROSADO, A. M.; ROCHA, R. B.; TAKAMI, L. K. Predição de ganhos genéticos em progênies de polinização aberta de *Eucalyptus urograndis* cultivadas em diferentes ambientes e submetidas a diferentes procedimentos de seleção. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 25–263, 2009.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (EdS). **Lignins**. New York: Wiley-Interscience, p. 241-266, 1971.

GONÇALVES, P. S.; BORTOLETTO, N.; FONSECA, F. S.; BATAGLIA, O. C.; ORTOLANI, A. A. Early selection for growth vigor in rubber tree genotypes in northwestern São Paulo State (Brazil). **Genetics and Molecular Biology**, v. 21, n. 4, p. 620-630, 1998.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOUDET, J. Fstat. (Version 2.9.3.2.): A computer program to calculate F-statistics. **J. Heredity**, n.86, p. 485–486, 1995.

GOUDET, J. Fstat (Version 2.9.4), **A program to estimate and test population genetics parameters. 2003.** Disponível em <http://www.t-de-meeus.fr/Programs/Fstat294.zip> (Atualização de Goudet (1995))

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Teloepa**. v. 6, p. 185-504, 1995.

IBÁ - Instituto Brasileiro de Árvores. **Relatório IBÁ 2021**. Brasília: IBÁ, 2021.

KAGEYAMA, P. Y.; VENCOVSKY, R. Variação genética em progênes de uma população de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. **IPEF**, Piracicaba, v. 24, p. 9-26, 1983.

KALINOWSKI, S. T., TAPER, M. L.; MARSHALL, T. C. Revising how computer program Cervus accommodates genotyping error increase success in paternity assignment. **Molecular Ecology Notes**, v.16, p. 1099–1106, 2007.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (eds.): **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, v.1, p. 1–44. 1936.

LEE, D. J.; HUTH, J. R.; BRAWNER, J.; DICKINSON, G. R. Comparative performance of *Corymbia* hybrids and parental species in subtropical Queensland and implications for breeding and deployment. **Silvae Genetica**, v. 58, p. 205–212. 2009.

LEE, D. J. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand. 2: development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. **Australian Forestry Journal**, v. 70, n. 1, p. 11–16, 2007.

LEE, D. J.; NIKLES, G.; POMROY, P.; BRAWNER, J.; WALLACE, H.; STOKOE, R. *Corymbia* species and hybrids: a solution to Queensland hardwood plantations? In: CORYMBIA RESEARCH MEETING: Underpinning development of a profitable hardwood plantation industry in northern Australia by research into *Corymbia* species and hybrids, **Gympie**. Proceedings. Queensland. p. 5-7, 2005.

LYNCH, M.; WALSH, B. Genetics and analysis of quantitative traits. Massachusetts: **Sinauer Associates**, Inc, 980 p., 1998.

MARSHALL, T. C.; SLATE, J.; KRUIK, L. E. B.; PEMBERTON, J. M. Statistical confidence for likelihood-based paternity inference in natural populations. **Molecular Ecology**, v.7, p. 639-655, 1998.

MASSARO, R. A. M.; BONINE, C. A. V.; SCARPINATI, E. A.; PAULA, R. C. Viabilidade de aplicação da seleção precoce em testes clonais de *Eucalyptus spp.* **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4. p. 597- 609, 2010.

MOURA, V. P. G. Potencial e uso de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* de acordo com locais e usos. Brasília, DF: **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia**, 32 p., 2001.

MORAES C. B.; CARVALHO, E. V.; ZIMBACK, L.; LUZ, O. S. L.; PIERONI, G. B.; MORI, E. S.; LEAL, T. C. A. B. Variabilidade genética em progênies de meios-irmãos de eucaliptos para tolerância ao frio. **Revista Árvore**. v. 39, n. 6, p. 1047-1054, 2015.

MORAES, C. B.; BRIZOLLA, T. F.; TEIXEIRA, L. G.; ZIMBACK, L.; TAMBARUSSI, E. V.; CHAVES, R.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativas dos parâmetros genéticos para seleção de árvores de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. v. 42, n. 104, p. 623-629, 2014.

MORAIS, E., ZANATTO, A. C. S., MORAES, M. L. T., FREITAS, M. L. M.; SEBBENN, A. M. Comportamento e variação de procedências de *Corymbia citriodora* em diferentes tipos de solos. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 277- 286, 2011.

NAMKOONG, G.; KANG, H. C.; BROUARD, J. S. **Tree breeding: principles and strategies**. New York, NY, USA: Springer Verlag, 1988.

PAIVA, J. R., & VALOIS, A. C. C. Espécies selvagens e sua utilização no melhoramento. In NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (Eds.). **Recursos genéticos e melhoramento: plantas**, p. 79-99. Rondonópolis: Fundação MT., 2001.

PALUDETO, J. G. Z.; BUSH, D.; ESTOPA, R. A.; TAMBARUSSI, E. V. Genetic control of diameter and bark percentage in spotted gum (*Corymbia spp.*): can we breed eucalypts with more wood and less bark? **Southern Forests: a Journal of Forest Science**. v. 82, p. 22-35, 2020.

PALUDETO, J. G. Z., PEREK, M., MUNHOZ, L. V., SANTOS, J. R. M., PESCK, V. A., & TAMBARUSSI, E. V. Variabilidade genética em população base de *Eucalyptus viminalis* em idade juvenil. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, e.3081, 2020.

PEREIRA, A. B.; MARQUES JR, O. G.; RAMALHO, M. A. P.; ALTHOFF, P. Eficiência da seleção precoce em famílias de meios-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. avaliadas na região noroeste do estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 67-81, 1997.

PINTO, D. S.; RESENDE, R. T.; MESQUITA, A. G. G.; ROSADO, A. M.; CRUZ, C. D. Seleção precoce para características de crescimento em testes clonais de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v.42, p.251-257, 2014.

R CORE TEAM., **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.

REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia torelliana*: Estado da Arte de Pesquisas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2014.

REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia citriodora*: Estado da Arte de Pesquisas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 32 p., 2013.

RESENDE, M. D. V. Delineamento de experimentos de seleção para a maximização da acurácia seletiva e progresso genético. **Revista Árvore**, v. 19, n. 4, p. 479-500, 1995.

RESENDE, M. D. V. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: **Embrapa Florestas**. 975 p., 2002a.

RESENDE, M. D. V. DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.182-194, 2007.

RESENDE, M. D. V. de. Software SELEGEN-REML/BLUP: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: **Embrapa Florestas**, 359 p. 2007b.

RESENDE, M. D. V. Genética quantitativa e de populações. Viçosa- MG: **Suprema**. 463 p., 2015.

RITLAND, K; JAIN, S. A model for the estimation of outcrossing rate and gene frequencies using independent loci. **Heredity**, v. 47, p. 35-52, 1981.

RITLAND, K. Correlated matings in the partial selfer *Mimulus guttatus*. **Evolution**, v. 43, p. 848-859, 1989.

RITLAND K. Extensions of models for the estimation of mating systems using n independent loci. **Heredity**, v. 88, p.221-228, 2002.

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

SCHUMACHER, M. V. **Aspectos da ciclagem de nutrientes e do microclima em talhões de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. grandis* e *E. torelliana***. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Piracicaba. 87 p., 1992.

SEBBENN, A. M.; SIQUEIRA, A. C. M.; KAGEYAMA, P. Y.; DIO JUNIOR, O. J. Variação genética entre e dentro de populações de amendoim – *Pterogyne nitens*. **Scientia Forestalis**, n. 56, p. 29-40, 1999.

SEBBENN, A. M.; SEOANE, C. E. S. Estimativa de tamanho efetivo de endogamia usando marcadores genéticos. **Revista Árvore**, v.29, n.1, p.1-7, 2005.

SEGURA T.E.S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando a produção de celulose Kraft branqueada**. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz'. Piracicaba. 2015.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. **Tappi T280 pm-99 standard - Acetone extractives of wood and pulp**. USA: TAPPI Press, 2000.

VALENTE, B. M. R. T. **Avaliação de clones híbridos de *Corymbia* para crescimento, qualidade da madeira e carvão vegetal na região do rio doce**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

VENCOVSKY, R. Genética quantitativa. In: KERR, W. E. (Org). Melhoramento e genética. São Paulo: **Melhoramento**, p.17-38, 1969.

VENCOVSKY, R. Herança quantitativa. In: PATERNIANI, E.; VIEGAS, G. P. Melhoramento e produção do milho. 2 ed. Campinas: **Fundação Cargill**, 1987.

VENCOVSKY, R. BARRIGA, P. Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: **Sociedade Brasileira de Genética**, 406 p., 1992.

ZIEGLER, A. C. F.; TAMBARUSSI, E. V. Classifying coefficients of genetic variation and heritability for Eucalyptus spp. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.22, p. e40372222, 2022.

ZOBEL, B.; TALBERT, J. **Applied forest tree improvement**. New York: John Wiley, 505p. 1984.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGHT, P.J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to Kraft pulp yields. **Appita Journal**, v.49, n.6, p.427-432, 1996.

## **CAPÍTULO II - MODELOS DE ESPECTROSCOPIA NIR PARA FENOTIPAGEM DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus dunnii*.**

### **RESUMO**

A seleção de indivíduos dentro de um programa de melhoramento deve ser feita sempre visando as características de interesse do processo produtivo. Para a produção de polpa celulósica as características físicas e químicas da madeira e devem ser consideradas na seleção de genótipos para plantios comerciais, pois afetam o processo industrial de forma direta, tanto economicamente como na qualidade do produto final. Neste estudo foi avaliado a madeira de árvores previamente selecionadas em testes de progênes híbridas de *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* (CTOxCCT) com idades entre 4 e 5,5 anos e, progênes de *Eucalyptus dunnii* (EDU) com idades entre 5,5 e 7,0 anos de idade. Foram construídos modelos preditivos por meio da metodologia de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) para as propriedades de densidade básica de cavacos, teor de extrativos, teor de lignina total, relação siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica. As amostras de serragem de 208 indivíduos de CTOxCCT e 669 indivíduos de EDU selecionados geneticamente foram coletadas em Telêmaco Borba no estado do Paraná e Otacílio Costa no estado de Santa Catarina, respectivamente, e foram classificadas e preparadas para as leituras dos espectros NIR. Após as leituras, 61 amostras (composição de 25 amostras de CTOxCCT e 36 amostras de EDU) foram selecionadas pela análise de componentes principais (PCA) para a composição dos modelos. As árvores dos indivíduos selecionados foram abatidas e seccionadas em toretes, descascadas, processadas em cavacos selecionados, e em seguida enviados para determinação das propriedades físicas, químicas e polpação *kraft*. Com base nos dados de referência e espectros no NIR, modelos de predição para cada uma das propriedades foram desenvolvidos. Sendo que na primeira abordagem, modelos foram ajustados com apenas amostras de CTOxCCT e na segunda abordagem modelos foram ajustados com as 61 amostras (25 amostras de CTOxCCT e 36 amostras de EDU). Os modelos preditivos de espectroscopia NIR mostraram capacidade satisfatória para estimar as propriedades físicas e químicas da madeira. Os modelos de predição de densidade básica de cavacos, teores de

extrativos, teores de lignina total, relação S/G e rendimento depurado de polpa celulósica apresentaram  $R^2_{cv}$  de 0,60; 0,37; 0,56; 0,63 e 0,52; com  $RMSE_{cv}$  de 23,13  $Kg.cm^{-3}$ , 0,81%; 0,67%, 0,24 e 2,94% para os modelos de CTOxCCT e  $R^2_{cv}$  de 0,73; 0,65; 0,53; 0,66 e 0,77, com  $RMSE_{cv}$  de 25,49  $Kg.cm^{-3}$ , 0,70%; 0,79% 0,33 e 1,98% para o modelo da abordagem 2 respectivamente. Os valores de RPD<sub>cv</sub> (Razão de Desempenho do Desvio padrão) para essas características variaram entre 1,2 e 1,6 no modelo da abordagem 1 e entre 1,5 a 2,1 para os modelos de CTOxCCT e EDU em conjunto. Todas as propriedades estudadas apresentam potencial para ranqueamento na seleção genética em pelo menos uma das abordagens, assim, a espectroscopia NIR pode potencialmente ser aplicada em programas de melhoramento, permitindo a seleção não destrutiva de árvores com propriedades físicas e químicas adequadas para a produção de celulose.

**Palavras-chave: polpação Kraft, qualidade da madeira, propriedades físico-químicas, predições NIRS.**

## CHAPTER II - NIR SPECTROSCOPY MODELS FOR PHENOTYPING WOOD PROPERTIES OF *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* AND *Eucalyptus dunnii*.

### ABSTRACT

The selection of individuals in a breeding program must always be done according to the characteristics of interest in the production process. For the production of cellulosic pulp, the physical and chemical wood characteristics must be considered in the genotypes selection for commercial plantations, as they affect the industrial process directly, both economically and in the quality of the final product. In this study, wood from trees previously selected in hybrid progenie tests of *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* (CTOxCCT) between 4 and 5.5 years and progenies of *Eucalyptus dunnii* (EDU) between 5.5 and 7 years was evaluated. Predictive models were built using near-infrared (NIR) spectroscopy for the properties of wood basic density of chip, extractive content, total lignin content, syringyl/guaiacyl ratio (S/G) and pulp yield. Sawdust samples from 208 CTOxCCT individuals and 669 EDU genetically selected individuals were collected in Telêmaco Borba, Paraná state and Otacílio Costa, Santa Catarina state, respectively, and were classified and prepared for NIR spectra readings. After the readings, 61 samples (composition of 25 samples of CTOxCCT and 36 samples of EDU) were selected by principal component analysis (PCA) for the composition of the models. The selected trees were cutted down and sectioned into short logs, peeled, chopped and their chips selected, and then sent for determination of chemical properties through kraft pulping. Based on the reference data and spectra in NIR, prediction models for each of the properties were developed. In the first approach, models were fitted with only CTOxCCT samples and in the second approach, models were fitted with 61 samples (25 CTOxCCT samples and 36 EDU samples). The NIR spectroscopy predictive models showed a satisfactory ability to estimate the chemical properties of wood. The prediction models of basic chip density, extractives contents, total lignin contents, S/G ratio and pulp yield showed  $R^2_{cv}$  of 0,60; 0,37; 0,56; 0,63 and 0,52; with  $RMSE_{cv}$  of 23,13  $Kg.cm^{-3}$ , 0,81%; 0,67%; 0,24 and 2,94% for model 1 and  $R^2_{cv}$  of 0,73; 0,65; 0,53; 0,66 and 0,77; with  $RMSE_{cv}$  of 25,49  $Kg.cm^{-3}$ , 0,70%; 0,79%, 0,33 and 1,98% for model 2 respectively. The  $RPD_{cv}$  (Standard Deviation Performance Ratio) values for these characteristics varied

between 1,2 and 1,6 in model of approach 1 and between 1,5 and 2,1 in model of approach 2. All parameters studied have potential for ranking in genetics selection in at least one of the approaches, thus, NIR spectroscopy can potentially be applied in breeding programs, allowing the non-destructive selection of trees with physical and chemical properties suitable for the production of cellulose.

**Keywords: Kraft pulping, wood quality, physicochemical properties, NIRS predictions.**

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil se manteve em 2020 como o maior exportador de celulose do mundo, com uma exportação de 6 bilhões de dólares americanos, 1,2 bilhões acima do segundo colocado, o Canadá. Neste mesmo ano, o país alcançou seu segundo maior volume histórico de produção de celulose, totalizando 21 milhões de toneladas produzidas. O setor de árvores plantadas coloca o Brasil como referência mundial, tanto no setor de papel e celulose, quanto em outros setores de indústrias de base florestal (IBÁ, 2021).

Com a expansão do setor florestal, é essencial que as empresas silvicultoras estejam preparadas para a expansão de suas florestas em áreas adversas. Segundo Assis (2014), fatores como pragas e doenças, distúrbio fisiológico e déficit hídrico têm se tornado desafios importantes a serem considerados na busca pelo aumento, ou até mesmo manutenção da produtividade florestal. Neste aspecto, o estudo de espécies diversas, somando a adaptação a diferentes condições, é um diferencial.

O *Eucalyptus dunnii* Maiden apresenta tolerância ao frio, um diferencial em relação a outras espécies de *Eucalyptus* spp., portanto, é considerada uma espécie adequada a plantios em regiões com ocorrência frequente de geadas de média severidade, como é o caso de algumas áreas no Sul do Brasil (GOLFARI, 1978). Além de suas características de adaptabilidade a baixas temperaturas, esta espécie possui condições de crescimento adequadas, com potencial variando de 30 a 50 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e densidade básica da madeira entre 0,450 a 0,550 g.cm<sup>-3</sup> (PEREYRA, 1994).

Direcionados pela busca de novas espécies e as altas densidades observadas, diversos trabalhos buscaram nas décadas de 70 a 90 caracterizar e avaliar a madeira de *C. citriodora* e *C. torelliana*, para o processo de produção de celulose (MEZZOMO, 1996; BARRICHELO; BRITO, 1976; FOELKEL et al., 1975). Porém, apesar dos bons resultados e potencial tecnológico obtidos para os processos praticados na época, a baixa produtividade, aliada a ausência de programas de melhoramento genético reduziram o interesse das espécies de *Corymbia* spp. para este setor (SEGURA; SILVA JR., 2016).

Nos últimos anos, o interesse pelas espécies de *Corymbia* e seus híbridos interespecíficos tem sido retomado pelos programas de melhoramento genético

visando os mais distintos usos, com qualidade da madeira para vários produtos e com resistência a fatores bióticos e abióticos (VALENTE, 2017).

Métodos não destrutivos de determinação da qualidade madeira são essenciais aos programas de melhoramento, pois, em muitos casos, o valor genético de um indivíduo impossibilita análises destrutivas dessas árvores (ESTOPA et al., 2017).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) se baseia na espectroscopia vibracional que mede a intensidade de absorção e reflexão de luz na faixa de comprimento de onda de 750 a 2.500 nm. Exceto para alguns compostos raros, essa faixa de energia é mais do que o necessário para a promoção do estado vibracional em moléculas, e seu objetivo geral é adquirir informações qualitativas e quantitativas de uma amostra através da sondagem proveniente de ondas eletromagnéticas do infravermelho próximo com seus constituintes (PASQUINI, 2007).

O principal objetivo da construção de um modelo de espectroscopia NIR é a predição das características da madeira de forma rápida e não destrutiva. Portanto, na construção de um modelo de predição deve ser incluído o maior número de fontes de variação possível (MILAGRES, 2013). Dessa forma, a construção de modelos constituídos com amostras de mais de uma espécie, pode ser uma boa alternativa para adição de variabilidade amostral.

Diniz et al. (2019) testaram a construção de um modelo de espectroscopia NIR para predição da relação de lignina siringil/guaiacil (S/G) com amostras apenas de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage e de *Eucalyptus pellita* F. Mueller, e também um modelo conjunto com as duas espécies, concluindo que o modelo conjunto com as duas espécies proporcionou uma melhor predição para a relação S/G para as características da madeira de *E. pellita*.

Ainda mais importante do que o número de amostras é a representatividade amostral dentro de um modelo. Na comparação entre diferentes números amostrais, Sousa et al. (2011) não obtiveram diferença significativa entre os modelos construídos com 3.369 e 200 amostras, pois o algoritmo de seleção utilizado foi eficiente.

Diversos autores identificaram as vantagens de predição via espectroscopia NIR e desenvolveram modelos para predizer características químicas da madeira relacionadas ao processo de produção de papel e celulose (Tabela 1).

Tabela 10 Modelos de espectroscopia NIR para espécies do gênero *Eucalyptus* presentes na literatura para predição de propriedades físicas e químicas da madeira, ligadas ao processo de produção de polpa celulósica.

<b>Autor</b>	<b>Espécie do Modelo</b>	<b>Propriedades</b>
Baillères et al. (2002)	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	Relação S/G e teores de: lignina Klason e extrativos.
Pasquini et al. (2007)	<i>Eucalyptus spp.</i>	DBM e teores de: lignina total e extrativos.
Mora e Schimleck (2008)	<i>Eucalyptus nitens</i>	Rendimento da Celulose (kraft)
Santos et al. (2009)	<i>Eucalyptus spp.</i>	DBM cavacos, número kappa, rendimento depurado, viscosidade, teores de: lignina Klason, extrativos e ácidos hexenurônicos.
Viana et al. (2010)	<i>Eucalyptus spp.</i>	DBM média, DBM no DAP, relação S/G, teores de: extrativos, lignina total, xilanas, glicanas e celulose.
Hein e Chaix (2010)	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Relação S/G e teores de: lignina Klason e lignina solúvel.
Sousa et al (2011)	<i>Eucalyptus spp.</i>	DBM e teores de: lignina total e extrativos.
Milagres et al. (2013)	<i>Eucalyptus spp.</i>	DBM e teores de: lignina total e extrativos.
Zhou, et al. (2016)	<i>Eucalyptus dunnii</i>	Teores de: cinzas, extrativos, lignina, celulose, hemicelulose, holocelulose, glucose, xilose, arabinose e manose.
Estopa et al. (2017)	<i>Eucalyptus benthamii</i>	DBM, Teores de: extrativos, lignina, carboidratos, xilanas e glucose.
Hodge et al. (2018)	<i>E. urophylla; E. dunnii; E. globulus e E. nitens; E. grandis; Eucalyptus spp.</i>	Relação S/G, relação S/(S+G) e teores de: lignina total, lignina solúvel, lignina insolúvel, glucose, xilose, galactose, arabinose e manose.
Diniz et al. (2019)	<i>Eucalyptus benthamii e Eucalyptus pellita</i>	Relação S/G.
Li e Altaner (2019)	<i>Eucalyptus bosistoana</i>	Teor de Extrativos
Baldin et al. (2020)	<i>Eucalyptus benthamii</i>	DBM e teores de: lignina Klason, lignina total, e holocelulose.

Alguns modelos são compostos por amostras denominadas apenas por *Eucalyptus* spp., esses, na maioria das vezes, contemplam clones comerciais de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*. Outros modelos são construídos para uma espécie em particular, e neste caso, são mais adequados para a predição de amostras de madeira de sua respectiva espécie. Contudo, ainda não se tem relatos de modelos de espectroscopia NIR para predição de características químicas do processo de polpação para nenhuma espécie de *Corymbia* spp.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi estabelecer modelos multivariados baseados em espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIRS) para estimativa de teor extrativos, teor de lignina total, relação S/G, densidade básica de cavacos e rendimento de polpa celulósica de *E. dunnii* e do híbrido de *C. torelliana* x *C. citriodora*.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Material genético**

Para a caracterização da madeira e construção dos modelos de espectroscopia NIR foram coletadas amostras em dois testes de progênes híbridas de polinização controlada, contendo 18 e 19 famílias, respectivamente, de *C. torelliana* x *C. citriodora*, situados na fazenda Monte Alegre, no município de Telêmaco Borba - PR e em um teste de progênes de *E. dunnii*, contendo 36 famílias, situado em Otacílio Costa – SC. Para a seleção dos indivíduos que foram avaliados neste estudo, primeiramente foi mensurada a altura total e o DAP (Diâmetro à Altura do Peito, 1,3 m de altura) e estimado o volume individual (VOL, em m<sup>3</sup>) de 1310 indivíduos provenientes dos dois testes de progênes híbridas de *C. torelliana* x *C. citriodora* (CTOxCCT), e 1080 indivíduos provenientes de um teste progênes de *E. dunnii* (EDU). Posteriormente, foi realizada a seleção genética dos melhores indivíduos.

### **2.2. Coleta, preparo das amostras e leituras no espectrofotômetro NIR**

A seleção genética com base no caráter volume individual resultou na seleção de 208 indivíduos de CTOxCCT, e 669 indivíduos de EDU, dos quais foram coletadas amostras de serragem.

Para a coleta das amostras de serragem a casca da madeira foi retirada, e a serragem coletada com o auxílio de uma furadeira/parafusadeira com broca de 12mm para madeira que atravessou o tronco das árvores selecionadas, passando pela medula na altura do DAP. Em seguida as amostras de serragem foram processadas em moinho ciclone para uniformização da granulometria (Figura), e foram armazenadas e acondicionadas por 48 horas em uma sala com umidade e temperatura controladas de 50% e 23°C respectivamente. Após essa etapa, o material foi utilizado para obtenção dos espectros no NIR.

Para obtenção dos espectros, a serragem foi compactada manualmente na unidade de leitura (spining) e levadas até o espectrofotômetro previamente calibrado com os padrões internos de referência do equipamento. Os espectros foram obtidos

com uma resolução de  $8\text{ cm}^{-1}$  na faixa espectral de  $4.000$  a  $10.000\text{ cm}^{-1}$ , fazendo uma varredura de 32 scans, no modo de reflectância difusa, com o equipamento Bruker TANGO FT-NIR. Foram realizadas duas leituras espectrais por amostra estudada.



Figura 1. Amostra de serragem, processada em moinho ciclone, para coleta de espectros NIR.

### **2.3. Análise de Componentes Principais (PCA)**

Espectros foram submetidos a uma análise de componentes principais (PCA). Esta análise permite a visualização de um grande conjunto de dados em forma gráfica. Por meio de variáveis ortogonais entre si, as chamadas componentes principais (PC's) são organizadas por ordem de importância, e são combinações lineares das variáveis principais (CORREIA; FERREIRA, 2007). Esta análise foi realizada por meio do programa The Unscrambler 10.2 (CAMO AS, NORWAY), e foi utilizada para dimensionamento, redução e seleção de dados preservando o maior número de informações possíveis.

Com base nos resultados da análise PCA foram selecionadas 25 amostras de CTOxCCT e 36 amostras de EDU para as análises químicas. As amostras foram coletadas em indivíduos cujas idades variaram de 4 a 7 anos.

A PCA também foi realizada na matriz contendo os espectros das 61 amostras selecionadas com o objetivo de avaliar a similaridade espectral e explorar a dependência dos materiais estudados por meio de agrupamentos.

#### **2.4. Coleta e preparo das amostras para análises de referência**

As árvores das amostras selecionadas foram abatidas e seccionadas em toretes com 80 cm de comprimento cada, nas posições da base, 25, 50, 75 e 100% da altura total. Os toretes foram descascados e processados em cavacos por meio de um picador laboratorial e, em seguida foram classificados com dimensões entre 7 e 13 mm de diâmetro de acordo com a norma SCAN 40:94 e manualmente descartados cavacos com nós, palitos e cascas remanescentes dos cavacos.

#### **2.5. Análises de referência**

Para calibração dos modelos de espectroscopia NIR, foram realizadas análises de referência, em laboratório, usando normas técnicas para caracterização de propriedades físicas e químicas da madeira, além de polpação *kraft* para obtenção de rendimento de polpa celulósica.

##### **2.5.1. Propriedades físicas e químicas da madeira**

A densidade básica da madeira (DBM) é uma propriedade física de um material que expressa a quantidade de massa contida em um determinado volume. Para determinação da DBM os cavacos foram submergidos utilizando o método gravimétrico de balança hidrostática, conforme NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Este é um método gravimétrico que se baseia no deslocamento da água quando a amostra é imersa na mesma e, a DBM é obtida pela relação entre a massa absolutamente seca e o volume saturado da amostra e é expressa em  $\text{Kg.cm}^{-3}$ .

Para as análises de composição química da madeira, os cavacos amostrados foram processados em moinhos *willey*, para redução em serragem que foram classificadas em peneiras. As amostras de serragem que passaram pela

peneira de malha 40 e 60 mesh. As serragens retidas na peneira de 60 mesh foram acondicionadas em sala climatizada com umidade relativa do ar de 50% e temperatura de 23 °C por 48 horas. Após este período, as amostras foram armazenadas em recipientes hermeticamente fechados e destinados para as análises químicas da madeira.

As análises químicas realizadas, foram teor de extrativos (solubilidade em acetona), teor de lignina solúvel, teor de lignina insolúvel e relação siringil/guaiacil (S/G) conforme normas citadas na Tabela 2. O teor de lignina total foi estimado pela soma teor de lignina solúvel, e teor de lignina insolúvel.

Tabela 2. Normas e referências utilizadas como metodologia de análises químicas e físicas para obtenção das propriedades da madeira de amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*.

<b>Propriedade</b>	<b>Metodologia</b>
Densidade Básica de Cavacos	ABNT NBR 11941
Teor de Lignina Solúvel	TAPPI UM250 (1991)
Teor de Lignina Insolúvel	TAPPI T222 OM-97 (1997)
Teor de Extrativos	TAPPI T204 CM-17 (2017)
Relação S/G	LIN e DENCE (1992)

### **2.5.2. Polpação kraft**

Os cozimentos experimentais foram realizados utilizando parâmetros iniciais constantes pré-estabelecidos em digestor MK, modelo 1/K409, com capacidade de 7 litros, aquecido eletricamente e contendo equipamentos periféricos como manômetro, trocador de calor e bomba de circulação. Diferentes cargas de álcali foram utilizadas com o objetivo de obtenção de número Kappa  $18 \pm 0,5$  na parte mediana da curva de deslignificação.

A relação licor/madeira foi de 4/1. Para a vaporização dos cavacos foi utilizado vapor a 105°C durante 20 minutos, sendo 10 minutos de passagem de vapor pelos cavacos e 10 minutos de retenção. A fase de impregnação com licor branco de cozimento durou 45 minutos à temperatura de 138°C, com 12 minutos de subida a esta temperatura. Durante a fase de cozimento, a temperatura usada foi de 148 a

174°C para obtenção do Kappa  $18\pm 0,5$ , com 15 minutos de subida e 150 minutos à temperatura.

Após os cozimentos os cavacos foram descarregados dos reatores e lavados em água corrente utilizando tela de aço inox de 150 mesh. A individualização das fibras foi realizada em hidrapulper laboratorial de 25 litros, numa consistência de aproximadamente 0,6%. A depuração da celulose foi realizada em depurador laboratorial Voith, com fenda de 0,2mm e então foi levada para centrifugação, até 30% de consistência. Após, o rendimento depurado, rendimento bruto e o número Kappa (TAPPI T 236 om-13) foram determinados gravimetricamente.

## 2.6. Calibração do modelo

Para desenvolvimento dos modelos multivariados de espectroscopia NIR, a matriz contendo os dados espectrais (X) e o conjunto de dados de referência (Y) foi utilizada. O software The Unscrambler, versão 10.2, foi utilizado para ajuste dos modelos utilizando a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS), em que estabeleceu os valores de absorbância das amostras ao longo da faixa espectral no NIR associados aos valores relacionados às análises de referência para DBM de cavacos ( $\text{Kg.cm}^{-3}$ ), teor de extrativos (%), rendimento depurado de polpa celulósica (%), teor de lignina total (%) e relação siringil/guaiacil (S/G). Foi utilizado o conjunto total das 61 amostras analisadas em laboratório na elaboração de um modelo misto entre as espécies de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*.

Foram utilizados espectros sem pré-tratamento matemático e tratados por primeira derivada, segunda derivada (SAVITZKY; GOLAY, 1964) e SNV (*Standard Normal Variate*). Para calibração dos modelos, o número de fatores ou variáveis latentes foi determinado com base na minimização do erro padrão (RMSEcv) e maximização do coeficiente de determinação da validação ( $R^2_{cv}$ ) e os modelos foram validados pelo método da validação cruzada completa (*leave one out*). Neste método de validação, cada amostra da calibração é retirada uma vez da matriz, então é estimada pelo modelo desenvolvido sem ela, e esse processo é repetido para todas as amostras, uma de cada vez. Amostras anômalas foram excluídas quando identificadas.

Para a seleção dos modelos de calibração e validação, foram adotados os seguintes critérios de seleção: maior coeficiente de determinação da validação cruzada ( $R^2_{cv}$ ); raiz do erro quadrático médio da validação cruzada ( $RMSE_{cv}$ ), com valores mais próximos de zero; maior razão de desempenho do desvio padrão (RPD); e menor número de variáveis latentes (VL), porém adequado para cada modelo, conforme equações:

$$RMSE_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_c} (y_i - \hat{y}_i)^2}{N_c - VL}}; RMSE_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_v} (y_i - \hat{y}_i)^2}{N_{cv}}}; RPD = \frac{DP}{RMSE}.$$

Onde  $\hat{y}_i$ : é a característica de interesse para a amostra de validação  $i$ , predita pelo modelo de calibração;  $y_i$  é o valor conhecido como constituinte de interesse da amostra  $i$ ;  $N_c$ : número de amostras usadas no grupo de calibração;  $VL$ : número de variáveis latentes;  $N_{cv}$ : número de amostras usadas para a validação; e  $DP$ : desvio padrão das amostras.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Propriedades da madeira

Conforme estatística descritiva a DBM a partir de amostras de cavacos das madeiras de *C. torelliana* x *C. citriodora* (CTOxCCT), com idades variando entre 4,0 e 5,5 anos, apresentaram valores entre 481,1 Kg.cm<sup>-3</sup> e 611,0 Kg.cm<sup>-3</sup>, com valor médio 550,8 Kg.cm<sup>-3</sup> superior à média obtida pela madeira de *E. dunnii* (EDU) de 479,1 Kg.cm<sup>-3</sup> (Tabela 3). As amostras de EDU, com idades entre 5,5 e 7,0 anos, apresentaram valor mínimo de DBM equivalente a 410,0 Kg.cm<sup>-3</sup> e valor máximo de 575,1 Kg.cm<sup>-3</sup> (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização físico-química da madeira de 25 amostras de *C. citriodora* x *C. torelliana* (CTOxCCT) e 36 amostras de *E. dunnii* (EDU), para densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total (%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%).

<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> (CTOxCCT)						
Parâmetros	N	LI	LS	Média	DP	CV(%)
DBM Cavacos	25	481,1	611,0	550,8	35,3	6,4
Extrativos em Acetona	25	3,1	7,7	4,6	1,0	21,5
Lignina Total	25	23,8	27,6	25,9	1,0	3,7
Relação S/G	25	2,4	4,1	3,0	0,4	12,9
Rendimento Depurado	25	36,6	53,2	47,4	4,1	8,6
<i>E. dunnii</i> (EDU)						
Parâmetros	N	LI	LS	Média	DP	CV(%)
DBM Cavacos	36	410,0	575,1	479,1	32,0	6,7
Extrativos em Acetona	36	1,3	5,1	3,4	1,1	31,2
Lignina Total	36	23,9	28,3	26,8	1,2	4,4
Relação S/G	36	3,1	4,6	3,8	0,4	10,0
Rendimento Depurado	36	50,7	57,2	53,5	1,2	2,2

Onde = DBM: densidade básica da madeira; N: número de amostras; LI: limite inferior; MAX: limite superior; DP: desvio padrão; CV (%): coeficiente de variação.

O teor de extrativos por solubilidade em acetona apresentou valor médio de 3,4% para a madeira de EDU, variando entre 1,3% e 5,1%. A madeira de CTOxCCT resultou em teor médio de extrativo nitidamente maior ao obtido para a madeira de EDU, conforme já esperado, equivalente a 4,6%, com valores variando entre 3,1% e 7,7%. O teor de extrativos apresentou os maiores coeficientes de variação entre os

parâmetros apresentados na Tabela 3, 31,2% e 21,5%, respectivamente para as madeiras de EDU e CTOxCCT.

A porcentagem de teor de lignina total apresentou limites inferiores (LI) e superiores (LS) muito próximos entre as duas espécies, sendo LI de 23,8% e 23,9% e LS de 27,6% e 28,3% para CTOxCCT e EDU, respectivamente. Já a relação de lignina siringil/guaiacil (S/G), mostrou uma leve variação entre as espécies, com média de 3,0 (LI= 2,4 e LS= 4,1) para as amostras de CTOxCCT, e média de 3,8 (LI= 3,1 e LS= 4,6) entre as amostras de EDU (Tabela 3).

O rendimento depurado de polpa celulósica das amostras de CTOxCCT apresentou uma variação de 36,6% a 53,2%, com uma média de 47,4%. Para as amostras de EDU, este parâmetro apresentou uma amplitude menor, com limite mínimo de 50,7% e limite máximo de 57,2%; e valor médio superior à média de CTOxCCT de 53,5% (Tabela 3).

### 3.2. Espectros no NIR e Análise de Componentes Principais

Uma visão geral dos espectros NIR coletados nas 61 amostras totais de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* em conjunto é apresentada na Figura 2. As bandas de absorção mais proeminentes nos espectros das 61 amostras estão entre 7000 a 4200  $\text{cm}^{-1}$  (Figura 2).

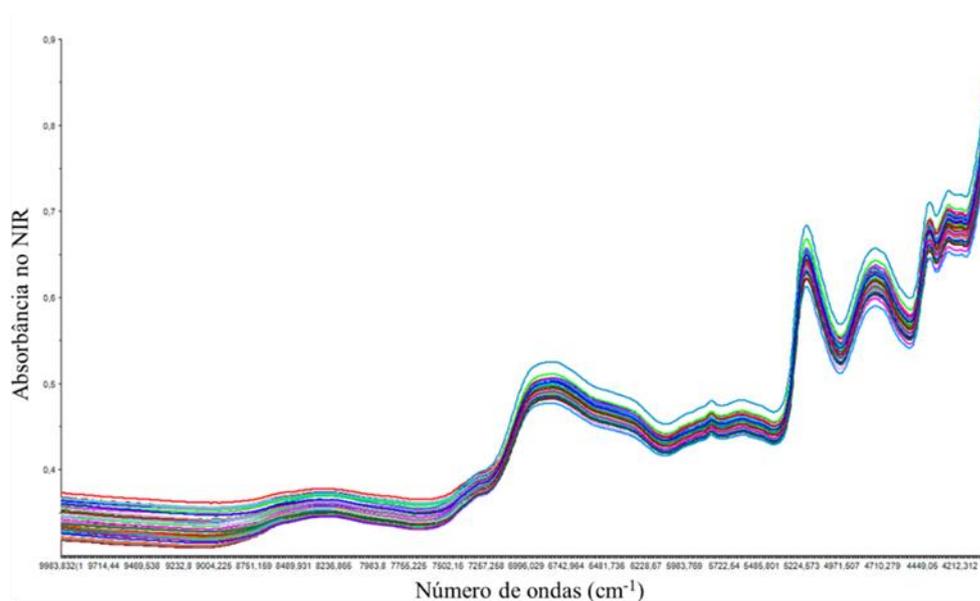


Figura 2. Espectros não tratados, registrados nas 61 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*.

Os escores da análise de componentes principais (PCA) realizada com os espectros foram plotados em gráfico bidimensional destacando as amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* (Figura 3). A componente principal 1 (PC1) e a PC2 explicaram juntas 99% da variação dos dados. Sendo que, 73% dos dados foram explicados pela componente principal 1 (PC-1), e 26% dos dados explicados pela componente principal 2 (PC-2) para as duas espécies estudadas.

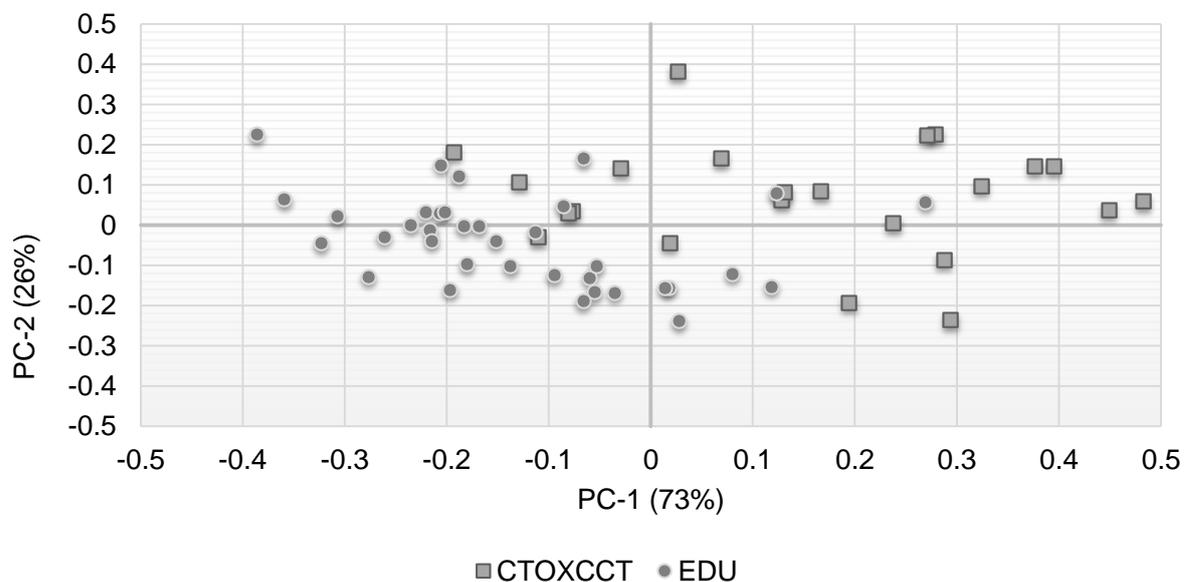


Figura 3. Análise de componentes principais dos espectros NIR das amostras de serragem de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii*.

### 3.3. Modelos de espectroscopia NIR

Foram desenvolvidos modelos de espectroscopia NIR em duas abordagens para cada um dos parâmetros de densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total (%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%). A abordagem 1 utilizou o lote de 25 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e a abordagem 2 utilizou o lote de 25 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* mais as 36 amostras de *E. dunnii*. Os resultados de calibração e validação cruzada dos modelos construídos são apresentados a seguir.

Para o ajuste dos modelos foram utilizadas regressões dos mínimos quadrados parciais (PLS) para calibração de modelos preditivos para estimativa das

propriedades da madeira a partir dos espectros originais e tratados por 1ª derivada, 2ª derivada e SNV, com identificação de amostras anômalas utilizando validação cruzada *leave one out*.

Todas as regressões foram ajustadas com 10 fatores ou variáveis latentes (LV), mas o número de auto-vetores de cada modelo foi determinado pela minimização da variância residual.

### 3.3.1. Modelo de espectroscopia NIR de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Abordagem 1)

Os ajustes dos modelos da abordagem 1 foram desenvolvidos utilizando o lote de 25 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora*. Os modelos selecionados com menor raiz do erro quadrático médio para validação cruzada (RMSE<sub>cv</sub>) e maior coeficiente de determinação para validação cruzada (R<sup>2</sup><sub>cv</sub>) são apresentados na Tabela 4 e Figura 4.

Tabela 4. Calibração do modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Abordagem 1) de predição de espectros NIR para densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total (%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%).

Propriedade	PT	outlier	LV	Modelo	R <sup>2</sup>	RMSE	RPD
DBM Cavacos	snv	1	10	c	0,95	8,26	4,3
				cv	0,60	23,13	1,5
Extrativos em Acetona	snv	1	8	c	0,84	0,40	2,5
				cv	0,37	0,81	1,2
Lignina Total	2d	1	3	c	0,83	0,40	2,4
				cv	0,56	0,67	1,4
Relação S/G	1d	1	8	c	0,94	0,09	4,2
				cv	0,63	0,24	1,6
Rendimento depurado	1d	1	3	c	0,70	2,22	1,8
				cv	0,52	2,94	1,4

Onde = DBM: densidade básica da madeira; PT: pré tratamento; LV: variável latente; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; RPD: razão de desempenho do desvio padrão; c: modelo de calibração; cv: modelo de validação cruzada; 2d: segunda derivadas; 1d: primeira derivada; snv: padronização normal de sinal.

A calibração do modelo da abordagem 1 para DBM de cavacos foi feita com 10 variáveis latentes e apresentou um coeficiente de determinação R<sup>2</sup>c de 0,95 e um

RMSEc de 8,26 Kg.cm<sup>-3</sup> com RPD de 4,3 (Tabela 4 e Figura 4A). O modelo de validação cruzada apresentou um R<sup>2</sup>cv de 0,60 com RMSEcv de 23,13 Kg.cm<sup>-3</sup> e RPD de 1,5 (Tabela 4 e Figura 4A).

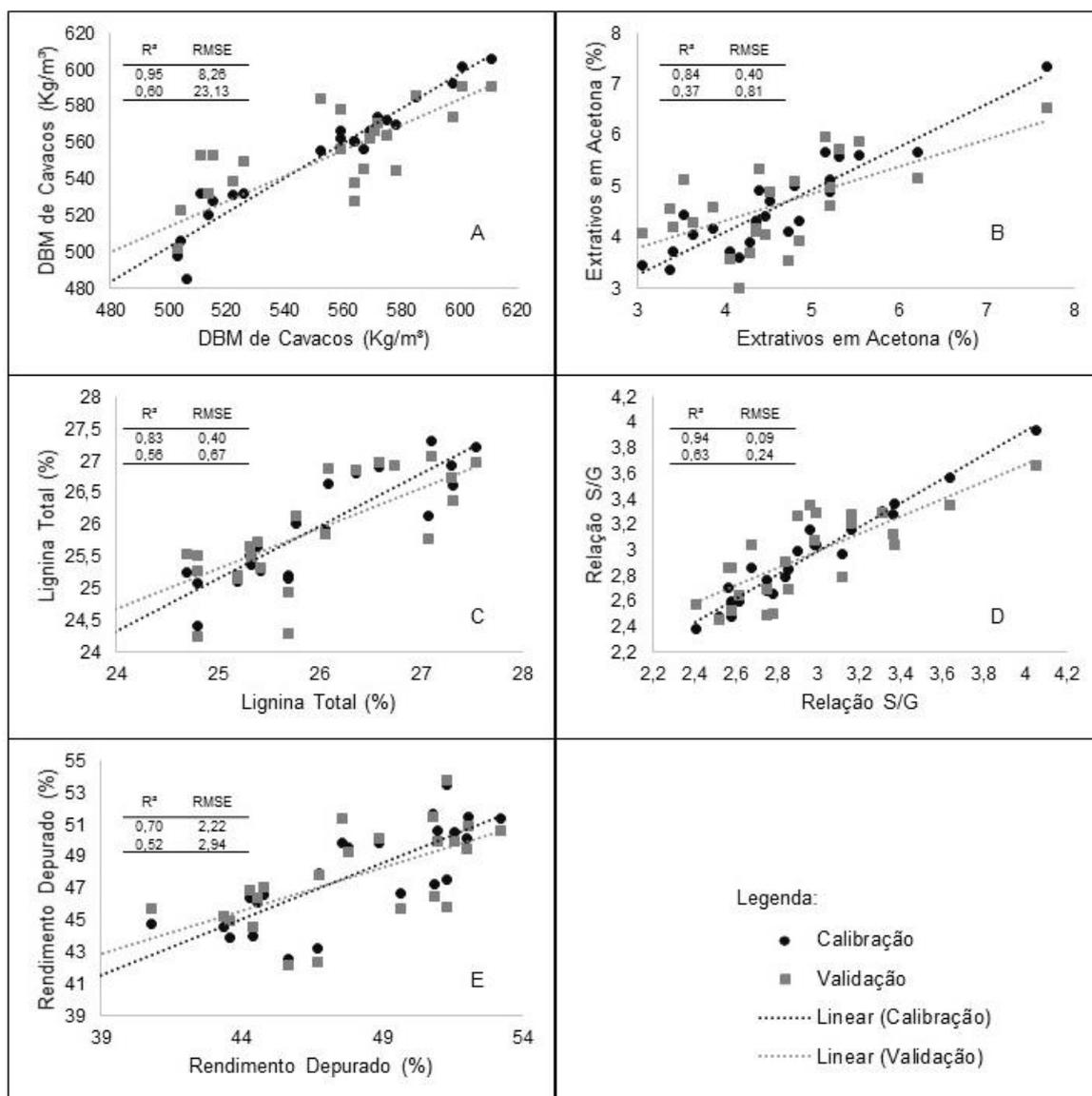


Figura 4. Correlação entre os valores de referência e os valores preditos por espectros NIR para modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Abordagem 1) para: (A) densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>); (B) teor de extrativos solúveis em acetona (%); (C) teor de lignina total (%); (D) relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e (E) rendimento depurado de polpa celulósica (%).

Para a propriedade teor de extrativos, a abordagem 1 foi calibrado com 8 variáveis latentes e apresentou um R<sup>2</sup>c e R<sup>2</sup>cv de 0,84 e 0,37 com RMSEc e RMSEcv de 0,40% e 0,81%; respectivamente (Tabela 4 e Figura 4B). Os RPDc e RPDcv desse modelo foram de 2,5 e 1,2; respectivamente (Tabela 4 e Figura 4B).

O teor de lignina total apresentou na abordagem 1 com 3 variáveis latentes um  $R^2c$  de 0,83 com RMSEc de 0,40% e RPD de 2,4 (Tabela 4 e Figura 4C). Já a validação cruzada pelo método leave one out apresentou RPDcv de 1,4 com coeficiente de determinação  $R^2cv$  de 0,56 e RMSEcv DE 0,67% (Tabela 4 e Figura 44C).

O parâmetro S/G foi calibrado a partir de uma PLS com 8 variáveis latentes, e obteve para a abordagem 1 o  $R^2c$  de 0,94 com RMSEc de 0,09% e RPD de 4,2 maior valor observado entre os modelos (Tabela 4 e Figura 4D). Esse parâmetro obteve na abordagem 1 o maior  $R^2cv$  observado de 0,63 e RMSEcv de 0,24% com RPD de 1,6 (Tabela 4 e Figura 44D).

O modelo da abordagem 1 para predição de rendimento depurado em polpa celulósica foi calibrado com 3 variáveis latentes e apresentou um  $R^2c$  de 0,70 com RMSEc de 2,22% e RPD de 1,8 (Tabela 4 e Figura 4E). A validação cruzada deste mesmo modelo apresentou  $R^2cv$  de 0,52 com RMSEcv de 2,94% e RPD de 1,4 (Tabela 4 e Figura 4E).

### **3.3.2. Modelo de espectroscopia NIR de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* (Abordagem 2)**

Ajustes de modelos foram desenvolvidos utilizando o lote de 25 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e 36 amostras de *E. dunnii*. Os modelos selecionados com menor raiz do erro quadrático médio para validação cruzada (RMSEcv) e maior coeficiente de determinação para validação cruzada ( $R^2cv$ ) são apresentados na Tabela 5 e Figura 5.

Tabela 5. Calibração do modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* (Abordagem 2) de predição de espectros NIR para densidade básica da madeira (DBM) de cavacos ( $\text{Kg.cm}^{-3}$ ), teor de extrativos em acetona (%), teor de lignina total (%), relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e rendimento depurado de polpa celulósica (%).

Propriedade	PT	outlier	LV	Modelo	R <sup>2</sup>	RMSE	RPD
DBM Cavacos	2d	2	2d	c	0,82	20,90	2,3
				cv	0,73	25,49	1,9
Extrativos em Acetona	2d	1	2d	c	0,89	0,39	3,0
				cv	0,65	0,70	1,7
Lignina Total	2d	4	2d	c	0,70	0,62	1,9
				cv	0,53	0,79	1,5
Relação S/G	1d	1	1d	c	0,81	0,22	2,5
				cv	0,66	0,33	1,7
Rendimento depurado	2d	1	2d	c	0,86	1,53	2,7
				cv	0,77	1,98	2,1

Onde = DBM: densidade básica da madeira; PT: pré tratamento; LV: variável latente; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; RPD: razão de desempenho do desvio padrão; c: modelo de calibração; cv: modelo de validação cruzada; 2d: segunda derivadas; 1d: primeira derivada.

O modelo da abordagem 2 para a DBM de cavacos foi calibrado utilizando três variáveis latentes e alcançou um coeficiente de determinação de R<sup>2</sup>c de 0,81 e um RMSEc de 20,90  $\text{Kg.cm}^{-3}$  (Tabela 5 e Figura 5A). A validação do modelo de abordagem 2 pelo método de validação cruzada *leave-one-out*, apresentou 0,73 e 25,49  $\text{Kg.cm}^{-3}$  de coeficiente de determinação e erro, respectivamente (Tabela 5 e Figura 5A). Os valores de RPD foram de 2,3 e 1,9 para os modelos de calibração e validação cruzada, respectivamente.

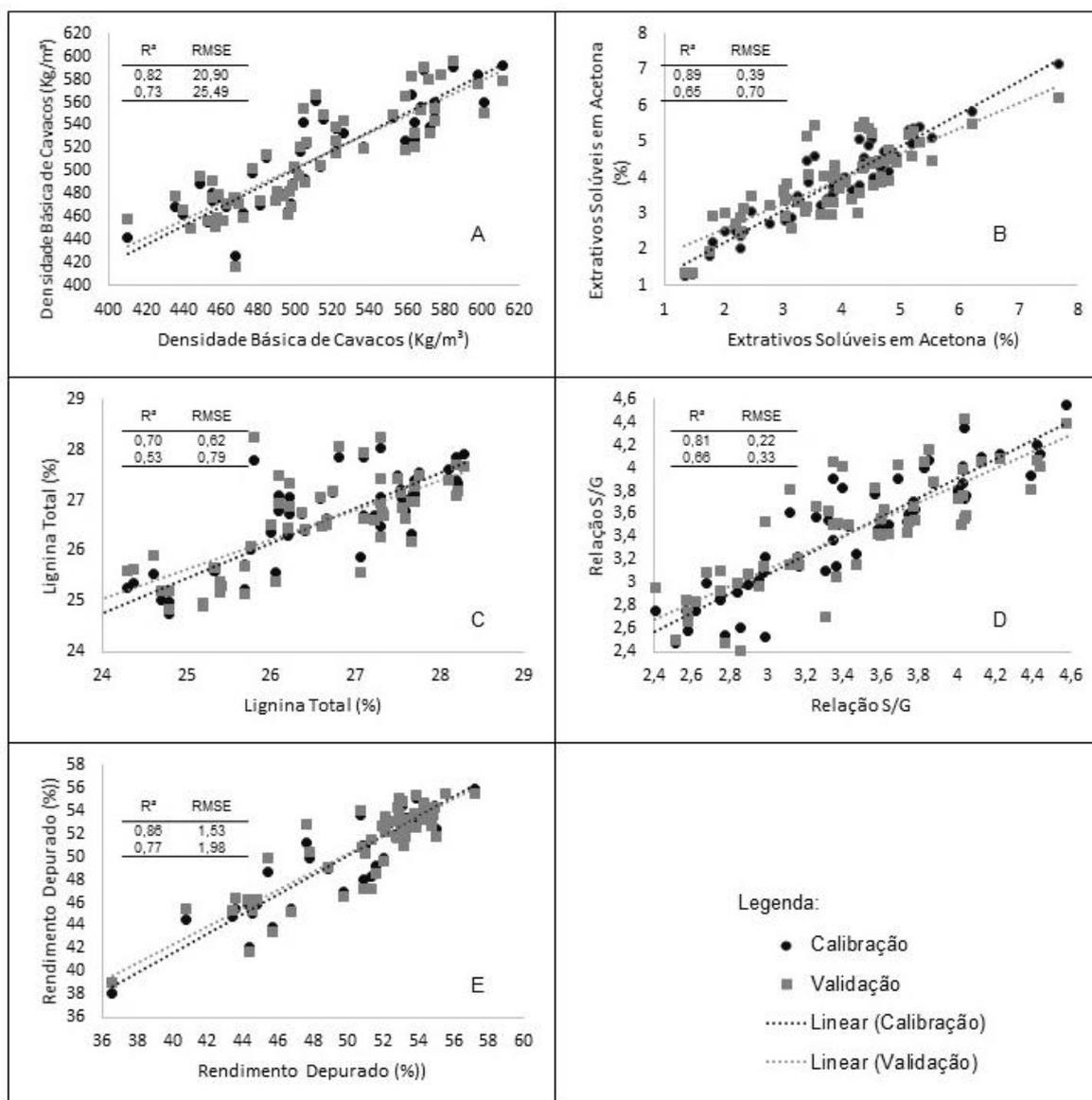


Figura 5. Correlação entre os valores de referência e os valores preditos por espectros NIR para modelo de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* (Abordagem 2) para: (A) densidade básica da madeira (DBM) de cavacos (Kg.cm<sup>-3</sup>); (B) teor de extrativos solúveis em acetona (%); (C) teor de lignina total (%); (D) relação lignina siringil/guaiacil (S/G) e (E) rendimento depurado de polpa celulósica (%).

A calibração do modelo da abordagem 2 para teor de extrativos por solubilidade em acetona, com 6 variáveis latentes, foi o modelo que apresentou o maior RPDc, equivalente a 3,0. O coeficiente de determinação deste modelo ( $R^2c$ ) foi de 0,89 com um RMSEc de 0,39% (Tabela 5 e Figura 5B). Já o modelo de validação cruzada apresentou um RPDcv de 1,7 com coeficiente de determinação de 0,65 e RMSEcv de 0,70% (Tabela 5 e Figura 5B).

O coeficiente de determinação para o modelo da abordagem 2 de calibração obtido com 4 variáveis latentes para teor de lignina total foi de 0,70, com RMSEc de 0,62% (Tabela 5 e Figura 5C), e RPDc de 1,9. As estatísticas associadas a validação cruzada para a mesma propriedade resultou em valores de 0,53 e 0,79% de R<sup>2</sup>cv e RMSEcv, respectivamente. Já o RPDcv foi de 1,5 (Tabela 5 e Figura 5C).

Para a relação lignina S/G, o modelo da abordagem 2 foi calibrado com 8 variáveis latentes, resultou em um valor de R<sup>2</sup>c de 0,81 com RMSEc de 0,22 (Tabela 5 e Figura 5D) e RPDc de 2,5. A validação deste modelo por meio de validação cruzada *leave-one-out* apresentou um R<sup>2</sup>cv de 0,66 com RMSEcv de 0,33 e RPDcv de 1,7 (Tabela 5 e Figura 5D).

Para o rendimento depurado de polpa celulósica via regressão PLS com 4 variáveis latentes, o modelo da abordagem 2 resultou em valores de 0,86 e 1,53% para o coeficiente de determinação e RMSEc, respectivamente (Tabela 5 e Figura 5E), e apresentou o maior valor de RPDc encontrados entre os parâmetros de 2,7. Para a validação cruzada com a metodologia *leave one out* o coeficiente de determinação foi de 0,77 e RMSEcv de 1,98% e RPDcv de 2,1 (Tabela 5 e Figura 5B E).

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização da Madeira

#### 4.1.1. Densidade Básica de Cavacos

A densidade básica da madeira (DBM) é uma das características mais importantes para a avaliação da qualidade da madeira para o processo de polpação (SEGURA; SILVA JR., 2016). Essa propriedade também é comumente utilizada na maioria dos programas de melhoramento genético como parâmetro de seleção, pois correlaciona-se diretamente com a produção de massa seca, com as propriedades físico-mecânicas da madeira, e é facilmente determinada (PALERMO et al., 2004; SANTOS, 2010). A DBM reflete os parâmetros anatômicos (espessura da parede celular e lúmen) e é influenciada pelos parâmetros genéticos e ambientais, e é resultado da interação desses dois fatores (RUY, 1998; RUY et al., 2001).

Os valores encontrados para as propriedades da madeira mostram uma variabilidade entre as amostras, o que é um fator muito importante para a seleção de indivíduos a partir de um caractere de interesse em um programa de melhoramento e também para a construção de modelos de espectroscopia NIR.

As densidades básicas da madeira de cavacos encontradas para as amostras de CTOxCCT com idades variando entre 4,0 e 5,5 anos, apresentaram valor médio ( $550,8 \text{ Kg.cm}^{-3}$ ) similares aos valores encontrados por Segura e Silva Jr. (2016), para o mesmo híbrido aos 7 anos de idade. Ainda de acordo com os mesmos autores, não foi observado valor de DBM acima de  $0,600 \text{ g.cm}^{-3}$ , diferente do obtido neste estudo, em que o valor máximo obtido foi de  $611,0 \text{ Kg.cm}^{-3}$ .

Já em estudo desenvolvido por Valente (2017), com clones híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora* aos 6 anos de idade, foram obtidos valores mínimos de DBM de  $0,542 \text{ g.cm}^{-3}$  e valor máximo de  $0,610 \text{ g.cm}^{-3}$  para madeiras dos seis primeiros clones do *ranking*, selecionados no município de Dionísio - MG. Estes valores são bem próximos aos valores encontrados neste estudo, demonstrando uma similaridade deste caráter expressado pelos híbridos dessas duas espécies, mesmo entre diferentes progênies e locais de crescimento.

Para as amostras de EDU entre 5,5 e 7,0 anos de idade, a DBM encontrada de 410,0 Kg.cm<sup>-3</sup> a 575,1 Kg.cm<sup>-3</sup>, está acima das densidades de 0,438 g.cm<sup>-3</sup>, 0,441 g.cm<sup>-3</sup> e 0,438 g.cm<sup>-3</sup> de três diferentes procedências de *E. dunnii* aos 4,5 anos de idade encontradas por Pereira et al. (1986). Esta variação pode estar relacionada a idade amostral, uma vez que Batista et al. (2010) encontraram uma média de DBM de 0,560 g.cm<sup>-3</sup> para clones de *E. dunnii* aos 11 anos de idade na região de Telêmaco Borba - PR, aproximadamente 0,100 g.cm<sup>-3</sup> a mais que as demais espécies também estudadas (*E. saligna* e *E. grandis*), o que indica que o *E. dunnii* possui uma DBM superior quando comparado a outras espécies de *Eucalyptus* spp. tradicionalmente plantadas no Brasil.

A idade exerce grande influência na DBM pois, com o aumento da idade aumenta também a espessura da parede celular, menor atividade cambial e menor lúmen, o que resulta em uma elevação dos valores de DBM, principalmente da fase juvenil para a fase adulta, onde a tendência é uma maior estabilidade. O ritmo de crescimento das árvores, é a variação da matéria seca sintetizada com a idade, e é dependente de fatores genéticos, edáficos e climáticos (TRUGILHO et al., 1996).

#### 4.1.2. Teor de extrativos

Apesar do crescente interesse pelos usos múltiplos da lignina e extrativos do setor químico, segundo Segura (2012) no processo de produção de celulose esses componentes da madeira são considerados indesejáveis, e maiores teores elevados podem resultar em menores rendimentos de celulose e maior consumo de reagentes químicos. Altos teores destes componentes, juntamente com madeiras de altas densidades, tendem a diminuir a eficiência das reações de deslignificação, levando a cozimentos parciais do processo e a formação de rejeitos (ALMEIDA, 2003).

Os teores médios de extrativos (diluído em acetona) encontradas neste trabalho foram de 4,6% e 3,4% para CTOxCCT e EDU, respectivamente. Ambas as médias são superiores à média de 1,6% encontrada por Milagres (2013) para híbridos de *Eucalyptus* spp. aos 5 anos de idade, assim como a média de 1,1% encontrada por Viana et al. (2010) para 6 clones de *Eucalyptus* spp. aos 3 anos de idade, e as médias de 2,6% e 1,1% encontradas por Estopa et al. (2017) e Baldin et al. (2020), respectivamente para *E. benthamii* aos 4 anos de idade.

Em geral, as espécies de *Corymbia* são conhecidas por apresentarem teores de extrativos mais altos, quando comparadas as espécies de *Eucalyptus*. Os limites superiores de 7,7% e 5,1% e limites inferiores de 3,1% e 1,3% encontrados neste trabalho para CTOxCCT e EDU respectivamente, seguem essa tendência. Esse comportamento também foi observado por Medeiros et al. (2016) que encontrou aos 4 anos de idade para o híbrido *E. urograndis* 6,51% de teor de extrativos totais, enquanto o *C. citriodora* apresentou 9,33%. Essa tendência pode ser contornada com a seleção genética de clones com teores menores de extrativos, ou dependendo dos produtos e subprodutos extraídos dessa madeira, essa característica pode ser desejada e esses teores elevados podem ser positivos.

Segura e Silva Jr. (2016) obtiveram para 4 clones do híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* aos 7 anos de idade valores de teor de extrativos totais de 3,68%; 9,81%; 2,54% e 2,38%, respectivamente, enquanto para o clone de referência do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* encontraram um teor de extrativos de 5,64%, acima de três, dos 4 clones de *Corymbia* estudados, o que mostra a variabilidade desse parâmetro entre esses híbridos, e conseqüentemente o potencial de seleção.

Comparando diferentes idades de híbridos de *Eucalyptus spp.*, Milagres et al. (2013) encontraram médias de teor de extrativos de 2,7% aos 3 anos de idade, 1,5% entre 4 e 6 anos de idade e 3,1% aos 7 anos de idade, não apresentando uma tendência linear de aumento deste parâmetro com o aumento da idade. Já Trugilho et al. (1996) observaram para *E. saligna* tendência de aumento no teor de extrativos com o aumento da idade, com valores de 3,68% no primeiro ano, 4,13% aos 2 anos, 4,34% aos 3 anos e 4,81% aos 4 anos de idade.

Além da idade e das características genéticas, outros fatores que exercem impacto no teor de extrativos são sítio de plantio, clima, época de colheita e tempo de estocagem da madeira (SILVÉRIO et al., 2008; SOARES et al., 2015; MORAIS et al., 2017). Isso pode demonstrar que existe variabilidade entre os teores de extrativos em função da idade e das espécies estudadas, e este fator deve ser considerado na seleção de indivíduos com base nesta característica.

### 4.1.3. Lignina Total e Relação Lignina S/G

Nos processos de polpação química da madeira, o principal papel dos reagentes químicos é a remoção da lignina e outras substâncias para individualização das fibras (CASEY, 1984). Durante o processo de polpação *kraft*, a difusão dos reagentes químicos até a lamela média é favorecida pela remoção das hemiceluloses e da lignina, permitindo assim a modificação das estruturas das fibras (BASSA, 2002).

A lignina siringil (S) e guaiacil (G) são os dois monômeros de lignina mais abundantes na parede celular secundária das plantas (WENG; CHAPPLE, 2010). As unidades G são mais resistentes à despolimerização da lignina, enquanto que a lignina S é mais facilmente removida, portanto a razão S/G pode afetar o processo de polpação (DEL RÍO et al. 2007).

Apesar da variação entre as idades das amostras, os valores de teor de lignina total encontrados neste trabalho são muito similares para as duas espécies estudadas, com médias de 25,9% e 26,8% para CTOxCCT e EDU, respectivamente. Hodge et al. (2018) obtiveram teor médio de lignina total de 27,3% para amostras de *E. dunnii* aos 4 anos de idade, valor bem próximo ao encontrado para a mesma espécie neste trabalho. Esses mesmos autores encontraram ainda teores médios de lignina total de 33,7% para amostras de *E. urophylla* entre 4 e 13 anos de idade, 23,8% para amostras de *E. globulus* e *E. nitens* entre 8 e 25 anos de idade e 30,3% para *E. grandis* aos 6 anos de idade.

Medeiros et al. (2016) observaram aos 4 anos de idade para o híbrido *E. urograndis* teores de lignina insolúvel de 26,7% e de 27,36% para *C. citriodora*, enquanto Segura e Silva Jr. (2016) obtiveram para 4 clones do híbrido *C. torelliana* x *C. citriodora* aos 7 anos de idade teores de lignina total de 22,37%; 20,95%; 22,89% e 20,35%, valores abaixo dos encontrados neste trabalho. Ainda de acordo com os mesmos autores, para um clone de *E. grandis* x *E. urophylla* foi observado 27,09% de teor de lignina aos 6 anos de idade, valor este mais próximo aos valores aqui observados. Valores similares foram observados por Trugilho et al. (1996), que obtiveram para *E. saligna* aos 1, 2, 3 e 4 anos de idade teores de lignina total de 27,0%, 26,1%, 24,32 e 24,49%, respectivamente.

Teores mais altos do que os encontrados para lignina total foram observados para *E. benthamii* aos 4 anos de idade, com valores médios de 31,5%,

variando entre 26,8 e 35,5% (Estopa et al., 2017), e média de 31,3%, variando entre 28,1% e 34,4%, encontrados por Baldin et al. (2020).

A relação lignina siringil/guaiacil (S/G) apresentou médias de 3,0 e 3,8 para CTOxCCT e EDU, respectivamente, e menores às encontradas por Viana et al. (2010). No estudo em questão, os autores relataram teor de lignina total de 30,46% e relação S/G 9,58 para 6 clones de *Eucalyptus spp.* aos 3 anos de idade. Por outro lado, Diniz et al. (2019) obtiveram valores médios similares aos obtidos neste estudo para *E. benthamii* (2,97) aos 4,5 anos de idade e para *E. pellita* (2,78) aos 3,5 anos de idade.

Hodge et al. (2018) obtiveram valores de S/G de 3,0; 5,6 e 2,7 para *E. urophylla* entre 4 e 13 anos de idade, *E. globulus* e *E. nitens* entre 8 e 25 anos de idade e *E. grandis* aos 6 anos de idade respectivamente. Para *E. dunnii* aos 4 anos de idade, esses autores encontraram uma relação S/G média de 4,5, acima da média de 3,8; mas próxima ao limite superior de 4,6 observados para a mesma espécie neste trabalho.

Quanto maior a relação S/G, menos álcali pode ser demandado para a produção de celulose, reduzindo o custo de polpação (RAMADEVI et al. 2016). Uma opção para contornar este problema é a seleção de clones com menor teor de lignina e extrativos e maior relação S/G (MILAGRES, 2013). Compreender a variação disponível e medir essas relações são importantes em programas de melhoramento que objetivam a seleção de clones para a indústria de celulose (DINIZ et al., 2019).

#### **4.1.4. Rendimento Depurado de polpa celulósica**

O rendimento depurado de polpa celulósica, propriedade que indica, em valores percentuais, a quantidade de polpa celulósica produzida a partir de uma quantidade de massa seca de madeira (PEREIRA et al., 2019) é um dos mais importantes indicadores para a avaliação e seleção de clones para plantio de florestas que tenham como objetivo a produção de polpa celulósica.

O rendimento de polpa celulósica em um processo *kraft* é influenciado por diversos aspectos, dentre eles, a matéria prima vegetal. A espécie ou tipo de fibra, DBM, composição química, umidade, tempo e condições de armazenamento são alguns dos parâmetros da matéria prima que impactam nesse processo (KLOCK et al., 2013).

Dentre as diversas propriedades da madeira que impactam no rendimento depurado de polpa celulósica, valores de DBM dentro de uma faixa entre 0,450 g.cm<sup>-3</sup> e 0,550 g.cm<sup>-3</sup> são considerados ótimos na produção de celulose de fibra curta de eucalipto (BARRICHELO et al., 1976).

Os resultados de rendimento depurado de polpa celulósica entre os híbridos de CTOxCCT apresentaram uma média de 47,4%. Este valor está de acordo com o encontrado por Segura e Silva Jr. (2016) para dois dos quatro clones analisados deste mesmo híbrido de *Corymbia*, porém está abaixo dos valores médios presentes na literatura para *Eucalyptus*, e podem estar relacionados aos altos valores de DBM (média de 550,8 Kg.cm<sup>-3</sup>) e teor de extrativos (média de 4,6%) encontrados para esses híbridos.

Valores dessa magnitude são encontrados em trabalhos anteriores a 1990 (FOELKEL et al, 1975; ZVINAKEVICIUS et al., 1982), e provavelmente estão ligados a menor tecnologia embutida aos processos de cozimento. Porém, estes mesmos materiais apresentaram valores limites variando entre 36,6% e 53,2%, demonstrando que existe variabilidade entre as amostras, o que permite a seleção de clones com maiores rendimentos de polpa celulósica. Segura e Silva Jr. (2016) encontraram valores de rendimento de polpa celulósica acima de 50% para dois dos quatro clones de CTOxCCT por eles avaliados.

Para EDU, foi observado rendimento depurado de polpa celulósica mínimo de 50,7%, máximo de 57,2% e médio de 53,5%. Estes valores estão de acordo com valores encontrados para *E. grandis*, *E. urophylla* e para o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* (MOKFIENSKI, 2008; QUEIROZ et al., 2004; GOMIDE et al., 2005; SOUZA et al., 2018). Para *E. dunnii*, Cit (2013) encontrou valores próximos a média observada neste trabalho, com rendimentos depurados de polpa celulósica de 52,3% e 53,9%.

#### **4.2. Espectros no NIR e Análise de Componentes Principais**

A espectroscopia NIR se baseia na espectroscopia vibracional, que mede a interação da luz com o material estudado (NAES et al., 2002; PASQUINI, 2003). A técnica mede a interação da radiação com as ligações químicas dos constituintes do material utilizado. A interação ocorrerá se houver ressonância entre o campo elétrico gerado pela oscilação da ligação química e a onda eletromagnética (PASQUINI,

2003). O espectrômetro emite radiação sobre a amostra e os sensores captam variações nas vibrações moleculares dos constituintes químicos nela existentes. Tais componentes irão absorver, refletir e transmitir de forma particular a radiação que lhes são incididas. Em dada faixa de comprimento de onda, algumas frequências serão absorvidas, outras não serão, enquanto algumas serão parcialmente. Essa figura complexa da intensidade de absorção versus o comprimento de onda, constitui o espectro de absorção de uma substância ou amostra (PASQUINI, 2003). Na Figura 2, as bandas de absorção, obtidas durante as leituras dos espectros no equipamento NIR a cada  $8\text{ cm}^{-1}$ , mais proeminentes observadas nos espectros das 61 amostras de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* estão entre  $7000$  a  $4200\text{ cm}^{-1}$ .

Na análise de componentes principais (PCA) a componente principal 1 (PC1) e a PC2 explicaram juntas 99% da variação dos dados. Além disso é observada forte similaridade espectral entre as amostras do mesmo gênero, o que as fazem ter uma tendência de divisão em dois grupos em função deste fator no eixo x (PC1). Levando em consideração o princípio da técnica de espectroscopia NIR, este fato pode ocorrer em função das diferenças químicas entre os materiais. O mesmo resultado foi observado por Ramalho et al. (2018) ao utilizarem a técnica NIRS para distinguir diferentes espécies florestais nativas por PCA.

#### **4.3. Calibração e Validação Cruzada de Modelos de espectroscopia NIR**

No desenvolvimento deste trabalho, modelos de espectroscopia NIR com duas abordagens foram calibrados para cada um dos parâmetros estudados. O modelo da abordagem 1 foi construído com o objetivo de ser um modelo específico para o híbrido de *C. torelliana* x *C. citriodora* com amostras coletadas em diferentes idades. No segundo caso (abordagem 2), optou-se pela utilização de amostras de diferentes espécies e idades, visando aumentar a amplitude dos dados e a obtenção de modelos com boas estatísticas associadas.

O RPD, que é a razão entre o desvio padrão dos valores de referência e o erro padrão do modelo de determinado parâmetro, é um indicador que permite a comparação de modelos de calibração de diferentes propriedades e unidades, sendo que quanto maior este indicador, mais confiável é a calibração do modelo (FUJIMOTO

et al., 2008). Dentre os modelos de calibração desenvolvidos o maior valor de RPD foi observado para DBM de cavacos no modelo da abordagem 1, equivalente a 4,3, e o menor valor também foi observado no modelo da abordagem 1 para rendimento depurado de polpa celulósica, de 1,8. Já para os modelos de validação cruzada, os valores de RPD ficaram entre 1,2 e 1,6 no modelo da abordagem 1 e entre 1,5 e 2,1 no modelo da abordagem 2. Segundo Bailléres et al. (2002), valores acima de 1,5 indicam modelos com potencial de utilização para a seleção inicial de indivíduos, como é o caso dos programas de melhoramento.

Os valores de RPD encontrados neste trabalho estão similares ao encontrados por vários autores. Estopa et al. (2017) obtiveram valores de RPD de 1,4; 1,5 e 2,3 para os parâmetros de DBM, teor de lignina e teor de extrativos, em um modelo desenvolvido para *E. benthamii*. Para esta mesma espécie, Baldin et al. (2020) obtiveram valores de RPD de 1,6 para teor de extrativos e 1,9 para teor de lignina total. Para relação S/G, Diniz et al. (2019) encontraram valores de RPD de 1,75 e 1,65 para *E. benthamii* e *E. pellita*, respectivamente. Zhou et al. (2016) obtiveram para o modelo de predição de *E. dunnii* valores de RPD acima dos encontrados neste trabalho, chegando a 4,3 para teor de extrativos e 2,5 para teor de lignina.

A calibração dos modelos foi realizada pela abordagem PLS, onde o número de variáveis latentes corresponde, para cada modelo, à variância residual mínima. Nesta abordagem, o objetivo é reduzir o número de componentes que resumam ao máximo a variação dos preditores, de forma que se tenha a máxima correlação com a resposta, ou seja, é um procedimento supervisionado de redução de dimensões, e quanto menor o número de variáveis latentes, melhor o ajuste do modelo (KUHN; JOHNSON, 2013).

O número de variáveis latentes utilizado na construção dos modelos foi entre 3 e 10 na abordagem 1, e entre 3 e 8 na abordagem 2, valores comumente encontrados por outros autores (ZHOU et al., 2016; BALDIN et al., 2020 e SOUSA et al., 2011).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo de predição é o que indica a proporção da variação explicada pelo modelo de calibração (MILAGRES, 2013). Esses coeficientes numéricos expressam a relação entre todos os preditores a uma determinada resposta para qualquer número de componentes (FUJIMOTO et al., 2008). Na seleção de um modelo, o  $R^2$  é acompanhado do erro embutido no modelo.

Os valores de  $R^2c$  foram acima de 0,70 em para todos os parâmetros nos dois modelos estudados. Os valores de  $R^2cv$  foram superiores no modelo 2 para todos os parâmetros, sendo o menor valor de  $R^2cv$  observado de 0,37 para teor de extrativos na abordagem 1 e o maior valor observado de 0,77 para rendimento depurado de polpa celulósica na abordagem 2.

Para a estimativa de DBM de cavacos, o modelo da abordagem 1 apresentou  $R^2$  de 0,95 e  $R^2cv$  de 0,60 com erros de 8,26 Kg.cm<sup>-3</sup> e 23,13 Kg.cm<sup>-3</sup> e o modelo da abordagem 2 apresentou um  $R^2$  de 0,81 e  $R^2cv$  de 0,73 com erros entre 20,90 e 25,49 Kg.cm<sup>-3</sup>. Estes valores estão dentro do ranque de valores encontrados por Viana et al. (2010), que obtiveram  $R^2cv$  variando de 0,56 a 0,97 para 6 clones de *Eucalyptus spp.* desenvolvidos em quatro diferentes regiões.

Já em estudo desenvolvido por Sousa et al. (2011), o modelo obtido para *Eucalyptus spp.* resultou em  $R^2$  de predição acima de 0,88, valor este superior aos obtidos neste estudo. Em estudo desenvolvido por Estopa et al. (2017), foram encontrados para *E. benthamii* aos 4 anos um  $R^2cv$  abaixo dos observados (0,33) mas com um RMSEcv próximos aos erros encontrados neste trabalho, de 0,027 g.cm<sup>-3</sup>.

Neste caso, ambas as abordagens possuem uma correlação positiva e capacidade de predição da DBM de cavacos. Mesmo que a abordagem 1 apresente um erro menor os valores dos erros das duas abordagens estão bem próximos, e o modelo da abordagem 2 possui um coeficiente de determinação maior, e deve, portanto, ser preferencialmente o modelo utilizado para a predição deste parâmetro.

Para o teor de extrativos, o valor de  $R^2cv$  (0,37 e 0,65 abordagem 1 e abordagem 2, respectivamente) e RMSEcv (0,81% e 0,70%, abordagem 1 e abordagem 2, respectivamente) indicam uma predição com menor eficiência que os modelos de Zhou et al. (2016), Estopa et al. (2017) e Sousa et al. (2011), que apresentam  $R^2cv$  de 0,85; 0,80; e 0,89; respectivamente e ficam próximos do valor de  $R^2cv$  encontrado por Baldin et al. (2020) de 0,62. Já para teor de lignina total, os valores obtidos por estes mesmos autores são de 0,87 (RMSEcv de 0,56%); 0,71 (RMSEcv de 0,59%); 0,85 (RMSEcv de 1,23%) e 0,74 (RMSEcv de 0,74%) respectivamente, valores próximos aos observados neste trabalho ( $R^2cv$  0,53 e RMSEcv de 0,79%).

Após a comparação com os resultados obtidos por outros autores conclui-se que apesar de apresentar um RMSEcv menor que 1%, o modelo da abordagem 1

não apresenta correlação para a predição e ranqueamento na seleção genética do teor de extrativos em amostras da madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora*. Neste caso, a melhor estratégia é alimentar este modelo maior número de amostras e variabilidade até que o coeficiente de determinação atinja valores suficientes para prever o teor de extrativos da madeira de amostras desse híbrido.

Apesar de apresentar valores similares de  $R^2_{cv}$  (0,56 e 0,53 respectivamente) e  $RMSE_{cv}$  (0,67% e 0,79% respectivamente) entre a abordagem 1 e abordagem 2, os valores encontrados estão abaixo dos obtidos por Hodge et al. (2018) que apresentaram  $R^2_{cv}$  de 0,90; 0,76; 0,96; 0,72 e  $RMSE_{cv}$  de 0,97%, 0,54%, 0,61% e 1,13% para teor lignina total nas espécies de *E. dunnii* aos 4 anos de idade, *E. urophylla* entre 4 e 13 anos de idade, *E. globulus* e *E. nitens* entre 8 e 25 anos e *E. grandis* aos 6 anos de idade. Estes mesmos autores encontraram para as espécies acima listadas respectivamente valores de  $R^2_{cv}$  de 0,90; 0,46; 0,86 e 0,87 e  $RMSE_{cv}$  0,21; 0,55; 0,52 e 0,19 para relação S/G.

Viana et al. (2010) encontraram para 6 clones de *Eucalyptus spp.* aos 3 anos de idade em 4 regiões, um intervalo de valores amplo para os mesmos parâmetros aqui estudados, apresentando  $R^2_{cv}$  para teor de lignina total entre 0,39 a 0,86,  $R^2_{cv}$  para teores de extrativos entre 0,10 a 0,85 e  $R^2_{cv}$  para relação S/G de 0,21 a 0,90, indicando que a construção dos modelos teve correlação com o local estudado.

Para relação S/G Diniz et al. (2019) encontraram valores de  $R^2_{cv}$  de 0,86 para *E. benthamii* e 0,77 para *E. pellita*, com erros de validação de 0,21 e 0,26 e  $RPD_{cv}$  de 1,75 e 1,65; respectivamente. Estes valores estão acima dos encontrados neste trabalho, com  $R^2_{cv}$  de 0,66 e  $RMSE_{cv}$  de 0,33 e  $RPD$  de 1,7. Os mesmos autores testaram ainda a construção de um modelo misto das duas espécies, validando individualmente para cada uma delas. Neste caso, para *E. benthamii*, o modelo puro dessa mesma espécie se mostrou mais adequado para a predição, enquanto para o *E. pellita*, o modelo conjunto (*E. benthamii* e *E. pellita*) prediz de forma mais assertiva o parâmetro relação S/G.

As duas abordagens apresentam modelos com correlação positiva e erros abaixo de 1% para predição do teor de lignina total. O modelo da abordagem 1 apresentou um  $R^2_{cv}$  maior e  $RMSE_{cv}$  menor que o modelo da abordagem 2, sendo indicado como preferencial para a predição desse parâmetro em amostras de CTOxCCT. Para a relação S/G, os modelos das duas abordagens são

adequados para uso na predição, porém o modelo da abordagem 2 apresentou um maior  $R^2_{cv}$  e RPD, sendo, portanto, o modelo preferencial.

A calibração do modelo de rendimento depurado de polpa celulósica apresentou o maior valor obtido entre os modelos para  $R^2_{cv}$  de 0,77 e RMSE<sub>cv</sub> de 1,98% na abordagem 2, e um  $R^2_{cv}$  de 0,52 e RMSE<sub>cv</sub> de 2,94% na abordagem 1. Neste caso, o modelo da abordagem 2 obtido neste trabalho apresenta uma melhor capacidade de predição desse parâmetro, com maior coeficiente de determinação e menor erro. Os valores do modelo da abordagem 2 estão bem próximos aos obtidos por Milagres (2013) com um  $R^2$  e erro de predição de 0,75 e 1,02%, respectivamente, e os modelos das duas abordagens estão abaixo do valor de  $R^2$  de predição de 0,88 encontrado por Santos et al. (2009).

Sousa et al. (2011), mostram que o número de amostras nem sempre é uma vantagem na construção de um modelo de espectroscopia NIR, uma vez que estes autores não observaram diferenças significativas na construção de modelos para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus spp* com números de 3369, 1000, 500 e 200 amostras aos 7 anos de idade. Com a seleção das amostras utilizando o algoritmo de Kennard-Stone, estes autores exploraram o potencial de seleção e reduziram o número de variáveis latentes de 9, no modelo com 3369 amostras, para 5, no modelo com 200 amostras, o que indica que é preferível variabilidade ao tamanho amostral.

Milagres et al. (2013) selecionaram em seu trabalho diferenças espectrais entre as idades pela análise de componentes principais e incrementaram a variabilidade, conseqüentemente aumentaram a precisão do modelo com o uso dessas amostras selecionadas. Segundo estes mesmos autores, a incorporação de amostras de várias idades permitiu o desenvolvimento de um modelo com capacidade de predição de amostras com diferentes idades.

A tecnologia de espectroscopia NIR é uma ferramenta potencial para os programas de melhoramento de *E. dunnii* e para híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, uma vez que obtiveram  $R^2_{cv}$  maiores que 0,5 e baixos RMSE<sub>cv</sub> para todos os parâmetros, exceto para o rendimento depurado em polpa celulósica, pelo menos 1 das abordagens.

Apesar de apresentar em geral valores de  $R^2_{cv}$  menores do que o modelo da abordagem 2, o modelo da abordagem 1 possui potencial de predição e

ranqueamento de materiais genéticos em programas de melhoramento de *C. torelliana* x *C. citriodora*, para todos os parâmetros, exceto teor de extrativos para. Este modelo, construído com 25 amostras do híbrido CTOxCCT pode ser incrementado com um número maior de amostras, para aumentar sua capacidade de predição e redução de erros.

Modelos de predição de espectroscopia NIR adaptados para uma espécie permitem a avaliação precoce e não destrutiva de características físicas e químicas importantes da madeira para o processo de produção de celulose, de forma rápida e com baixo custo, auxiliando nos programas de melhoramento, resultando em uma maior assertividade da seleção por meio das propriedades tecnológicas da madeira, o que pode contribuir para a melhoria da qualidade da matéria-prima utilizada no processo industrial (Estopa et al., 2017).

Os resultados obtidos neste trabalho, possibilitam o uso de modelos de predição de espectroscopia NIR para seleção, com base na qualidade da madeira, de indivíduos de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. dunnii* a partir de 4 anos de idade, o que acelera o programa de melhoramento dessas espécies.

## 5. CONCLUSÃO

As amostras do híbrido de *Corymbia* estudadas apresentaram altas densidades básicas da madeira de cavacos, altos teores de extrativos e teores de lignina total similar, menor relação S/G e menor rendimento depurado de polpa celulósica quando comparados ao *E. dunnii*.

Os valores superiores e inferiores para os parâmetros estudados demonstram a possibilidade de seleção de materiais genéticos com maiores densidades básicas da madeira, relação S/G e rendimento depurado de polpa celulósica, e menores teores de extrativos e de lignina total para clones híbridos de *C. torelliana* x *C. citriodora*, e *E. dunnii*.

O modelo construído a partir de amostras do híbrido de *Corymbia* (Abordagem 1), tem capacidade de predição para os parâmetros de densidade básica da madeira de cavacos ( $R^2cv$  0,60), teor de lignina total ( $R^2cv$  0,56), relação S/G ( $R^2cv$  0,63) e rendimento depurado de polpa celulósica ( $R^2cv$  0,52) para amostras de madeira de *C. torelliana* x *C. citriodora* com idades a partir de 4 anos.

A escolha de construção de um modelo de predição de espectroscopia NIR com amostras de duas espécies em um intervalo de idades pode ter sido um fator de sucesso para a calibração dos modelos, pois todos os modelos compostos pelas duas espécies apresentaram  $R^2cv$  maior que 0,5. Isso indica uma boa capacidade de predição para os parâmetros de densidade básica da madeira de cavacos ( $R^2cv$  0,73), teor de extrativos ( $R^2cv$  0,65), teor de lignina total ( $R^2cv$  0,53), relação S/G ( $R^2cv$  0,66) e rendimento depurado de polpa celulósica ( $R^2cv$  0,77).

A técnica de espectroscopia NIR apresenta potencial para avaliação não destrutiva da qualidade da madeira de *E. dunnii* e *C. torelliana* x *C. citriodora*, sendo o modelo composto pelas duas espécies, aquele que apresentou melhores coeficientes de validação cruzada e menores erros para as propriedades avaliadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeiras de eucaliptos**. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 115 p., 2003.
- ASSIS, T. F. Melhoria genética de *Eucalyptus*: Desafios e perspectivas. **3º Encontro Brasileiro de Silvicultura**. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6 p., 2003.
- BAILLÉRES, 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. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 5-6, p. 479-490, 2002.
- BALDIN, T.; TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G.; SANTOS, G. A.; SANTOS, O. P.; VANETE, B. M. R. T. Modelos NIRS para as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 1-9, 2020.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **Série Divulgação PRODEPEF**, Brasília, n. 13, p. 1-145, 1976.
- BASSA, A. **Processo de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e híbridos (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus* basic density and retractibility of wood clones of three *Eucalyptus* species. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.
- CASEY, J. P. **Casey’s reports on paper and the paper industry**: report nº. 1 – chemical and mechanical pulping, New York: Marcel Dekker, 136 p., 1984.
- CIT, E. J. **Influência da mistura de fibras de *Eucalyptus dunnii* M. e *Pinus taeda* L. de processo “Kraft” nas propriedades do papel**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- CORREIA, P. R. M.; FERREIRA, M. M. C. Reconhecimento de padrões por métodos não supervisionados: explorando procedimentos quimiométricos para tratamento de dados analíticos. **Química Nova**, v. 30, p. 481-487, 2007.
- DEL RÍO, J. C.; GUTIÉRREZ, A.; RODRÍGUEZ, I. M.; IBARRA, D.; MARTINEZ, A. T. Composition of non-woody plant lignins and cinnamic acids by Py-GC/MS, Py/TMAH and FT-IR. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 79, p. 39–46, 2007.

DINIZ, C. P.; GRATTAPAGLIA, D.; MANSFIELD, S. D. AND DE ALENCAR FIGUEIREDO, L. F. Near-infrared-based models for lignin syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus benthamii* and *E. pellita* using a streamlined thioacidolysis procedure as the reference method. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 3, p. 521–533, 2019.

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, R. F.; OLIVEIRA, R. A.; HEIN, P. R. G. NIR spectroscopic models for phenotyping wood traits in Breeding programs of *Eucalyptus benthamii*. **CERNE**, v. 22, n. 3, p. 367-375, 2017.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *E. saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, Piracicaba, v. 10, n.1, p. 17-37, 1975.

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**, v. 16, n. 6, p. 529-537, 2008.

GOLFARI, L. Zoneamento Ecológico para Reflorestamento de Regiões Tropicais e Subtropicais. Serie Divulgação. Centro de Pesquisa Florestal das Regiões do Cerrado, **Série Divulgação PRODEPEF**, n. 14, Belo Horizonte, 1978.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood". **Holzforschung**, v. 64, n. 1, p. 45-54, 2010.

HODGE, G. R.; ACOSTA, J. J.; UNDA, F.; WOODBRIDGE, W. C.; MANSFIELD, S. D. Global near infrared spectroscopy models to predict wood chemical properties of *Eucalyptus*. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 26, n. 2, 2018.

IBÁ, Instituto Brasileiro de Árvores. **Relatório Ibá 2021**. Brasília: IBÁ, 2021.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S.; HERNANDEZ, J. A. **Polpa e Papel**. Manual didático Polpa e Papel, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KUHN, M; JOHNSON, J. **Applied Predictive Modeling**. Springer, 600 p., 2013.

LI, Y.; ALTANER, M.; Effects of variable selection and processing of NIR and ATR-IR spectra on the prediction of extractive content in *Eucalyptus bosistoana* heartwood, **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 213, p. 111-117, 2019.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer Verlag, 1992. 578 p

MEDEIROS, B. L. M. A.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; RIBEIRO, M. X.; LISBOA, F. J. N.; GUIMARÃES, I. L.; PROTÁSIO, T. P. Avaliação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivadas no Piauí. **Nativa Sinop**, v.4, n.6, p. 403-407, 2016.

MEZZOMO, L. X. **Potencialidade de *Eucalyptus cloeziana* S. Muell, *E. citriodora* Hook, *E. urophylla* St Blake e *E. urophylla* x *E. grandis*, cultivados na Bahia, para a produção de celulose solúvel.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 99 p., 1996.

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

MILAGRES, F. R. **Espectroscopia de infravermelho próximo para predição de propriedades da madeira de híbridos de *Eucalyptus spp.*** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 83 p., 2013.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 401–413, 2008.

MORA, C. R. Schimleck, L. R. On the selection of samples for multivariate regression analysis: application to near-infrared (NIR) calibration models for the prediction of pulp yield in *Eucalyptus nitens*. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 38, n. 10, p. 2626-2634, 2008.

MORAIS, P. H. D.; LONGUE JUNIOR, D.; COLODETTE, J. L.; MORAIS, E. H. C.; JARDIM, C. M. Influence of clone harvesting age of *Eucalyptus grandis* and hybrids of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* in the wood chemical composition and in kraft pulpability. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 237-248. 2017.

NAES, T.; ISAKSSON, T.; FEARN, T.; DAVIES, T. **Multivariate Calibration and Classification.** NIR Publications: Chichester, 2002.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; REZENDE, M. A.; ABREU, H. S. Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Englm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 11, n.1, p. 01-06, 2004.

PASQUINI, C.; CARNEIRO, J. G. C.; BOMFIM, P. M. Development and validation of multivariate model employing Near Infrared Spectroscopy for *Eucalyptus* wood characteristics estimations. **O Papel**, v. 68, p. 3, 2007.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.14, n.2, p.198-219, 2003.

PEREIRA, A. K. S.; LOUNGUE JUNIOR, D.; NETO, C. S. M.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. Determinação da composição química e potencial de polpação da

madeira *Pterogyne nitens* Tul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 1490-1500, 2019.

PEREIRA, J. C. D.; HIGA, A. R.; SHIMIZU, J. Y.; HIGA, R. C. V. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Eucalyptus dunnii* Maiden, para fins energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 13, p. 9-16, 1986.

PEREYRA, O. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis compensados**. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa *kraft* de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004.

RAMADEVI P.; HEGDE D. V.; VARGHESE, M.; KAMALAKANNAN, R; GANAPATHY, S. P.; GURUMURTHY, D. S. Evaluation of lignin syringyl/guaiacyl ratio in *Eucalyptus camaldulensis* across three diverse sites based on near infrared spectroscopic calibration modelling with five *Eucalyptus* species and its impact on *kraft* pulp yield. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, vol. 24, n. 6, p. 529-536, 2016.

RAMALHO, F. M.; ANDRADE, J. M.; HEIN, P. R. Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. *Forest systems*, v. 27, n. 2, p. 4, 2018.

RUY, O. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; FERREIRA, M. Qualidade da madeira de grupos fenotípicos de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 21-27, 2001

RUY, O. F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 69 p., 1998.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e de carvão vegetal de clones de eucalipto**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 173 p., 2010.

SANTOS, R. B.; GOMIDE, J. L.; SOUSA, L. C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 759-767, 2009.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures. **Anal Chem**, v. 36, p. 1627-1639, 1964.

SEGURA, T. E. S.; SILVA JUNIOR, F. G. Potential of *C. citriodora* wood species for *kraft* pulp production. **Tappi Journal**, v. 15, n. 3, p. 159-164, 2016.

SEGURA T.E.S. **Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para a produção de celulose *kraft* pelos processos**

**convencionais de Lo-Solids®**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2012.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C.; MALTHA, C. R.; FIDÊNCIO, P. H.; CRUZ, M. P.; VELOSO, D. P.; MILANEZ, A. F. Effect of storage time on the composition and content of wood extractives in *Eucalyptus* cultivated in Brazil. **Bioresour Technol**, v. 99, n. 11, p. 4878-4886, 2008.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HOFER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

SOUSA, L. C.; GOMIDE, J. L.; MILAGRES, F. R.; ALMEIDA, D. P. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRS para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus spp*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 591-599, 2011.

SOUZA, G. B.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B.; CARVALHO, D. M. Enhancement of eucalypt pulp yield through extended impregnation cooking. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 33, n. 2, p. 175-185, 2018.

TAPPI. Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. T - T204 cm-17. Tappi Test methods. Atlanta: **TAPPI Press**, 2017.

TAPPI. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. T - 222 om-97. Tappi Test methods. Atlanta: **TAPPI Press**, 1997.

TAPPI. Acid-soluble lignin in wood and pulp. T - UM 250. Tappi Test methods. Atlanta: **TAPPI Press**, 1991.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VALENTE, B. M. R. T. **Avaliação de clones híbridos de *Corymbia* para crescimento, qualidade da madeira e carvão vegetal na região do rio doce**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

VIANA, L. C.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. M.; LIMA, J. T. Calibration models and near infrared spectroscopy for predicting chemical properties and wood basic density in *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 367-376, 2010.

ZHOU, C.; JIANG, W.; VIA, B. K.; CHETTY, P. M. SWAIN, T. Monitoring the chemistry and monosaccharide ratio of *Eucalyptus dunnii* wood by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 24, p. 537-548, 2016.

ZVINAKEVICIUS, C.; FOELKEL, C. E. B.; KATO, J. *Eucalyptus grandis* com 5 anos: matéria prima para a indústria de celulose. **4º Congresso Florestal Brasileiro**, 13 p., 1982.

WENG, J. K.; CHAPPLE, C. The origin and evolution of lignin biosynthesis. **New Phytol**, v. 87, p. 273–285, 2010.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos nessa pesquisa é possível identificar a potencialidade de uso em plantios comerciais de espécies do gênero *Corymbia*, porém, estudos e esforços para aumentar seu grau de melhoramento devem ser realizados, da mesma forma que a manutenção da variabilidade genética nas populações de espécies de *Corymbia*, é essencial para longevidade dos programas de melhoramento

Assim como a seleção genética precoce com base no caráter volume individual se mostrou adequada, a seleção precoce com base nas características de qualidade da madeira visando o processo de polpa celulósica também se mostra com grande potencial com a utilização de modelos de espectroscopia NIR. Dessa forma, a partir dos 4 anos de idade é possível obter a seleção tanto para crescimento, quanto para a qualidade da madeira dessas espécies, aumentando a assertividade na seleção para este uso da madeira.

O modelo de espectroscopia NIR construído apenas com híbridos de *Corymbia*, apresentou uma boa predição, apesar do número de amostras utilizados em sua calibração, porém, quando em conjunto com o *Eucalyptus dunnii*, espécie também conhecida por ter uma densidade básica da madeira quando comparado com a maioria das espécies de uso tradicional de *Eucalyptus*, o modelo apresentou boas predições. Essa é uma alternativa na construção de modelos para predição de espécies de *Corymbia*.

Os próximos passos deste trabalho, são a seleção entre e dentro de famílias dos testes de progênies de *Corymbia*, e uso de genitores promissores para a promoção de cruzamentos híbridos intraespecíficos, a incrementação do modelo de espectroscopia NIR de híbridos de *Corymbia*, e a validação externa dos dois modelos, a inclusão ao longo do tempo com novas amostras, para aumentar ainda mais suas capacidades de predição.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

ALFENAS, A.C.; ZAURA, E.A.V.; MAFIA, R.G.; ASSIS, T.F. **Clonagem e Doenças do Eucalipto**. Viçosa: Editora UFV, 2004. 422 p.

ALMEIDA, F.S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeiras de eucaliptos**. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 115 p., 2003.

ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: Desafios e perspectivas. **3º Encontro Brasileiro de Silvicultura**. 2014.

ASSIS, T. F. Hybrids and mini-cutting: a powerful combination that has revolutionized the *Eucalyptus* clonal forestry. **In: BMC Proceedings**. BioMed Central, p. 118, 2011.

ASSIS, T. F. Production and use of *Eucalyptus* hybrids for industrial purposes. **In: QFRI/CRC-SPF SYMPOSIUM**. Noosa - Queensland. Hybrid breeding and genetics of forest trees: Proceedings. Brisbane: Department of Primary Industries, p. 63-75, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 6 p., 2003.

BAILLÉRES, H.; DAVRIEUX, F.; HAM-PICHAVANT, F. Near infrared analysis as tool for rapid screening of some major wood characteristics in a *Eucalyptus* breeding program. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 5-6, p. 479-490, 2002.

BALDIN, T.; TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G.; SANTOS, G. A.; SANTOS, O. P.; VANETE, B. M. R. T. Modelos NIRS para as características químicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 12, p. 1-9, 2020.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **Série Divulgação PRODEPEF**, Brasília, n. 13, p. 1-145, 1976.

BARONI, G. R. **Crescimento inicial e parâmetros genéticos de populações para melhoramento de *Corymbia spp.* e *Eucalyptus pilularis* Smith**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP. Botucatu, 2018.

BASSA, A. **Processo de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e híbridos (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S.; Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v.67, p. 1–48. 2015.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus* basic density and retractibility of wood clones of three *Eucalyptus* species. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BELTRAME, R.; BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; SANTOS, G. A. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 47, n. 6, 2012.

CASEY, J. P. **Casey's reports on paper and the paper industry**: report n<sup>o</sup>. 1 – chemical and machanical pulping, New York: Marcel Dekker, 136 p., 1984.

CIT, E. J. **Influência da mistura de fibras de *Eucalyptus dunnii* M. e *Pinus taeda* L. de processo “Kraft” nas propriedades do papel**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CORNELIUS, J. Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v.24, p. 372-379, 1994.

CORREIA, P. R. M.; FERREIRA, M. M. C. Reconhecimento de padrões por métodos não supervisionados: explorando procedimentos quimiométricos para tratamento de dados analíticos. **Química Nova**, v. 30, p. 481-487, 2007.

COVARRUBIAS-PAZARAN, G., Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. **PLoS One** v.11, p. 156-744, 2016.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Modelos biométricos aplicadas ao melhoramento genético. 3<sup>a</sup> ed. Viçosa, UFV, v.1, 480 p., 2014.

DEL RÍO, J. C.; GUTIÉRREZ, A.; RODRÍGUEZ, I. M.; IBARRA, D.; MARTINEZ, A. T. Composition of non-woody plant lignins and cinnamic acids by Py-GC/MS, Py/TMAH and FT-IR. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 79, p. 39–46, 2007.

DINIZ, C. P., GRATTAPAGLIA, D., MANSFIELD, S. D. AND DE ALENCAR FIGUEIREDO, L. F. Near-infrared-based models for lignin syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus benthamii* and *E. pellita* using a streamlined thioacidolysis procedure as the reference method. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 3, p. 521–533, 2019.

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, R. F.; OLIVEIRA, R. A.; HEIN, P. R. G. NIR spectroscopic models for phenotyping wood traits in Breeding programs of *Eucalyptus benthamii*. **CERNE**, v. 22, n. 3, p. 367-375, 2017.

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, R. F.; GOMES, F. J. B.; AMARAL, C. A. S. Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia NIR. **O Papel**, v.78, p.75, 2017.

FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M.; REIS JUNIOR, F. B.; Biotecnologia: estado da arte e aplicações na agropecuária. Planaltina: **Embrapa Cerrados**. 2011.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *E. saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, Piracicaba, v. 10, n.1, p. 17-37, 1975.

FONSECA, S. M.; RESENDE, M. D. V. de; ALFENAS, A. C.; GUIMARÃES, L. M. S.; ASSIS, T. F.; GRATTAPAGLIA, D. **Manual prático de melhoramento genético do eucalipto**. Viçosa, MG: UFV, 2010. v. 1. 200 p.

FREITAS, R. G.; VASCONCELOS, E. S.; CRUZ, C. D.; ROSADO, A. M.; ROCHA, R. B.; TAKAMI, L. K. Predição de ganhos genéticos em progênies de polinização aberta de *Eucalyptus urograndis* cultivadas em diferentes ambientes e submetidas a diferentes procedimentos de seleção. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 25–263, 2009.

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**, v. 16, n. 6, p. 529-537, 2008.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (EdS). **Lignins**. New York: Wiley-Interscience, p. 241-266, 1971.

GOLFARI, L. Zoneamento Ecológico para Reflorestamento de Regiões Tropicais e Subtropicais. Serie Divulgação. Centro de Pesquisa Florestal das Regiões do Cerrado, **Série Divulgação PRODEPEF**, n. 14, Belo Horizonte, 1978.

GONÇALVES, P. S.; BORTOLETTO, N.; FONSECA, F. S.; BATAGLIA, O. C.; ORTOLANI, A. A. Early selection for growth vigor in rubber tree genotypes in northwestern São Paulo State (Brazil). **Genetics and Molecular Biology**, v. 21, n. 4, p. 620-630, 1998.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOUDET, J. Fstat. (Version 2.9.3.2.): A computer program to calculate F-statistics. **J. Heredity**, n.86, p. 485–486, 1995.

GOUDET, J. Fstat (Version 2.9.4), **A program to estimate and test population genetics parameters**. 2003. Disponível em <http://www.t-de-meeus.fr/Programs/Fstat294.zip> (Atualização de Goudet (1995))

HARDY, O. J.; VEKEMANS, X. SPAGeDI: a versatile computer program to analyze spatial genetic structure at the individual or population levels. **Molecular Ecology Notes**, vol. 2, p. 618-620, 2002.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood". **Holzforschung**, v. 64, n. 1, p. 45-54, 2010.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**. v. 6, p. 185-504, 1995.

HODGE, G. R.; ACOSTA, J. J.; UNDA, F.; WOODBRIDGE, W. C.; MANSFIELD, S. D. Global near infrared spectroscopy models to predict wood chemical properties of Eucalyptus. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 26, n. 2, 2018.

IBÁ - Instituto Brasileiro de Árvores. **Relatório IBÁ 2021**. Brasília: IBÁ, 2021.

KALINOWSKI, S. T., TAPER, M. L.; MARSHALL, T. C. Revising how computer program Cervus accommodates genotyping error increase success in paternity assignment. **Molecular Ecology Notes**, v.16, p. 1099–1106, 2007.

KAGEYAMA, P. Y.; VENCOVSKY, R. Variação genética em progênes de uma população de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. **IPEF**, Piracicaba, v. 24, p. 9-26, 1983.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S.; HERNANDEZ, J. A. **Polpa e Papel**. Manual didático Polpa e Papel, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KÖPPEN, W. Das geographische system der climate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (eds.): **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, v.1, p. 1–44. 1936.

KUHN, M; JOHNSON, J. **Applied Predictive Modeling**. Springer, 600 p., 2013.

LEE, D. J.; HUTH, J. R.; BRAWNER, J.; DICKINSON, G. R. Comparative performance of *Corymbia* hybrids and parental species in subtropical Queensland and implications for breeding and deployment. **Silvae Genetica**, v. 58, p. 205–212. 2009.

LEE, D. J. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand. 2: development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. **Australian Forestry Journal**, v. 70, n. 1, p. 11–16, 2007.

LEE, D. J.; NIKLES, G.; POMROY, P.; BRAWNER, J.; WALLACE, H.; STOKOE, R. *Corymbia* species and hybrids: a solution to Queensland hardwood plantations? In: CORYMBIA RESEARCH MEETING: Underpinning development of a profitable hardwood plantation industry in northern Australia by research into *Corymbia* species and hybrids, **Gympie**. Proceedings. Queensland. p. 5-7, 2005.

LI, Y.; ALTANER, M.; Effects of variable selection and processing of NIR and ATR-IR spectra on the prediction of extractive content in *Eucalyptus bosistoana* heartwood, **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 213, p. 111-117, 2019.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer Verlag, 1992. 578 p

LYNCH, M.; WALSH, B. Genetics and analysis of quantitative traits. Massachusetts: **Sinauer Associates**, Inc, 980 p., 1998.

MARSHALL, T. C.; SLATE, J.; KRUIK, L. E. B.; PEMBERTON, J. M. Statistical confidence for likelihood-based paternity inference in natural populations. **Molecular Ecology**, v.7, p. 639-655, 1998.

MASSARO, R. A. M.; BONINE, C. A. V.; SCARPINATI, E. A.; PAULA, R. C. Viabilidade de aplicação da seleção precoce em testes clonais de *Eucalyptus spp.* **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4. p. 597- 609, 2010.

MEDEIROS, B. L. M. A; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; RIBEIRO, M. X.; LISBOA, F. J. N.; GUIMARÃES, I. L.; PROTÁSIO, T. P. Avaliação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivadas no Piauí. **Nativa Sinop**, v.4, n.6, p. 403-407, 2016.

MEZZOMO, L. X. **Potencialidade de *Eucalyptus cloeziana* S. Muell, *E. citriodora* Hook, *E. urophylla* St Blake e *E. urophylla* x *E. grandis*, cultivados na Bahia, para a produção de celulose solúvel.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 99 p., 1996.

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

MILAGRES, F. R. **Espectroscopia de infravermelho próximo para predição de propriedades da madeira de híbridos de *Eucalyptus spp.*** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 83 p., 2013.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 401–413, 2008.

MORA, C. R. Schimleck, L. R. On the selection of samples for multivariate regression analysis: application to near-infrared (NIR) calibration models for the prediction of pulp yield in *Eucalyptus nitens*. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 38, n. 10, p. 2626-2634, 2008.

MORAIS, P. H. D.; LONGUE JUNIOR, D.; COLODETTE, J. L.; MORAIS, E. H. C.; JARDIM, C. M. Influence of clone harvesting age of *Eucalyptus grandis* and hybrids of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* in the wood chemical composition and in kraft pulpability. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 237-248. 2017.

MORAIS, E., ZANATTO, A. C. S., MORAES, M. L. T., FREITAS, M. L. M.; SEBBENN, A. M. Comportamento e variação de procedências de *Corymbia citriodora* em diferentes tipos de solos. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 277- 286, 2011.

MORAES C. B.; CARVALHO, E. V.; ZIMBACK, L.; LUZ, O. S. L.; PIERONI, G. B.; MORI, E. S.; LEAL, T. C. A. B. Variabilidade genética em progênies de meios-irmãos de eucaliptos para tolerância ao frio. **Revista Árvore**. v. 39, n. 6, p. 1047-1054, 2015.

MORAES, C. B.; BRIZOLLA, T. F.; TEIXEIRA, L. G.; ZIMBACK, L.; TAMBARUSSI, E. V.; CHAVES, R.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativas dos parâmetros genéticos para seleção de árvores de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. v. 42, n. 104, p. 623-629, 2014.

MOURA, V. P. G. Potencial e uso de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* de acordo com locais e usos. Brasília, DF: **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia**, 32 p., 2001.

NAMKOONG, G.; KANG, H. C.; BROUARD, J. S. **Tree breeding: principles and strategies**. New York, NY, USA: Springer Verlag, 1988.

NAES, T.; ISAKSSON, T.; FEARN, T.; DAVIES, T. **Multivariate Calibration and Classification**. NIR Publications: Chichester, 2002.

PAIVA, J. R., & VALOIS, A. C. C. Espécies selvagens e sua utilização no melhoramento. In NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (Eds.). **Recursos genéticos e melhoramento: plantas**, p. 79-99. Rondonópolis: Fundação MT., 2001.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; REZENDE, M. A.; ABREU, H. S. Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Englm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 11, n.1, p. 01-06, 2004.

PALUDETO, J. G. Z.; BUSH, D.; ESTOPA, R. A.; TAMBARUSSI, E. V. Genetic control of diameter and bark percentage in spotted gum (*Corymbia* spp.): can we breed eucalypts with more wood and less bark? **Southern Forests: a Journal of Forest Science**. v. 82, p. 22-35, 2020.

PALUDETO, J. G. Z., PEREK, M., MUNHOZ, L. V., SANTOS, J. R. M., PESCK, V. A., & TAMBARUSSI, E. V. Variabilidade genética em população base de *Eucalyptus viminalis* em idade juvenil. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, e.3081, 2020.

PASQUINI, C.; CARNEIRO, J. G. C.; BOMFIM, P. M. Development and validation of multivariate model employing Near Infrared Spectroscopy for *Eucalyptus* wood characteristics estimations. **O Papel**, v. 68, p. 3, 2007.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.14, n.2, p.198-219, 2003.

PEREIRA, A. K. S.; LOUNGUE JUNIOR, D.; NETO, C. S. M.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. Determinação da composição química e potencial de polpação da madeira *Pterogyne nitens* Tul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 1490-1500, 2019.

PEREIRA, J. C. D.; HIGA, A. R.; SHIMIZU, J. Y.; HIGA, R. C. V. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Eucalyptus dunnii* Maiden, para fins energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 13, p. 9-16, 1986.

PEREIRA, A. B.; MARQUES JR, O. G.; RAMALHO, M. A. P.; ALTHOFF, P. Eficiência da seleção precoce em famílias de meios-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. avaliadas na região noroeste do estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 67-81, 1997.

PEREYRA, O. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis compensados**. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

PINTO, D. S.; RESENDE, R. T.; MESQUITA, A. G. G.; ROSADO, A. M.; CRUZ, C. D. Seleção precoce para características de crescimento em testes clonais de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v.42, p.251-257, 2014.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa *kraft* de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004.

R CORE TEAM., **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.

RAMADEVI P.; HEGDE D. V.; VARGHESE, M.; KAMALAKANNAN, R; GANAPATHY, S. P.; GURUMURTHY, D. S. Evaluation of lignin syringyl/guaiacyl ratio in *Eucalyptus camaldulensis* across three diverse sites based on near infrared spectroscopic calibration modelling with five *Eucalyptus* species and its impact on *kraft* pulp yield. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, vol. 24, n. 6, p. 529-536, 2016.

RAMALHO, F. M.; ANDRADE, J. M.; HEIN, P. R. Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. *Forest systems*, v. 27, n. 2, p. 4, 2018.

RITLAND, K; JAIN, S. A model for the estimation of outcrossing rate and gene frequencies using independent loci. **Heredity**, v. 47, p. 35-52, 1981.

RITLAND, K. Correlated matings in the partial selfer *Mimulus guttatus*. **Evolution**, v. 43, p. 848-859, 1989.

RITLAND K. Extensions of models for the estimation of mating systems using n independent loci. **Heredity**, v. 88, p.221-228, 2002.

REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia torelliana*: Estado da Arte de Pesquisas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2014.

REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia citriodora*: Estado da Arte de Pesquisas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 32 p., 2013.

RESENDE, M. D. V. Delineamento de experimentos de seleção para a maximização da acurácia seletiva e progresso genético. **Revista Árvore**, v. 19, n. 4, p. 479-500, 1995.

RESENDE, M. D. V. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: **Embrapa Florestas**. 975 p., 2002a.

RESENDE, M. D. V. DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.182-194, 2007.

RESENDE, M. D. V. de. Software SELEGEN-REML/BLUP: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: **Embrapa Florestas**, 359 p. 2007b.

RESENDE, M. D. V. Genética quantitativa e de populações. Viçosa- MG: **Suprema**. 463 p., 2015.

RUY, O. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; FERREIRA, M. Qualidade da madeira de grupos fenotípicos de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 21-27, 2001

RUY, O. F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 69 p., 1998.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e de carvão vegetal de clones de eucalipto**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 173 p., 2010.

SANTOS, R. B.; GOMIDE, J. L.; SOUSA, L. C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 759-767, 2009.

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

SCHUMACHER, M. V. **Aspectos da ciclagem de nutrientes e do microclima em talhões de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. grandis* e *E. torelliana***. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Piracicaba. 87 p., 1992.

SEBBENN, A. M.; SIQUEIRA, A. C. M.; KAGEYAMA, P. Y.; DIO JUNIOR, O. J. Variação genética entre e dentro de populações de amendoim – *Pterogyne nitens*. **Scientia Forestalis**, n. 56, p. 29-40, 1999.

SEBBENN, A. M.; SEOANE, C. E. S. Estimativa de tamanho efetivo de endogamia usando marcadores genéticos. **Revista Árvore**, v.29, n.1, p.1-7, 2005.

SEGURA, T. E. S.; SILVA JUNIOR, F. G. Potential of *C. citriodora* wood species for kraft pulp production. **Tappi Journal**, v. 15, n. 3, p. 159-164, 2016.

SEGURA T.E.S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando a produção de celulose Kraft branqueada.** Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz'. Piracicaba. 2015.

SEGURA T.E.S. **Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para a produção de celulose kraft pelos processos convencionais de Lo-Solids®.** Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2012.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C.; MALTHA, C. R.; FIDÊNCIO, P. H.; CRUZ, M. P.; VELOSO, D. P.; MILANEZ, A. F. Effect of storage time on the composition and content of wood extractives in Eucalyptus cultivated in Brazil. **Bioresour Technol**, v. 99, n. 11, p. 4878-4886, 2008.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HOFER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

SOUSA, L. C.; GOMIDE, J. L.; MILAGRES, F. R.; ALMEIDA, D. P. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRS para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus spp.* **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 591-599, 2011.

SOUZA, G. B.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B.; CARVALHO, D. M. Enhancement of eucalypt pulp yield through extended impregnation cooking. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 33, n. 2, p. 175-185, 2018.

TAMBARUSSI, E. V.; PEREIRA, F. B.; DA SILVA, P. H. M.; LEE, D.; BUSH, D. Are tree breeders properly predicting genetic gain? A case study involving *Corymbia* species. **EUPHYTICA**, v. 214, p. 1-11, 2018.

TAPPI. Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. T - T204 cm-17. Tappi Test methods. Atlanta: **TAPPI Press**, 2017.

TAPPI. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. T - 222 om-97. Tappi Test methods. Atlanta: **TAPPI Press**, 1997.

TAPPI. Acid-soluble lignin in wood and pulp. T - UM 250. Tappi Test methods. Atlanta: **TAPPI Press**, 1991.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. **Tappi T280 pm-99 standard - Acetone extractives of wood and pulp.** USA: TAPPI Press, 2000.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VALENTE, B. M. R. T. **Avaliação de clones híbridos de *Corymbia* para crescimento, qualidade da madeira e carvão vegetal na região do rio doce**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

VENCOVSKY, R. Genética quantitativa. In: KERR, W. E. (Org). Melhoramento e genética. São Paulo: **Melhoramento**, p.17-38, 1969.

VENCOVSKY, R. Herança quantitativa. In: PATERNIANI, E.; VIEGAS, G. P. Melhoramento e produção do milho. 2 ed. Campinas: **Fundação Cargill**, 1987.

VENCOVSKY, R. BARRIGA, P. Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: **Sociedade Brasileira de Genética**, 406 p., 1992.

VIANA, L. C.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. M.; LIMA, J. T. Calibration models and near infrared spectroscopy for predicting chemical properties and wood basic density in *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 367-376, 2010.

ZHOU, C.; JIANG, W.; VIA, B. K.; CHETTY, P. M. SWAIN, T. Monitoring the chemistry and monosaccharide ratio of *Eucalyptus dunnii* wood by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 24, p. 537–548, 2016.

ZIEGLER, A. C. F.; TAMBARUSSI, E. V. Classifying coefficients of genetic variation and heritability for *Eucalyptus* spp. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.22, p. e40372222, 2022.

ZOBEL, B.; TALBERT, J. **Applied forest tree improvement**. New York: John Wiley, 505p. 1984.

ZVINAKEVICIUS, C.; FOELKEL, C. E. B.; KATO, J. *Eucalyptus grandis* com 5 anos: matéria prima para a indústria de celulose. **4º Congresso Florestal Brasileiro**, 13 p., 1982.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGHT, P.J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to Kraft pulp yields. **Appita Journal**, v.49, n.6, p.427-432, 1996.

WENG, J. K.; CHAPPLE, C. The origin and evolution of lignin biosynthesis. **New Phytol**, v. 87, p. 273–285, 2010.