



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

SOFIA MARIA GONÇALVES ROCHA

**QUALIDADE DA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia torelliana* e
Corymbia citriodora PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO**

JERÔNIMO MONTEIRO –ES

2022

SOFIA MARIA GONÇALVES ROCHA

**QUALIDADE DA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia torelliana* e
Corymbia citriodora PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre

Coorientadores: Ananias Francisco Dias Júnior e Rafael Sartim

JERÔNIMO MONTEIRO –ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

R672q Rocha, Sofia Maria Gonçalves, 1992-
QUALIDADE DA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS
DE *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* PARA
PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO / Sofia
Maria Gonçalves Rocha. - 2022.
87 f. : il.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientadores: Ananias Francisco Dias Júnior, Rafael
Sartim.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Florestas energéticas. 2. Características do lenho. 3.
Classificação de clones. 4. *Corymbia*. 5. *Eucalyptus*. 6. Madeira.
I. Vidaurre, Graziela Baptista. II. Dias Júnior, Ananias |
Francisco. III. Sartim, Rafael. IV. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V.
Título.

CDU: 630*38

**QUALIDADE DA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia torelliana* e
Corymbia citriodora PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE USO
SIDERÚRGICO**

Sofia Maria Gonçalves Rocha

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2022.

Dra. Brígida Maria dos Reis Teixeira Valente (Examinadora externa)
Eldorado Brasil

Dr. Charles de Abreu Martins (Examinador externo)
ArcerleMittal

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio (Examinador externo)
Universidade Federal Rural da Amazônia

Prof. Dr. Antônio José Vinha Zanuncio (Examinador externo)
Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Graziela Baptista Vidaurre (Orientadora)
Universidade Federal do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

Às três grandes mulheres da minha vida, fontes de inspiração e amor: minha mãe Maria Aparecida Gonçalves Rocha, minha avó Romana Antunes Rocha e minha tia Beatriz Antunes da Costa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos os envolvidos na construção deste trabalho, da profissional e ser humano que se formaram durante este período.

A Deus pela vida, saúde e bênção. É impossível não reconhecer o seu toque nos mínimos detalhes.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e a Pós-graduação em Ciências Florestais da UFES pela infraestrutura disponibilizada. À FAPES e ArcelorMittal pelo auxílio financeiro, que permitiram meu custeio e a condução desta pesquisa.

À ArcelorMittal por incentivar e apoiar a ciência e, me confiar o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Núcleo de Pesquisa em Qualidade da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade de crescimento e formação.

À minha orientadora e parceira Prof^ª. Dr^ª. Graziela Vidaurre pelos momentos valiosos e incentivo constante a aceitar desafios. Sua trajetória é inspiradora e estar sob sua orientação durante seis anos foi um presente.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior por ser um exemplo de competência, dinamismo e multidisciplinaridade na ciência.

Aos professores Dr. Michel Picanço, Dr. Jordão Moulin e Dr. Edy Baraúna pela cordialidade em viabilidade e auxiliar nas análises laboratoriais.

Aos funcionários da ArcelorMittal por confiarem em meu trabalho e contribuírem ininterruptamente para geração de informações confiáveis e ao andamento deste trabalho Dr. Charles Abreu, Ricardo Tauffer, Dr. Rafael Sartim e Cinthia Rodrigues. Em especial ao Ms. Roosevelt Almado e Ms. Caio Varonil, grandes entusiastas e credores no potencial da utilização do gênero *Corymbia* na indústria florestal e por impulsionarem a realização deste trabalho com tanto afinco. A troca de experiências com vocês foi, sem dúvidas, muito enriquecedora.

Às queridas estagiárias Letícia Aramuni, Lorraine de Jesus, Steffany Lima, Estefany Vaz, Flávia Souza e Tayná Rebonato que não mediram esforços para auxiliar nas análises e me tanto me ensinaram sobre a importância da entrega de conhecimento.

Aos técnicos laboratoriais da UFES Luciano Dias, José Geraldo e Damiele Leite pelo auxílio e disposição nas análises e trocas de experiências.

Ao Thiago Macedo pelo companheirismo e apoio incondicional para minha realização profissional e pessoal, sem você os desafios teriam sido maiores. Nossa história é diferente e o amor é só um detalhe.

À minha mãe Maria Aparecida Rocha e meus irmãos Amanda Rocha e Daniel Rocha, por serem meus exemplos de resiliência, amor e alegria, nossos laços eternos e ver, como isso é forte entre nós é um dos meus maiores orgulhos.

Aos queridos amigos do NUQMAD pelas valiosas discussões e momentos de descontração durante os seis anos de pós-graduação, em especial a João Gabriel Silva, Maria Naruna Félix, Alexa Melo e Daniela Minini pela convivência harmoniosa, boas energias emanadas e contribuições significativas para realização deste e outros trabalhos.

À Fabíola Delatorre, Miqueias Souza, Jair Rogério e Fernando Alves por contribuírem com tanta dedicação para realização das análises laboratoriais do carvão vegetal.

Aos queridos amigos que a estadia em Jerônimo Monteiro me permitiu cultivar Tais Rizzo, Rita Freire, Genilda Amaral, Paulo Fraga, Ramon Ferreira, Kaíse Sousa, Emanuel Araújo e Franciele Rodrigues, Leandro Araújo, Terezinha Noé por me proporcionarem grandes momentos de diversão que foram tão importantes para que esta jornada fosse mais leve.

À Eldorado Brasil S/A por me proporcionar o meu primeiro vínculo profissional e tanto contribuir para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Em especial aos meus gestores Dr^a. Brígida Maria Valente e Dr. Eduardo Camargo por serem referências de profissionalismo e competência e por tanto me ensinarem diariamente, vocês são merecedores do meu carinho e admiração. Aos queridos colegas Lucas Rocha, Vagna Pereira e Amanda Francisco, vocês fazem diferença no meu dia a dia.

Aos amigos que conquistei em Três Lagoas – MS, vocês tornaram minha estadia em Três Lagoas leve, divertida e fizeram transbordar amor e cuidados em um momento de muitos desafios, vocês serão eternamente lembrados com imenso carinho, obrigada por tanto.

A todos vocês, muito obrigada, sem a contribuição de todos, não seria possível chegar até aqui.

RESUMO

ROCHA, Sofia Maria Gonçalves. **Qualidade da madeira de clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* para produção de carvão vegetal de uso siderúrgico.** 2022. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof^a. Dr^a. Graziela Baptista Vidaurre. Coorientadores: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior e Rafael Sartim.

A qualidade da madeira é um dos principais pressupostos para escolha de materiais genéticos em florestas para a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico. As características do lenho são decisivas na relação custo-benefício em diversas etapas da cadeia produtiva, desde a colheita até a produção e utilização do carvão vegetal em altos fornos siderúrgicos. Considerando a importância de se avaliar clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* em diversas etapas da cadeia produtiva de carvão vegetal, os objetivos dessa pesquisa foram: i) avaliar a variabilidade da densidade, teores de casca, cerne e alborno, ii) as relações anatômicas da madeira e sua influência na secagem natural da madeira em toras e, iii) analisar as características de crescimento das árvores, qualidade da madeira e as propriedades do carvão vegetal para uso siderúrgico. Foram estudados quatro clones híbridos entre as espécies *C.torelliana* e *C.citriodora* e um clone de *E.urophylla*, como parâmetro de comparação, sendo este o material genético mais utilizado na produção de carvão vegetal todos aos sete anos de idade, plantados em Bom Despacho – MG. Foram determinadas as características de crescimento, de qualidade da madeira (anatômicas, físicas e químicas) e do carvão vegetal. Foram empregadas técnicas estatísticas como testes de comparação múltipla de médias, análise de componentes principais e modelos de regressão que foram capazes de distinguir os clones de *Corymbia* de *E. urophylla* e, dentre eles e, ainda, identificar as variáveis de maior influência para estas estratificações. Foi identificado que, anatomicamente, os híbridos de *C.torelliana* e *C.citriodora* diferem de *E. urophylla* principalmente por apresentarem menores áreas de vasos, fibras 7% mais curtas, 16% menos largas, com diâmetro de lume 45% menor e com parede 16% mais espessas que o clone 05 de *E. urophylla*. Os raios da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foram 25% menos altos e 17% mais frequentes que os da madeira do clone de *E. urophylla*. Estas características possibilitaram menores cargas de água e maior agilidade no

processo de secagem. Os híbridos de *C.torelliana* e *C.citriodora* apresentam maior variação entre árvores e dentro das árvores nas propriedades da madeira. Constatou-se que os melhores pontos para amostragem das árvores para determinação da densidade e percentagens de casca, albúrnio e cerne são distintos para cada material genético, uma vez que, os perfis de variação da densidade nos sentidos casca-casca e base-topo são distintos para cada clone. Os clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* se diferem de *E. urophylla* em características de crescimento, qualidade da madeira e propriedades do carvão vegetal, em diferentes grandezas, no entanto, as características de crescimento e qualidade da madeira proporcionam maior distanciamento entre os gêneros que as características do carvão vegetal. Conhecer as diferenças entre as características dos híbridos de *Corymbia* e *E. urophylla* possibilitam as melhores tomadas de decisões para escolha de materiais genéticos que favoreçam o processo produtivo de carvão vegetal.

Palavras-chave: florestas energéticas, características do lenho, classificação de clones, *Corymbia*

ABSTRACT

ROCHA, Sofia Maria Gonçalves. **Wood quality of hybrid clones of *Corymbia torelliana* and *Corymbia citriodora* for the production of charcoal for steel use.** 2022. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Graziela Baptista Vidaurre. Co-advisors: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior and Rafael Sartim.

The quality of wood is one of the main assumptions for choosing genetic materials in forests dedicated to the production of charcoal for steel use. The characteristics of wood are decisive in the cost-benefit relationship at several stages of the production chain, from harvesting to the production and use of charcoal in blast furnaces. Considering the importance of evaluating hybrid clones of *Corymbia torelliana* and *Corymbia citriodora* at different stages of the charcoal production chain, the objectives of this thesis were: i) to evaluate the variability of density, bark, heartwood and sapwood contents, ii) the relationships anatomical characteristics of wood and its influence on the natural drying of wood in logs and, iii) analyze the characteristics of tree growth, wood quality and the properties of charcoal for steel use. Four hybrid clones of *C. torelliana* and *C. citriodora* and one clone of *E. urophylla* were studied as a comparison parameter, which is the most used genetic material in the production of charcoal, all at seven years of age, planted in Bom Despacho – MG Growth characteristics, wood quality (anatomical, physical and chemical) and charcoal quality were determined. Statistical techniques such as multiple comparison tests, principal component analysis and regression models were used, which were able to distinguish *Corymbia* clones from *E. urophylla* and, among them, identify the variables of greatest influence for these stratifications. It was identified that, anatomically, the hybrids of *C. torelliana* and *C. citriodora* differ from *E. urophylla* mainly because they have smaller vessel areas, fibers 7% shorter, 16% less wide, with 45% smaller lumen diameter and 16% thicker than *E. urophylla* clone 05. Wood radii from hybrids of *C. torelliana* and *C. citriodora* were 25% lower and 17% more frequent than those of wood from *E. urophylla*. These characteristics allowed lower water loads and greater agility in the drying process. The hybrids of *C. torelliana* and *C. citriodora* show greater variation between trees and within trees in wood properties. It was found that the best points for sampling the trees to determine the density and percentages of bark, sapwood and heartwood are different for each genetic material, since the density variation profiles in the bark-bark and base-top directions are different for each clone. The hybrid clones

of *C. torelliana* and *C. citriodora* differ from *E. urophylla* in terms of growth characteristics, wood quality and charcoal properties, in different magnitudes, however, the growth characteristics and wood quality provide greater distance between the genera than the characteristics of charcoal. Knowing the differences between the characteristics of *Corymbia* and *E. urophylla* hybrids enables better decision-making for choosing genetic materials that favor the charcoal production process.

Keywords: wood characteristics, clone evaluation, *Corymbia*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
	Referências.....	13
2	CAPÍTULO 1.....	15
	VARIABILIDADE DA DENSIDADE, CASCA, ALBURNO E CERNE NA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE <i>Corymbia torelliana</i> e <i>Corymbia citriodora</i>	15
2.1	INTRODUÇÃO	16
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	17
2.2.1	Área de estudo, amostragem e caracterização da madeira	17
2.2.2	Análise de dados	19
2.3	RESULTADOS.....	20
2.3.1	Variação base-topo de densidade básica e porcentagens de casca, alburno e cerne .	20
2.3.2	Variação diametral de densidade aparente da madeira.....	25
2.4	DISCUSSÃO	28
2.4.1	Variação base-topo de densidade básica e porcentagens de casca, alburno e cerne .	28
2.4.2	Variação diametral de densidade aparente da madeira.....	32
2.5	CONCLUSÕES	32
	REFERÊNCIAS	32
3	CAPÍTULO 2.....	36
	RELAÇÕES ANATÔMICAS E A SECAGEM NATURAL DA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE <i>Corymbia torelliana</i> E <i>Corymbia citriodora</i>	36
3.1	INTRODUÇÃO	37
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	38
3.2.1	Área de estudo, amostragem e caracterização da madeira	38
3.2.2	Secagem natural da madeira.....	40
3.2.3	Análises de dados	42
3.3.	RESULTADOS.....	42
3.3.1	Características da madeira e da casca.....	42
3.3.2	Secagem natural da madeira de clones híbridos de <i>C. torelliana</i> e <i>C. citriodora</i> e <i>E. urophylla</i>	48
3.4.	DISCUSSÃO.....	50
3.4.1	Características da madeira e da casca.....	50
3.4.2	Secagem natural da madeira de híbridos de <i>C. torelliana</i> e <i>C. citriodora</i> e <i>E. urophylla</i>	52

3.5	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS	55
3	CAPÍTULO 3.....	60
	CRESCIMENTO, QUALIDADE DA MADEIRA E PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL DE HÍBRIDOS DE <i>Corymbia torelliana</i> E <i>Corymbia citriodora</i> PARA O RANQUEAMENTO DE CLONES.....	60
3.1	INTRODUÇÃO	61
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	62
3.2.1	Área e materiais de estudo	62
3.2.2	Caracterização do crescimento e qualidade da madeira	63
3.2.3	Carbonização e caracterização do carvão vegetal	64
3.2.4	Análise de dados	66
3.4	DISCUSSÃO	73
3.5	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO GERAL

A expansão mundial das plantações de *Eucalyptus* e conhecimento das limitações do gênero resultou em forte demanda pelo conhecimento de novos táxons que sejam adequados às novas fronteiras florestais. Estes novos materiais visam principalmente tolerância às variações ambientais, pragas e doenças, enquanto preservam a produção volumétrica e características da madeira adequadas à determinada finalidade (RHODES; STEPHENS, 2015; PAYN et al., 2015; REIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2011) e, neste contexto, surgem as especulações sobre a utilização da madeira de espécies do gênero *Corymbia* na indústria de base florestal.

As espécies do gênero *Corymbia* se destacam para reflorestamento em novas áreas florestais, principalmente pelas suas atrativas características de tolerância às secas, geadas e solos inférteis tanto em ambientes tropicais como em ambientes subtropicais mantendo seu potencial produtivo, o que evidencia baixa interação genótipo ambiente para este gênero (GARDNER et al., 2007; LEE, 2007).

Outro fato que contribuiu para a inserção das espécies do gênero *Corymbia* na indústria florestal, em escala comercial, foi o desenvolvimento de técnicas de propagação e hibridização de espécies para geração de materiais genéticos com potenciais de reprodução e desenvolvimento superiores às espécies puras (LEE et al., 2009), mas, ainda, há muito que se pesquisar sobre esta temática a fim de maximizar o custo benefício da implantação de florestas deste gênero.

Há uma lacuna sobre as características da madeira do gênero *Corymbia* tanto para espécies puras quanto para híbridos e, a falta destas informações limita o potencial de aplicação do material na indústria madeireira para diversas finalidades. Por isso, pesquisas voltadas a caracterização da madeira de *Corymbia* e conhecimento das particularidades das espécies são necessárias para seleção de materiais adequados para diversas atividades.

Apesar de todas as informações acerca das espécies de *Corymbia*, pesquisas que destaquem as principais diferenças entre o crescimento e qualidade da madeira e do carvão vegetal de híbridos dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* são escassas. Os ganhos em termos de eficiência energética e/ou econômica que o emprego correto desse novo gênero proporciona à cadeia produtiva e, a qualidade do carvão vegetal, são pouco conhecidos mundialmente.

A maior agilidade do processo de secagem da madeira do gênero *Corymbia* em relação a madeira do gênero *Eucalyptus*, é atribuída ao menor teor de água na madeira recém colhida (ZANUNCIO et al., 2013), além da madeira do gênero *Corymbia* possuir menor teor de cerne e, alburno mais permeável (REEDMAN et al., 2012).

Dentro de uma mesma árvore são identificadas algumas tendências de variação, como a madeira mais densa na base do fuste, por exercer a sustentação mecânica do tronco (ALZATE; TOMAZELLO; PIEDADE, 2005; COUTO et al., 2015). É possível encontrar na literatura trabalhos que buscaram descrever a variabilidade base-topo e casca-casca das propriedades da madeira de espécies de *Eucalyptus*, no entanto, essas informações para espécies de *Corymbia* são limitadas.

Estudos destacam rendimento gravimétrico em carvão vegetal entre 28 e 32% e densidade entre 190 a 230 kg.m³, quando produzido com madeira de *Corymbia* (PERES et al., 2019; COSTA et al., 2017; MOUTINHO et al., 2017). Logo, clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* tem se apresentado como alternativa viável para produção de carvão vegetal siderúrgico, pois, a alta densidade da madeira proporciona elevada densidade e resistência mecânica ao carvão vegetal (LOUREIRO et al., 2019).

Neste contexto, os objetivos desta tese foram: i) avaliar a variabilidade da densidade, teores de casca, cerne e alburno, ii) estudar as relações anatômicas da madeira e sua influência na secagem natural da madeira em toras e, iii) analisar as características de crescimento, qualidade da madeira e propriedades do carvão vegetal para uso siderúrgico.

Referências

ALZATE, S. B. A.; FILHO, M.T.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *E. urophylla*. **Scientia Forestalis**, [s. l.], n. 68, p.87-95, ago. 2005.

COSTA, L. J. et al. Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 629-639, 2017.
COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A.; LIMA, J.T.; SILVA, J.R.M.; PROTÁSIO, T.P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido

em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015

GARDNER, R.A. ArbutnotWood and fibre productivity potential of promising new eucalypt species for coastal Zululand, South Africa. **Australian Forestry**, v.2, n.70, p. 37-47, 2007.

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**, v.3, n.70, p. 11-16, 2007.

LEE, D.J. *et al.* Comparative performance of *Corymbia* hybrids and parental species in subtropical queensland and implications for breeding and deployment. **Silvae Genética**, v.5, n.58, p. 205-212, 2009.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 21, n. 4, p. 619-630, 2019.

MOUTINHO, V. H. P. *et al.* Caracterização e correlação estatística entre as propriedades físicas e mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1095-1103, 2017

PAYN, T. *et al.* Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management*, v.1, n. 352, p. 57-67, 2015. 10.1016/j.foreco.2015.06.021

PERES, L.C. *et al.* Clonal selection of *Corymbia* for energy and charcoal production. **Advances in Forestry Science**, v.6, n.3, p.749-753, 2019.

REDMAN, A. L. *et al.* Mass transfer properties (permeability and mass diffusivity) of four australian hardwood species. **BioResources**, [s.l.], v.7, n. 3, p. 3410-3424, 2012.

RHODES, D., STEPHENS, M. Planted forest development in Australia and New Zealand: comparative trends and future opportunities. *New Zealand Forest Science*, v.44, n.10, p.1-13, 2014. 10.1186/s40490-014-0032-5

SANGUMBE, L. M. V.; ALBERTO, L. U. J. Variação radial e longitudinal da densidade básica das madeiras de *Eucalyptus saligna* e de *Pinus radiata*. **Revista digital de Medio Ambiente "Ojeando la Agenda"**, Angola, nº66, 2020. Disponível em: <https://ojeandolaagenda.com/2020/07/31/variacao-radial-e-longitudinal-da-densidade-basica-das-madeiras-de-eucalyptus-saligna-e-de-pinus-radiata/>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ZANUNCIO, A.J.V. *et al.* Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestali**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 353-360, set. 2013. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr99/cap06.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

2 CAPÍTULO 1

VARIABILIDADE DA DENSIDADE, CASCA, ALBURNO E CERNE NA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora*

Resumo

A madeira possui tendências de variação de suas propriedades entre árvores e dentro de uma mesma árvore que, podem ser diferentes entre espécies e gêneros e, entendê-las e aperfeiçoar as estratégias de amostragem, favorece a seleção de clones nos programas de melhoramento genético. Os objetivos foram: i) conhecer o quanto a densidade e as porcentagens de casca, alburno e cerne podem variar inter e intra-árvores e, ii) identificar as posições ideais de amostragem que representem as propriedades médias do fuste. Foram estudados quatro clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* e um clone de *Eucalyptus urophylla*, aos sete anos idade, plantados em Bom Despacho – Minas Gerais, Brasil. Foram colhidas cinco árvores de cada clone e, em seis posições base-topo foram determinadas as densidades básica e aparente da madeira e as porcentagens de casca, alburno e cerne. Para cada uma das propriedades da madeira e nas seis posições foi calculada a amplitude de variação entre árvores e foram ajustados modelos para estimativa de valores médios do fuste em função das diferentes posições base-topo. Realizou-se a leitura por raios-X nas seis posições e no sentido casca-casca e elaboraram-se mapas de variação espacial nos sentidos diametral e base-topo da densidade aparente da madeira de cada clone. Os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram maiores variações entre árvores das propriedades da madeira em todas as posições do fuste, comparados ao *E. urophylla*. Para a densidade e teores de casca e alburno cada clone apresentou uma posição representativa da média do fuste. Os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram madeiras em média 23% mais densas em todo o sentido casca-casca que o *E. urophylla*, e também menores amplitudes de variação. Todos os clones apresentaram posições ideais de amostragem distintas para cada propriedade, sendo necessárias avaliações prévias para tomada de decisão de coletas de madeira ao longo do fuste mais representativas.

KEYWORDS: Variabilidade, propriedades da madeira, amostragem de madeira, densitometria de raios-x.

2.1 INTRODUÇÃO

As propriedades da madeira podem variar entre populações, indivíduos e dentro de uma mesma árvore (LIMA et al., 2020; ALBINO; TOMAZELLO FILHO, 1985) e, entender como e quais os limites destas variações é importante para o planejamento de amostragem da madeira. A escolha dos indivíduos a serem amostrados, tem como finalidade principal representar a variação existente em determinada população e indivíduo, com investimento de custos e tempo adequados à realidade econômica do projeto (DOWNES et al., 1997; BARRICHELO; BRITO; SILVA, 2020).

Neste sentido, identificar posições dentro das árvores que possibilitem diminuir a intensidade amostral é uma ferramenta importante para garantir a viabilidade dos projetos madeireiros, pois, ao se conhecer a tendência de variabilidade de um material, é possível identificar as melhores posições de amostragem para determinado estudo e, ainda, definir como serão aplicadas as novas técnicas, como por exemplo, aferições com equipamentos não destrutivos.

Há uma lacuna na definição dos pontos ideais de amostragem da madeira em uma árvore, mesmo para a madeira de eucalipto, tão extensamente cultivada no Brasil. É preciso conhecer previamente como ocorrem às variações das propriedades do lenho nos sentidos base-topo e casca-casca, para assim, poder inferir sobre os pontos que melhor representem as propriedades médias daquele fuste. Os trabalhos que abordam sobre a variabilidade e pontos de amostragem da madeira ainda são escassos e dificultam as tomadas de decisões na indústria (SILVA; ROCHA; VIDAURRE, 2021), principalmente para as madeiras do gênero *Corymbia* e novos híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora*.

Hipoteticamente, a variação das propriedades da madeira entre árvores clonais deve ser a menor possível, uma vez que se admite que todos os indivíduos possuem o mesmo potencial de crescimento, no entanto, suas interações com as características do ambiente podem gerar divergências de crescimento e conseqüentemente, na qualidade da madeira (BINKLEY et al., 2010). Esta variação impulsiona investigações para determinar a quantidade ideal de árvores que representem eficientemente a população a ser estudada, sendo a primeira variação a ser contabilizada.

Dentro de uma mesma árvore são identificadas algumas tendências de variação, como a madeira mais densa na base do fuste, por exercer a sustentação mecânica do tronco (ALZATE; TOMAZELLO; PIEDADE, 2005; SANGUMBE; ALBERTO, 2020). Outras tendências de variação foram identificadas em madeira de *Eucalyptus*, como decréscimo de densidade básica da base para o meio do fuste e acréscimo em direção ao topo (ALMEIDA et al., 2016; MAGALHÃES et al., 2020), evidenciando que, não há um padrão de variação de densidade no sentido base-topo e que, os esforços mecânicos que o fuste é submetido podem contribuir para alterar as propriedades (BRAZ et al., 2017).

A variação das propriedades da madeira no sentido medula-casca é impulsionada principalmente pela formação dos lenhos juvenil e adulto e pelo processo de cernificação (VIDAURRE et al., 2011). Para *Corymbia citriodora* madeira mais densa foi identificada na região do alburno e com formação de lenho adulto, devido a configurações anatômicas diferenciadas (COUTO et al., 2015; COSTA et al., 2017).

É possível encontrar na literatura trabalhos que buscaram descrever a variabilidade base-topo e casca-casca das propriedades da madeira de espécies de *Eucalyptus*, no entanto, essas informações para espécies de *Corymbia* são limitadas e pontuais. O objetivo desta pesquisa foi conhecer o quanto a densidade e os teores de casca, alburno e cerne podem variar entre e intra árvores e, identificar os pontos de amostragem representativos das propriedades médias do fuste.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo, amostragem e caracterização da madeira

Foram estudadas as madeiras de quatro clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* (01, 02, 03 e 04) e um clone de *Eucalyptus urophylla* (05), aos 7 anos de idade, provenientes de plantação experimental, no município de Bom Despacho, região leste de Minas Gerais, Brasil (Tabela 1). A região apresentou temperatura média de 24,6°C e precipitação de 835 mm.ano⁻¹ entre os anos de 2012 a 2019. A área do plantio foi de 2,5 ha, sendo 0,5 ha para cada clone, com espaçamento de 4 x 1,75 metros e foram adotados manejos silviculturais semelhantes para todos os clones.

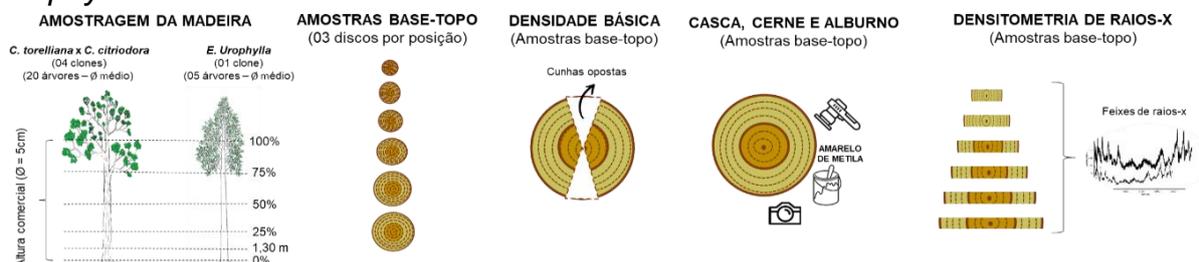
Tabela 1 – Características de crescimento dos clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e de *E. urophylla*, aos sete anos de idade

Clones	Espécies	Altura total (m)	Altura comercial (m)	DAPcc (cm)	DAPsc (cm)	Volume (m ³ .ha)
01	Ct x Cc	19,92	16,91	11,55	10,55	132.3
02	Ct x Cc	14,85	11,81	12,99	11,87	178.08
03	Cc x Ct	15,16	11,07	9,73	8,41	82.95
04	Cc x Ct	25,02	17,35	14,26	13,38	246.47
05	Eu	28,12	24,72	14,50	13,90	274.61

Ct: *Corymbia torelliana*; Cc: *Corymbia citriodora*; Eu: *Eucalyptus urophylla*; DAPcc: diâmetro a 1,30 metro com casca; DAPsc: diâmetro a 1,30 metro sem casca.

Foram colhidas 5 árvores de cada clone pelo diâmetro médio do plantio. Procedeu-se a cubagem rigorosa pelo método de Smalian e a altura comercial foi definida no diâmetro mínimo de 5 cm com casca. Discos de 3 cm de espessura foram retirados em seis posições do fuste sendo elas, 0; 25; 50; 75 e 100% da altura comercial, além de uma amostra a 1,30 m (Figura 1).

Figura 1 – Amostragem de discos de madeira e produção de amostras para caracterização da madeira de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



A densidade básica (DB) da madeira foi determinada de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003), em que, foram retiradas cunhas opostas dos discos das seis posições. Determinou-se a DB média de cada posição e, procedeu-se a ponderação pelo volume de cada secção, referente às seis posições, obtendo-se a DB ponderada da árvore (MENDES et al., 1999).

Os teores de casca, alburno e cerne da madeira foram determinados nos discos das seis posições das árvores, polidos com lixas de grã n° 80 e, posterior, coloração com amarelo de metila (BRITO et al., 2019). Posteriormente, os discos foram fotografados e as áreas foram mensuradas pelo software Axiovision. Procedeu-se a ponderação pelo volume de cada secção, referente às seis posições, obtendo-se os teores de casca, alburno e cerne da árvore.

Para cada clone foi escolhida dentre as cinco as árvores, uma com diâmetro e altura representativos dos valores médios das demais. A densidade aparente da madeira (12% de umidade) foi analisada pela técnica de densitometria de raios-X, em uma árvore amostrada nas posições da base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Os discos de madeira foram secos ao ar livre e, em seguida, retiradas seções diametrais de 3 x 2 cm (espessura e largura), que foram fixadas em suporte de madeira, para o corte de seções finas de 2,0 mm de espessura no sentido transversal. As amostras foram dispostas em sala de climatização (12 h, 20°C e 60% UR) até atingir 12% de umidade.

A leitura das seções diametrais das amostras foi executada por feixes de raios X colimados, em intervalos de 0,40 mm, no equipamento QTRS-01X (*Quintek Measurement Systems*). Para a conversão dos valores de raios X em densidade aparente, foi utilizado o software QMS, como executado por Silva (2020).

2.2.2 Análise de dados

A variação de DB, %casca, %alburno e %cerne entre árvores foram determinadas pela amplitude (subtração) entre os valores máximos e mínimos para cada posição e também entre a maior e menor DB média das árvores. Para identificar a posição ideal de amostragem da madeira (que mais se aproxima do valor médio da árvore), realizou-se a análise de variância (ANOVA) e quando pertinente, aplicado o teste de Dunnett a 5% de significância entre os valores de cada posição e a média do fuste para a DB e %casca, %alburno e %cerne. Foram ajustados modelos de regressão linear simples para estimativa dos valores médios (média da árvore) das variáveis estudadas em função dos valores observados em cada posição base-topo das árvores.

Para a elaboração dos mapas de densidade aparente da árvore foi utilizada a média dos valores de densidade aparente (DA) obtidos pela densitometria de raios-X para o diâmetro e altura do fuste. A interface do RStudio foi utilizada para definir os pontos de interpolação (pacotes *dplyr*, *tidyr* e *readr*). O método de interpolação de Akima foi usado (Mora e Schimleck, 2009), com as posições reais de cada ponto de dados convertida para uma posição relativa em cada árvore, mantendo a direção cardinal apropriada (norte e sul, leste e oeste). As ferramentas “Geostatistical Analyst” e “Geoestatistical Wizard” foram utilizadas para interpolação dos dados, sendo

aplicado o método “Global Polynomial Interpolation” com polinômio de ordem 3 (ArcGIS 10.7). A ferramenta “extract by mask” foi usada para recortar as regiões não avaliadas de modo a compor o perfil de cada árvore.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Variação base-topo de densidade básica e porcentagens de casca, albarno e cerne

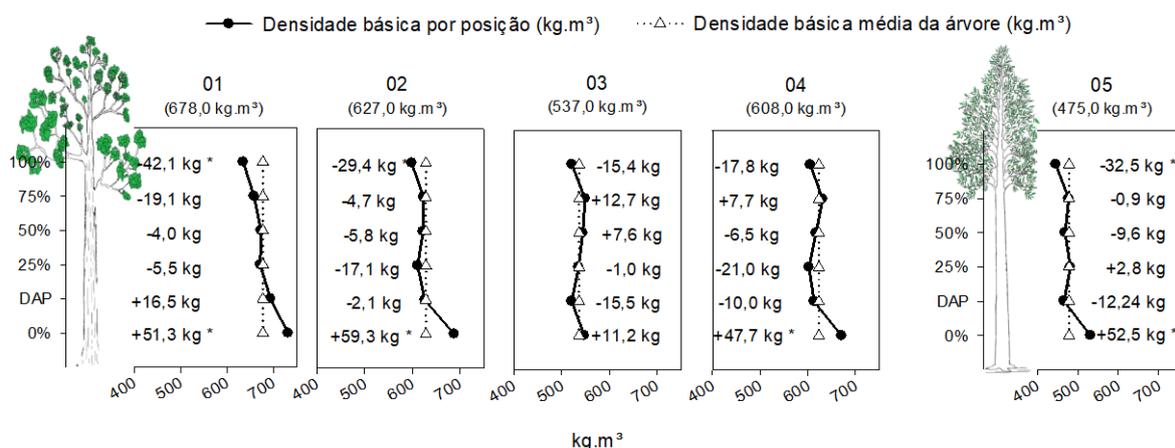
A amplitude de DB média entre árvores foi maior para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* comparados ao de *E. urophylla*, e atingiram amplitudes de 17 a 37,81 kg m⁻³, enquanto para *E. urophylla* foi de 15,87 kg m⁻³ (Tabela 2). As maiores amplitudes de variação da DB da madeira ocorreram em distintas posições de amostragem do fuste para cada clone, assim, para o 01 foi em 100%, para o 02 em 75%, no 03 em 0% e para o 04 foi em 50%, coincidindo com o *E. urophylla* (Tabela 2). A amplitude de DB para todos os clones foi maior ao analisar as posições de amostragem isoladas, comparadas às médias de todas as posições do fuste (Tabela 2).

Tabela 2 – Amplitudes de variação entre árvores de densidade básica da madeira em diferentes posições de amostragem em clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.

Propriedade	Clone	DB Média (kg m ⁻³)	0% (kg m ⁻³)	DAP (kg m ⁻³)	25% (kg m ⁻³)	50% (kg m ⁻³)	75% (kg m ⁻³)	100% (kg m ⁻³)
Densidade básica (kg.m ³)	01	37.81	53.21	63.17	31.36	42.38	43.58	68.27
	02	18.85	30.46	47.34	11.01	33.60	53.78	39.43
	03	17.99	71.64	15.47	13.61	46.33	57.39	31.82
	04	35.34	24.59	38.48	54.80	90.29	49.92	40.71
	05	15.87	39.06	23.45	29.39	86.88	23.40	19.13

Para todos os clones, as posições centrais dos fustes (DAP a 75%) apresentaram os menores desvios da DB média ponderada e não diferiram estatisticamente da média da árvore (Figura 2). Para o clone 03 de *C. torelliana* x *C. citriodora* todas as posições são ideais para representar a DB média do fuste e para o clone 04 apenas a madeira da base se diferencia da DB média (Figura 2). Assim, como os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, o de *E. urophylla* (05) apresentou as posições entre o DAP e 75% como as mais representativas da DB média da árvore (Figura 2).

Figura 2 – Variação base-topo da densidade básica da madeira de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* e suas respectivas diferenças em relação à densidade básica média da árvore.



Os números seguidos de * diferem estatisticamente da média da árvore pelo teste de Dunnett à 5% de significância.

Para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, o modelo de regressão ajustado para a posição de 25% da altura comercial forneceu a maior precisão (menor Sy_x) na estimativa de DB média da madeira, o que indica esta como a posição ideal de amostragem, ao se utilizar a predição por modelos estatísticos (Tabela 3). Para o *E. urophylla*, as posições de 100% e do DAP forneceram as estimativas mais precisas de DB média das árvores.

Tabela 3 – Modelos estatísticos para estimativa da densidade básica média da árvore em função da densidade básica nas posições de amostragem de árvores de híbridos *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.

<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	R^2 aj.	Sy_x (Kg m ⁻³)	Sy_x (%)	<i>E. urophylla</i> (05)	R^2 aj.	Sy_x (Kg m ⁻³)	Sy_x (%)
DB média = 0.9319 x DB 0%	0.94	21.48	3.48	DB média = 0.9005 * DB 0%	0.75	10.10	2.11
DB média = 1.0024 * DB DAP	0.94	16.68	2.70	DB média = 1.0260 * DB DAP	0.75	7.90	1.65
DB média = 1.0184 * DB25%	0.94	11.51	1.86	DB média = 0.9934 * DB25%	0.75	16.05	3.35
DB média = 1.0035 * DB 50%	0.94	15.39	2.52	DB média = 1.0174 * DB 50%	0.75	27.41	5.73
DB média = 1.0019 * DB 75%	0.94	18.06	2.93	DB média = 1.0013 * DB 75%	0.75	15.77	3.29
DB média = 1.0444 * DB 100%	0.94	19.53	3.17	DB média = 1.0730 * DB 100%	0.75	5.08	1.06

Para a % casca dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* a amplitude entre árvores foi de 0,83 a 17,64% e para *E. urophylla* foi de 2,44 a 19,67% (Tabela 4). Para todos os clones, as menores amplitudes de %casca entre árvores foram identificadas em posições distintas, para o 01 foi o DAP, no 02 foi 25% e em 75% para 03 e 04, enquanto para o *E. urophylla*, a menor amplitude foi identificada em 50% da altura comercial (Tabela 4).

Tabela 4 – Amplitudes de variação entre árvores dos teores de casca, albarno e cerne da madeira em diferentes posições de amostragem em clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.

Propriedade (%)	Clone	Média(%)	0%	DAP(%)	25%	50%	75%	100%
Casca	01	3,45	8,71	1,30	3,55	6,11	4,79	10,54
	02	4,90	3,50	9,81	0,83	8,22	7,27	5,97
	03	2,86	4,95	6,03	3,80	3,28	2,53	2,54
	04	5,39	8,46	10,72	17,64	1,93	1,32	16,91
	05	3,28	2,49	6,09	3,50	2,44	15,13	19,67
Albarno	01	5,44	6,24	4,58	8,98	12,74	4,79	10,54
	02	5,59	6,22	5,58	7,30	19,35	7,27	5,97
	03	2,90	3,36	13,64	3,56	3,28	0,63	2,54
	04	4,01	3,52	11,30	3,55	1,72	1,32	16,91
	05	4,24	4,31	5,75	8,86	3,19	20,16	19,64
Cerne	01	2,50	5,44	4,31	5,44	11,11	0,00	0,00
	02	5,16	7,26	8,16	6,99	17,40	0,00	0,00
	03	3,04	14,14	11,76	0,00	0,00	0,00	0,00
	04	3,36	13,93	11,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	05	2,72	3,50	7,64	12,01	4,21	0,00	0,00

A amplitude de variação entre árvores da % albarno dos clones de *C. torelliana* x *C. citriodora* foi de 0,63 a 16,91% e para *E. urophylla* foi de 3,19 a 20,16% (Tabela 4). Para todos os clones, as menores amplitudes entre árvores de % albarno foram identificadas em posições distintas, 25% para clone 01, 0% para o 02 e em 75% para o 03 e 04, já em *E. urophylla*, a posição de 50% da altura comercial registrou a menor amplitude.

A base das árvores (0%) foi a posição de menor amplitude de variação da % cerne entre árvores, ao passo que, para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, as posições de finalização da ocorrência de cerne (DAP e 50%) foram os locais com maiores amplitudes de variação entre árvores (Tabela 4). Para *E. urophylla*, as posições da base e de 25% da altura comercial apresentaram a menor e maior amplitude de variação entre árvores, respectivamente.

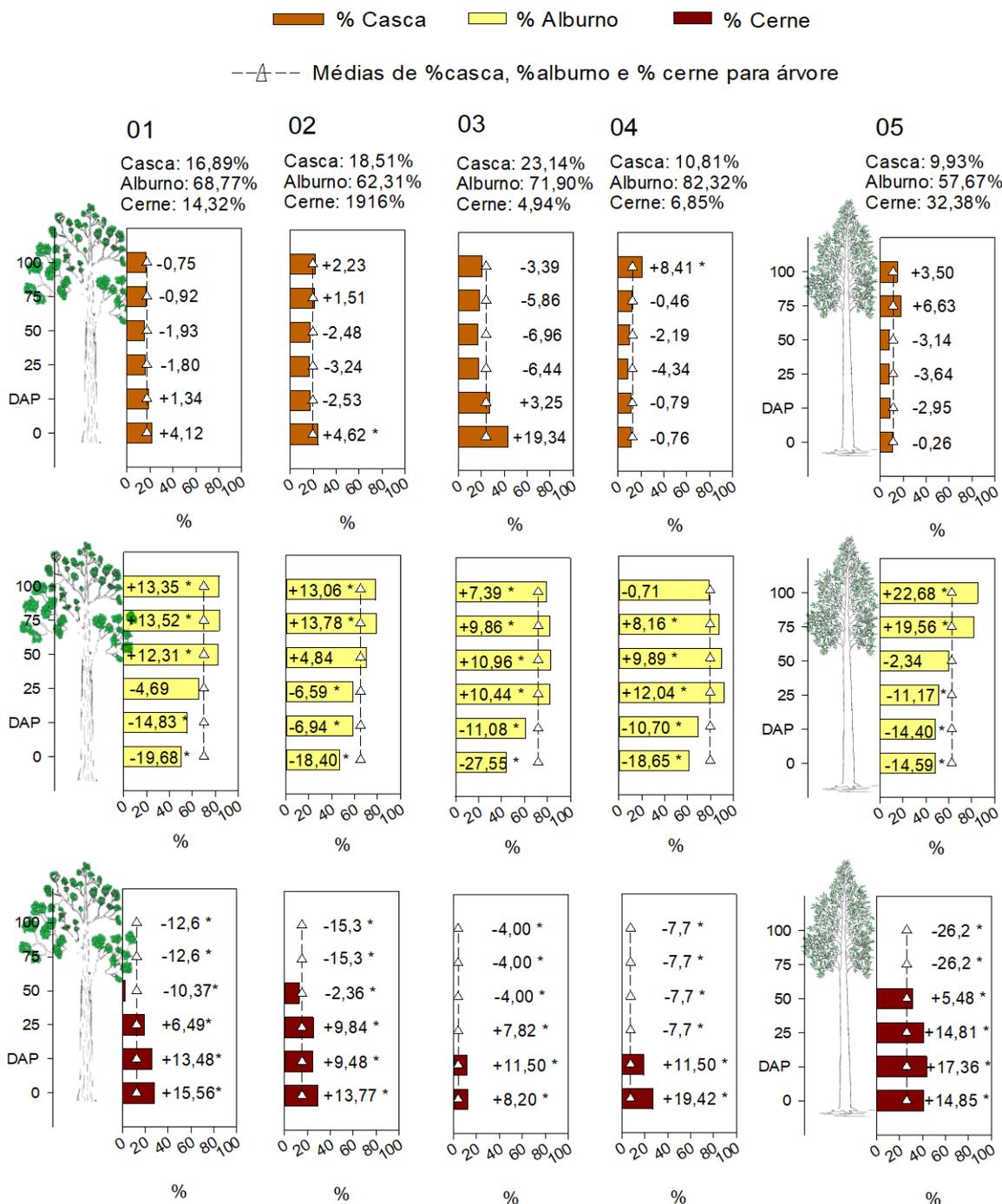
Para todos os clones a variação da %casca no sentido base-topo do fuste foi baixa, originando pouca diferença entre os valores das posições individuais para a média do fuste, com exceções para as posições 0% e 100% dos clones 02 e 04, respectivamente, que foram diferentes da média do fuste, não sendo indicados como pontos ideais de amostragem (Figura 3).

A posição de 25% do clone 01 foi a mais representativa da média de % albarno na árvore, ao passo que, no clone 02 foi 50% e 04 foi 100%. Já no clone 03, todas as

posições diferiram da média do fuste. Para *E. urophylla* a posição de 50% apresentou a menor amplitude de variação da %alburno em relação à média do fuste (Figura 3).

Em todos os clones, as posições isoladas não são eficientes como estratégia de amostragem para estudos de %cerne médio da árvore, uma vez que as posições basais das árvores apresentam valores superiores à média do fuste e as posições mais próximas a copa, valores inferiores à média (Figura 3).

Figura 3 – Variação base-topo das porcentagens de casca, alburno e cerne de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* e suas respectivas diferenças em relação aos valores médios das árvores.



Valores seguidos de * diferem estatisticamente do valor médio da árvore pelo teste de Dunnett à 5% de significância.

O modelo de regressão de maior precisão na estimativa da %casca dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foi ajustado para a posição de 50% da altura comercial, indicando ser esta a posição ideal de amostragem por meio da modelagem

estatística (Tabela 5). Para o *E. urophylla*, os modelos ajustados para as posições de 0% (base) e 50% foram os mais precisos ao estimar a %casca média do fuste.

Tabela 5 – Modelos estatísticos para estimativa das porcentagens de casca, alburno e cerne médias em função das determinadas nas posições de amostragem das árvores de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.

<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	R ² aj.	Sy.x (abs-%)	Sy.x (%)	<i>E. urophylla</i> (05)	R ² aj.	Sy.x (abs-%)	Sy.x (%)
Porcentagem de casca							
%casca = 0.6548 * %casca _{0%}	0.89	4,38	23,67	%casca = 1.0503 * %casca 0%	0.71	2,30	19,65
%casca = 0.9115 * %casca DAP	0.91	3,26	27,62	%casca = 1.3390 * %casca DAP	0.70	2,89	24,66
%casca = 1.2909 * %casca 25%	0.91	3,51	19,00	%casca = 1.4669 * %casca 25%	0.68	3,35	28,55
%casca = 1.2171 * %casca 50%	0.93	2,32	12,55	%casca = 1.4185 * %casca 50%	0.72	2,32	19,78
%casca = 1.0763 * %casca 75%	0.92	3,07	16,60	%casca = 0.5394 * %casca 75%	0.70	2,97	25,35
%casca = 0.8819 * %casca 100%	0.88	5,08	27,16	%casca = 0.6718 * %casca 100%	0.61	4,87	41,47
Porcentagem de alburno							
%alburno = 1.4002 * %alburno _{0%}	0.93	7,13	9,95	%alburno = 1.3101 * %alburno 0%	0.75	2,15	3,43
%alburno = 1.1737 * %alburno DAP	0.94	4,98	6,94	%alburno = 1.3046 * %alburno DAP	0.75	2,19	3,49
%alburno = 0.9422 * %alburno 25%	0.93	8,85	12,35	%alburno = 1.2205 * %alburno 25%	0.75	3,26	5,20
%alburno = 0.8798 * %alburno 50%	0.93	3,54	4,93	%alburno = 0.8798 * %alburno 50%	0.75	1,62	2,58
%alburno = 0.8691 * %alburno 75%	0.94	3,33	4,64	%alburno = 0.7419 * %alburno 75%	0.75	5,65	9,00
%alburno = 0.8944 * %alburno 100%	0.93	6,37	8,89	%alburno = 0.7335 * %alburno 100%	0.75	4,53	7,22
Porcentagem de cerne							
%cerne = 0.4326 * %cerne _{0%}	0.89	2,50	25,14	%cerne = 0.6384 * %cerne 0%	0.75	1,89	7,49
%cerne = 0.4987 * %cerne DAP	0.90	2,33	23,49	%cerne = 0.9115 * %cerne DAP	0.75	1,96	7,48
%cerne = 0.6393 * %cerne 25%	0.83	3,67	36,95	%cerne = 0.6356 * %cerne 25%	0.75	1,84	7,02
%cerne = 1.0204 * %cerne 50%	0.46	7,86	78,49	%cerne = 0.8258 * %cerne 50%	0.75	1,57	6,01

A posição de 75% da altura comercial dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* forneceu a estimativa mais precisa de %alburno média das árvores, o que indicou esta posição de amostragem como a ideal ao se utilizar modelagem estatística (Tabela 5). Para o *E. urophylla*, a posição de 50% forneceu o modelo mais preciso na estimativa da %alburno média do fuste.

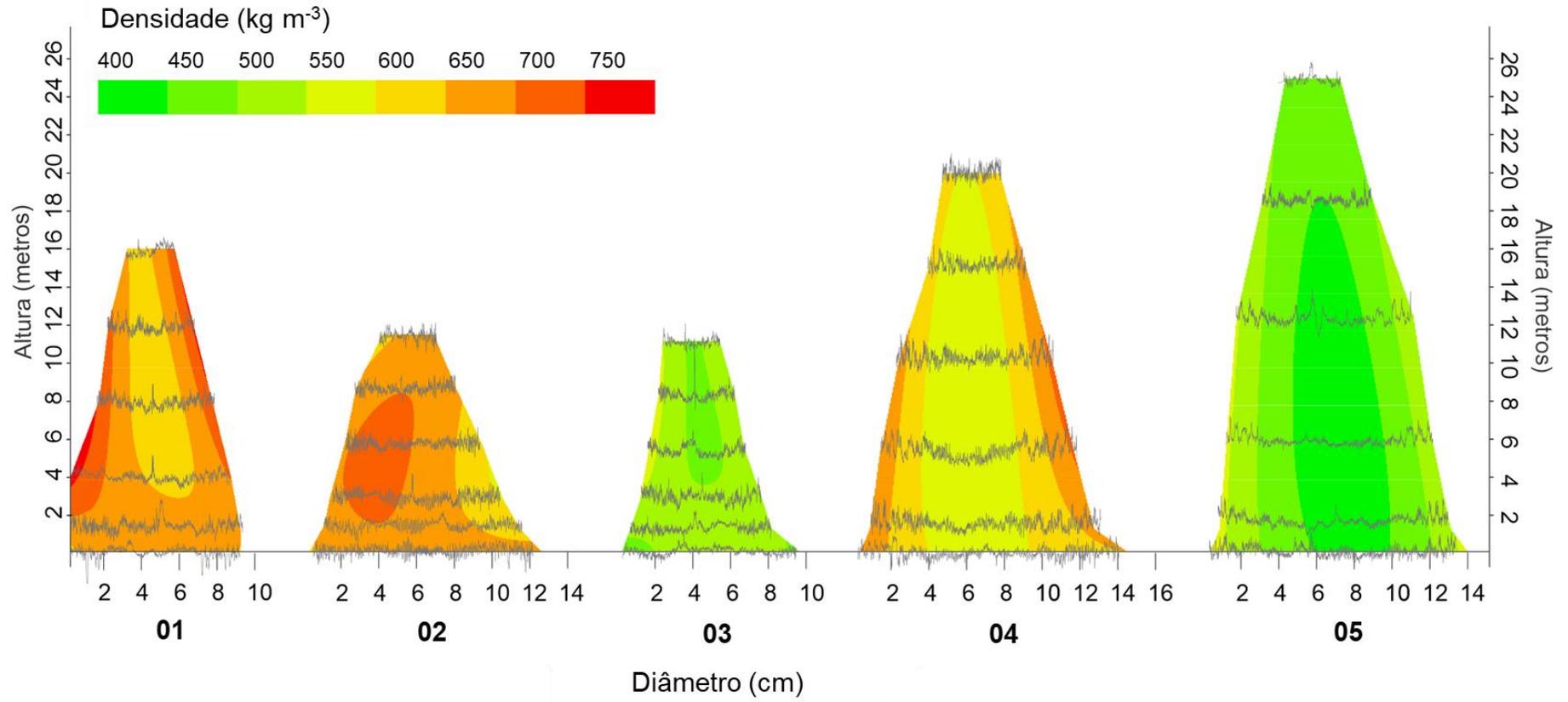
As posições de amostragem do DAP e de 25% possibilitaram as estimativas mais precisas da %cerne média das árvores dos clones de *C. torelliana* x *C. citriodora* e *E. urophylla*, respectivamente (Tabela 5).

2.3.2 Variação diametral de densidade aparente da madeira

Três clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* (01, 02 e 04) apresentaram madeira com amplitudes de densidade aparente superiores a da madeira do clone de *E. urophylla*. No entanto, o clone 04, clone com progenitor feminino *C. citriodora* e, de maior produção volumétrica entre os clones de *Corymbia*, apresentou padrão de distribuição de densidade semelhante à da madeira de *E. urophylla*, em que, as posições mais externas e na base do fuste possuem madeira mais densa e as posições mais internas e superiores são de madeira menos densa. O clone 03, de menor produção volumétrica, apresentou a menor variação em faixas de densidade,

em que, a maior porção de madeira se encontra entre as menores faixas de densidade (Figura 4).

Figura 4 – Mapas de variação espacial de densidade aparente da madeira de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* e seus respectivos perfis densitométricos.



Os clones 01 e 02 híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram variação de densidade aparente da madeira entre 0,600 e 0,800 g cm⁻³, mas, com diferentes distribuições, em que, o clone 01 apresentou as maiores densidades (0,700 a 0,800 g cm⁻³) nas porções externas da árvore e, o clone 02 apresentou madeira mais densa (0,700 a 0,750 g cm⁻³) na porção interna e central da árvore 25 a 50% (Figura 4). A madeira do clone 03 apresentou densidade aparente em faixas semelhantes à madeira do clone 05 de *E. urophylla* (0,400 a 0,600 g cm⁻³) e, ambos apresentaram porções de madeira na parte central do fuste com densidade mais baixa de 0,400 a 0,450 g cm⁻³. O híbrido de *C. citriodora* e *C. torelliana* 04 apresentou distribuição de densidade da madeira semelhante ao clone de *E. urophylla*, em que, na porção central do fuste ocorreu madeira menos densa, com acréscimo de densidade nas porções externas e na base do fuste, no entanto, no clone 04, todas as posições apresentaram madeira com densidade superior a madeira do clone de *E. urophylla* (Figura 4).

2.4 DISCUSSÃO

2.4.1 Variação base-topo de densidade básica e porcentagens de casca, alburno e cerne

Em uma plantação clonal todas as plantas de uma unidade amostral possuem a mesma capacidade de crescimento, mas a capacidade de fornecimento de recursos de forma heterogênea pode causar a variação de crescimento entre as árvores (BINKLEY et al., 2010; RYAN et al., 2010; ASPINWALL et al., 2011) e, conseqüentemente na qualidade da madeira destes indivíduos. Neste contexto, a uniformidade entre as plantas pode ser um indicador de adequação de fornecimento de recursos ao crescimento (STAPE et al., 2006; BINKLEY et al., 2010). Assim, a maior heterogeneidade entre árvores identificada no crescimento e qualidade da madeira neste estudo para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* é um indicativo da necessidade de homogeneidade dos recursos e, ainda, de possíveis falhas no processo de formação de raízes das mudas utilizadas no plantio.

As afirmações supracitadas são explicações plausíveis para maior heterogeneidade entre árvores encontrada para a densidade da madeira e porcentagem de casca, alburno e cerne da madeira dos híbridos de *C. torelliana*

e *C. citriodora* em relação à madeira do clone de *E. urophylla*, pois, as plantações experimentais foram realizadas seguindo as recomendações de manejo florestal desenvolvidas para espécies de *Eucalyptus*, evidenciando a maior homogeneidade no crescimento e qualidade da madeira destes. Neste sentido, observa-se que os clones 01 e 04 foram os mais impactados pelo manejo florestal adotado e/ou desuniformidade na formação de raízes das plantas, apresentando maior heterogeneidade entre árvores de DB da madeira e, no clone 02 para % casca, alborno e cerne.

Tanto a DB da madeira, quanto as %casca, alborno e cerne em *E. urophylla*, são características que comprovadamente são alteradas pelo ambiente de crescimento das árvores (ROCHA et al., 2020; ALMEIDA et al., 2020). No entanto, conhecer o quanto dessas características podem ser alteradas em híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* é um gargalo nas pesquisas voltadas ao gênero *Corymbia*, com a finalidade de indicar o melhor pacote tecnológico para o manejo das florestas plantadas com clones desse gênero.

Conhecer o intervalo ótimo de uniformidade (HAKAMADA et al., 2015) da madeira tanto para clones de *Corymbia*, quanto para clones de *Eucalyptus*, é uma ferramenta para indicativo de produtividade e qualidade das florestas. Identificar a variabilidade entre árvores em diferentes posições longitudinais do fuste pode auxiliar na determinação do intervalo ótimo de uniformidade em que, determinadas posições podem fornecer esta informação com grande semelhança a variabilidade média, diminuindo assim o esforço e custos amostrais de madeira em diferentes posições do fuste. Como por exemplo, para densidade básica da madeira, os clones 03 e 04 apresentaram amplitude de variação nas amostras do DAP semelhantes à amplitude de variação da média de todas as posições do fuste.

A amostragem de madeira é uma técnica que pode apresentar alta versatilidade e, o objetivo principal é que, seja representativa de toda a variabilidade contida na população e/ou amostra, e que facilite os processos operacionais reduzindo os custos e o tempo adotados (BARICHELO; BRITO; SILVA, 2005). Após a definição do critério de seleção e do número de árvores a serem amostradas, as posições do fuste que serão retiradas amostras é uma decisão importante, pois, podem ser representativas ou não das propriedades da madeira na totalidade daquela árvore (COSTA et al., 2017). Os resultados endossam esta teoria pois, nem todas as posições longitudinais do fuste

representam os valores médios da árvore, e, para cada material genético foram encontradas posições distintas de maior representatividade.

Independentemente do crescimento das árvores, para ambos os gêneros, na estimativa da DB da madeira, as posições centrais do fuste (25% a 75% da altura comercial) foram as que mais se aproximaram das propriedades médias das árvores, por serem posições de maior representatividade volumétrica de madeira na árvore, uma vez que, o valor médio da propriedade é obtido pela ponderação em relação ao volume.

A base (0%) e o topo (100%) para todos os clones apresentaram os valores mais discrepantes em DB da madeira e, estes resultados são relacionados principalmente às ações mecânicas sobre estas regiões. Por possuir função de sustentação da árvore, a base apresenta madeira com maior densidade e resistência mecânica e, por ser submetida às ações de sustentação da copa e constante movimentação, o topo, por vezes, assume densidades menores com maiores propriedades elásticas (PANSHIN; DEZEEUW, 1980).

Neste estudo, este comportamento foi acentuado para os clones de maiores crescimentos como o clone 05 de *E. urophylla* e 04 e 02 híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*. Alguns trabalhos demonstram relações distintas, nos quais a densidade da madeira foi superior na base das árvores em relação às posições subsequentes, mas nem sempre a madeira do topo é de menor densidade (ALZATE; FILHO; PIEDADE, 2005).

É importante destacar que, a posição do DAP das árvores, por ser ergonomicamente de fácil acesso e mais operacional, é largamente utilizada para retirada de amostras e representação das propriedades da madeira da árvore total. Pelos resultados encontrados, nem sempre esta é a melhor posição de amostragem, assim como detectado por Costa et al. (2017). Contudo, não significa que a posições de maior representatividade, como 75% da altura comercial em *E. urophylla*, apresente a melhor alternativa operacional para estudo da DB da madeira, sendo necessário a adoção de modelos matemáticos para estimativa da variável.

A variação da %casca no sentido base-topo para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* não seguiu um padrão, em que houve tanto acréscimo da base ao topo (02 e 04) quanto decréscimo (01 e 03). A maior parte das posições com ausência de diferenças significativas da média do fuste sugere que as posições mais ergonômicas podem ser adotadas para amostragem de estudo da

%casca em híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*. O padrão de decréscimo de teor de casca da base até 50% da altura comercial e acréscimo nas posições subsequentes em *E. urophylla* também foi identificado em outros estudos (SILVA et al., 2018). Mas, a ausência de diferenças significativas em relação à %casca média do fuste, seguido por menores valores absolutos, indicam que 0% e DAP podem ser adotadas como posições ideais de amostragem para determinação dessa variável.

O processo de cernificação da madeira consiste na morte das células do parênquima radial, consumo de amido, aumento no conteúdo de extrativos e tiloses, consumo de oxigênio e liberação de CO₂ com a finalidade de promover sustentação ao fuste (HIGUCHI,1997). De acordo com esta função de sustentação, a formação do cerne se inicia na parte central e na base do fuste e, desta forma, para obtenção de amostras para quantificação de %alburno e cerne, é preciso escolher uma posição que apresente representatividade de ambos.

Como a estrutura do alburno se encontra presente em todas as posições base-topo para os clones deste estudo, encontrar uma posição que se assemelhe à média do fuste se apresentou como uma opção ideal, em que as posições centrais de 25% a 75% não apresentaram diferenças significativas da %alburno média do fuste. Ao considerar modelos de regressão como opção para estimativa da %alburno média, a utilização de amostras em diferentes posições para os gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* evidenciou que a distribuição de alburno é diferente para os clones em questão.

Diferentemente da %alburno, a %cerne na madeira para estes materiais genéticos na idade de sete anos, ocorre no máximo até a altura de 50% e 75% para os clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*, respectivamente. Neste sentido, a metodologia de utilizar amostras de madeira de uma única posição não é ideal, pois a madeira de cada posição fica limitada a um valor expressivo ou inexistente de %cerne, sendo necessário estudar posições de amostragem diferentes das utilizadas nesta pesquisa. No entanto, o uso de modelos com alta precisão do DAP para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e na posição de 50% para *E. urophylla*, indica potencial para simplificação da amostragem.

2.4.2 Variação diametral de densidade aparente da madeira

Tanto para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* quanto para *E. urophylla* foi identificada a tendência de menores valores de DA nas porções centrais do fuste, próximas à medula. Estudos relatam que há ocorrência de menores valores de DA do lenho na região central, com aumento gradativo em direção à casca devido aos elementos de vasos de maior diâmetro e picos de densidade nas camadas de crescimento de fibras espessas, e menor diâmetro dos vasos (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

De acordo com os padrões de variação identificados neste estudo é possível inferir que em cada clone, existem alguns picos de densidades superiores às densidades médias, que ocorrem nas extremidades (base-topo e medula-casca) do fuste. Assim, ao definir o ponto de amostragem ideal é preciso ter cuidado de amostrar toda a seção diametral para que todas as faixas de DA sejam representadas.

2.5 CONCLUSÕES

Híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram maior variabilidade entre árvores para a densidade básica e porcentagens de casca, alburno e cerne, em relação ao *E. urophylla*, o que indicou a necessidade de inserção de técnicas no manejo florestal, ou melhor supervisão da formação de raízes das mudas para garantir a homogeneidade e menor variância da madeira. Nem sempre o DAP é a posição de amostragem mais representativa das propriedades médias das árvores de híbridos *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*. Em adição, cada clone apresentou uma posição ideal de amostragem.

A modelagem matemática é uma alternativa interessante na estimativa das propriedades médias do fuste, desde que sejam obtidas amostras em posições longitudinais adequadas. Em geral, a madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* é mais densa que a de *E. urophylla* em todas as posições do fuste, com tendências de variação base-topo específicas aos genótipos.

REFERÊNCIAS

ALBINO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação da densidade básica da madeira e produtividade de *Eucalyptus* spp. **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, Planaltina, DF. 1985.

ALMEIDA, R. A. *et al.* Variação da densidade básica no sentido base-topo da madeira de quatro espécies de eucalipto. **Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da FAIT**, Itapeva, SP, v. 10, n. 2, nov. 2017.

ALZATE, S. B. A.; FILHO, M.T.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, [s. l.], n. 68, p.87-95, ago. 2005.

ASPINWALL, M. J. *et al.* Genetic effects on stand-level uniformity and above- and belowground dry mass production in juvenile loblolly pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 4, p. 609-619, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.029>.

BARICHELO, L. E. G.; BRITO, J.O.; SILVA, F. G. Instruções para Coleta de Amostras de Madeira destinadas a Processos de Análises Químicas Laboratoriais. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF**, Piracicaba, SP, 2020. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2005_Intruzoes+Coleta+Madeira+Analises.pdf. Acesso em: 24 nov. 2021.

BINKLEY, D. *at al.* Explaining growth of trees and stands: changes in efficiency of light use through a rotation of *Eucalyptus* at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p.1704-1713, 2010.

BRAZ, R. L. *et al.* Deformação Residual Longitudinal de Clones de *Eucalyptus* em Local Sujeito a Ventos. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.028013>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/M5MLQqsyWbZR5QksrRDscsd/?lang=pt>. Acesso em: 01 fev. 2022.

COSTA, S. C. A. *et al.* Métodos de amostragem para determinação da densidade básica da madeira de eucalipto. *In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA*, 3., 2017. Florianópolis, SC. **Anais [...]**. Florianópolis, SC, UFSC, 2017.

DE ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, Espírito Santo, ES, v. 458, p. 117743, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>.

FLORES, D. M. M. *et al.* Amostragem de árvores para estudos tecnológicos da madeira para produção de celulose: tamanho da amostra, número mínimo de repetições, e variabilidade para as propriedades de um clone de *Eucalyptus Salignina* Smith. *In: 32º Congresso Anual de Celulose e Papel*. Santa Maria, RS, 1999.

HAKAMADA, R. E. *et al.* Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 43, n. 105, p. 27-39, mar. 2015. Disponível em:

<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr105/cap03.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. 1 ed. Springer Series in Wood Science. 1997. E-book. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60469-0>.

MAGALHÃES, L. G. S. *et al.* Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, PR, v. 6, n. 4, p.19435-19445, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-202>. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/8777/7518>. Acesso em: 01 fev. 2022.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4.ed. New York: New York: McGraw-Hill, 1980. E-book.

ROCHA, S. M. G. *et al.* Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in *Eucalyptus* clones of different species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 473, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>.

RYAN, M. G. *et al.* Factors controlling Eucalyptus productivity: how resource availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>.

SANGUMBE, L. M. V.; ALBERTO, L. U. J. Variação radial e longitudinal da densidade básica das madeiras de *Eucalyptus saligna* e de *Pinus radiata*. **Revista digital de Medio Ambiente “Ojeando la Agenda”**, Angola, nº66, 2020. Disponível em: <https://ojeandolaagenda.com/2020/07/31/variacao-radial-e-longitudinal-da-densidade-basica-das-madeiras-de-eucalyptus-saligna-e-de-pinus-radiata/>. Acesso em: 01 fev. 2022.

SETTE JÚNIOR, C. R. *et al.* Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* w.hill, aos 24 meses de idade. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 39, n. 3, p. 535-546, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ff.v39i3.15353>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/15353>. Acesso em: 01 fev. 2022.

SILVA, C. L. *et al.* Lenho e Casca de Eucalyptus e Acacia em Plantios Monoespecíficos e Consorciados. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 25, n.1 p. 1-8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.081914>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/mbb6n7vC5yjk6VHrxRsYC5N/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 01 fev. 2022.

SILVA, J. G. M.; ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B. Variabilidade da densidade da madeira de eucalipto. **Campo & Negócios**, 2022. Acesso em: 20 de janeiro de 2022 < <https://revistacampoenegocios.com.br/variabilidade-da-densidade-da-madeira-de-eucalipto/>>.

STAPE, J. L.; ROCHA, J. C.; DONATTI, Z. **Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz: 2000 a 2005**. 1. ed. Piracicaba: IPEF, 2006. 25p.

TOMAZELLO FILHO, M. *et al.* Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt Wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Chile, v.10, n. 2, p.139-149, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2008000200006>. Disponível em: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=s0718-221x2008000200006&script=sci_arttext&lng=en. Acesso em: 01 fev. 2022.

VIDAURRE, G. *et al.* Lenho Juvenil e Adulto e as Propriedades da Madeira. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.18, n. 4, p. 469-480, out./ dez. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2011.066>. Disponível em: <https://www.floram.org/journal/floram/article/doi/10.4322/floram.2011.066>. Acesso em: 01 fev. 2022.

3 CAPÍTULO 2

RELAÇÕES ANATÔMICAS E A SECAGEM NATURAL DA MADEIRA DE CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia torelliana* E *Corymbia citriodora*

Resumo

As relações anatômicas da madeira são mandatórias em diversos processos industriais e, a secagem natural das toras é diretamente influenciada por estas características. Os objetivos desta pesquisa foram: i) descrever as configurações anatômicas da madeira de clones de *Corymbia* e, ii) estratificar materiais genéticos com características anatômicas semelhantes e associá-las ao processo de secagem natural da madeira. Foram estudadas as madeiras de quatro clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* e um clone de *Eucalyptus urophylla*, aos sete anos de idade. As dimensões dos vasos, fibras e raios, densidade básica, percentagens de cerne, alburno e casca, e permeabilidade da madeira de cerne e alburno foram mensuradas. Curvas de secagem natural da madeira em toras foram ajustadas relacionando o teor de umidade e os dias de secagem. Os parâmetros de secagem avaliados foram a umidade inicial, tempo para eliminação dos teores de água livre, adsorvida e total, massa de água e calculados a relação DB/ Massa de água e percentagens de tempos de eliminação de água livre e água adsorvida. As dimensões das fibras, cerne e alburno foram as características que distinguiram os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* de *E. urophylla* e, dentre os clones de *Corymbia*, o teor de casca e permeabilidade da madeira separam os quatro clones em dois grupos. As madeiras de ambos os gêneros apresentam arranjos anatômicos de cerne e alburno distintos entre elas, como por exemplo, clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentam alburno com maior área de vasos e em *E. urophylla*, a maior área de vasos é encontrada no cerne. A secagem da madeira dos clones de *Corymbia* foi mais eficiente principalmente por apresentar menor quantidade de água a ser eliminada e, maior agilidade na eliminação da água livre. Os arranjos anatômicos da madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* favorecem o processo de secagem e sugerem os materiais genéticos como uma alternativa para a indústria florestal que deseja diminuir o tempo de secagem e estocagem da madeira em campo.

Palavras-chave: *Corymbia*, configurações anatômicas, área de vasos, água livre, cerne

3.1 INTRODUÇÃO

A estrutura e arranjo dos elementos anatômicos da madeira são características que, além de definir as propriedades da madeira, como a densidade, definem, também, como será a secagem do material, pois, designam os espaços em que a maior parte da água se encontra na madeira (CAI; ROSS, 2010). A eliminação da água presente na madeira é um dos processos mais importantes para garantir sua utilização na indústria de transformação e, além de impactar no tempo de estocagem, a quantidade de água presente na madeira, caso não seja eliminada, pode onerar o seu transporte e, acarretar características indesejáveis ao carvão vegetal (STRANDGARD et al., 2021).

A utilização das espécies do gênero *Corymbia* surgiu em alternativa às de espécies de *Eucalyptus* para indústria florestal, principalmente por serem tolerantes aos estresses hídrico, térmico e bióticos (GARDNER et al., 2007; LEE, 2007) e várias espécies possuem densidades mais elevadas que a madeira de eucalipto tradicionalmente cultivada no Brasil, favorecendo alguns processos industriais.

A secagem da madeira é o processo de eliminação da água até que se alcance a umidade desejada (REZENDE et al., 2010) e, a eliminação da água da madeira agrega valor à esta matéria-prima de forma que, diminui os custos com transporte, riscos ao ataque de patógenos e, para a indústria de carvão vegetal siderúrgico, proporciona melhoria na qualidade do produto e agilidade ao processo de carbonização (PLUMB et al., 1985; ZANUNCIO et al., 2014).

Existem diferentes tipos de água na madeira e são classificadas de acordo com o percentual de umidade e localização, em que se subdividem em água livre acima de 30% de umidade e está presente nos poros e cavidades, água adsorvida de 30% a 0% de umidade e é encontrada nas paredes celulares e, água de constituição 6% a 0% de umidade que fazem parte da constituição química (SIAU, 1971; SIAU, 1984). O arranjo, dimensões e proporções dos elementos anatômicos definem o teor de água disponível na madeira em função da condição do ambiente e da espécie. Madeiras mais densas, com fibras de paredes mais espessas e menor áreas de vasos, em geral, apresentam menor

umidade e, conseqüentemente, necessitam de menos tempo para eliminação de água em condições naturais (MONTEIRO et al., 2017).

O maior teor de cerne limita a agilidade do processo de secagem da madeira por possuir, em maior quantidade que no alburno, vasos impregnados por tilos e deposição de extrativos, dificultando a passagem da água do interior para o exterior das estruturas (JANMIN; LIPING, 1996). A madeira do gênero *Corymbia* possui maior velocidade de secagem do que a madeira do gênero *Eucalyptus*, principalmente por possuir menor teor de água na madeira recém-colhida (ZANUNCIO et al., 2013), além da madeira do gênero *Corymbia* possuir menor teor de cerne e, alburno mais permeável (REEDMAN et al., 2012).

Há inúmeras lacunas na caracterização da madeira do gênero *Corymbia* sendo umas das principais o conhecimento das características anatômicas e explicações sobre o processo de secagem natural da madeira em tora. Assim, os objetivos deste trabalho foram: i) entender as configurações anatômicas da madeira de clones de *Corymbia* e, ii) estratificar clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* que propiciem maiores eficiência e agilidade ao processo de secagem natural da madeira devido suas características anatômicas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo, amostragem e caracterização da madeira

Foram estudadas as madeiras de quatro clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* e um clone de *Eucalyptus urophylla* (05), aos 07 anos de idade, provenientes de um plantio experimental, no município de Bom Despacho, região leste de Minas Gerais, Brasil. A região apresentou temperatura média de 24,6°C e precipitação de 835 mm.ano⁻¹ entre os anos de 2012 a 2019. A área do plantio foi de 2,5 ha, sendo 0,5 ha para cada clone, com espaçamento de 4 x 1,75 metros e, para todos os clones foram adotados os mesmos manejos silviculturais. Na Tabela 1 estão descritas as características de crescimento dos clones.

Tabela 1 – Características de crescimento de quatro clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e um clone de *E. urophylla* aos sete anos de idade.

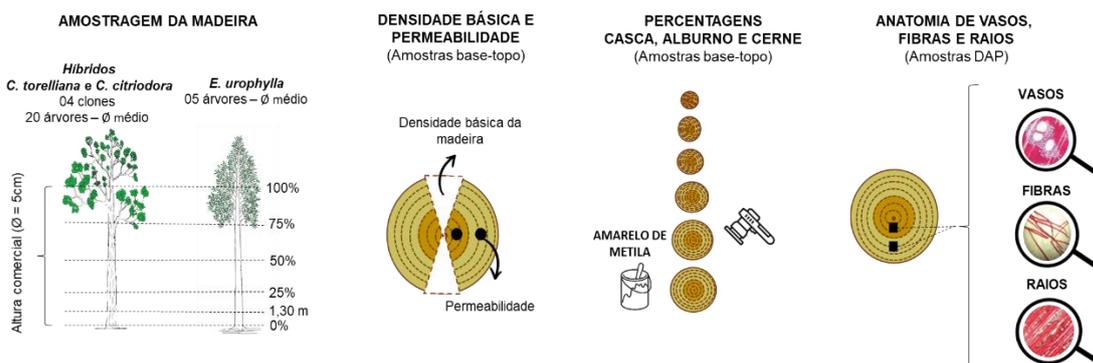
Clones	Espécies	Altura total (m)	Altura comercial (m)	DAPcc (cm)	DAPsc (cm)	Volume (m ³ .ha ⁻¹)
01	Ct x Cc	19,92	16,91	11,55	10,55	132.3
02	Ct x Cc	14,85	11,81	12,99	11,87	178.08

03	Cc x Ct	15,16	11,07	9,73	8,41	82.95
04	Cc x Ct	25,02	17,35	14,26	13,38	246.47
05	Eu	28,12	24,72	14,50	13,90	274.61

Ct: *Corymbia torelliana*; Cc: *Corymbia citriodora*; Eu: *Eucalyptus urophylla*; DAPcc: diâmetro a 1,30 metro com casca; DAPsc: diâmetro a 1,30 metro sem casca.

Foram colhidas 05 árvores de cada clone com diâmetro médio do plantio localizadas a partir das duas linhas de bordaduras. Procedeu-se a cubagem rigorosa pelo método de Smalian, em que se adotou 5 cm de diâmetro mínimo para determinação da altura comercial. Discos de 3 cm de espessura foram retirados em seis posições do fuste sendo elas, 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, além de uma amostra na posição do diâmetro a altura do peito (DAP) a 1,30 m do solo (Figura 1).

Figura 1 – Amostragem de discos de madeira e confecção de amostras para caracterização física e anatômica da madeira de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003), em que, foram retiradas cunhas opostas nos discos das seis posições e, determinou-se a densidade básica média de cada posição e, procedeu-se a ponderação pelo volume de cada secção, referente às seis posições, obtendo-se a densidade básica ponderada da árvore.

Os teores de casca, albúrnio e cerne na madeira foram determinados em discos das seis posições das árvores, polidos com lixas de grão nº 80 e, posterior, coloração com amarelo de metila (BRITO et al., 2019). Posteriormente, os discos foram fotografados e as áreas foram mensuradas pelo software Axiovisio, procedeu-se a ponderação pelo volume de cada secção, referente às seis posições, obtendo-se os teores de casca, albúrnio e cerne da árvore.

No disco do DAP de cada árvore foram retiradas amostras de 1 cm³ na parte central do cerne e do albúrnio para caracterização anatômica (Tabela 2),

que foi realizada conforme a International Association Wood Anatomists – IAWA Committee (1989) e da Comissão Panamericana de Normas Técnicas (COPANT, 1974). Após a mensuração dos elementos anatômicos no alburno e no cerne, para determinar a média referente à árvore, os valores foram ponderados de acordo com as percentagens de cerne e alburno na madeira.

Tabela 2 – Características anatômicas avaliadas e suas respectivas abreviaturas.

Características	Abreviatura	Unidade
Diâmetro tangencial dos vasos	DV	µm
Frequência de vasos	FV	n°.mm
Área de vasos ((π * (DV/2) ²)x FV)	AV	µm ² .mm
Largura da fibra	LF	µm
Altura da fibra	AF	µm
Diâmetro tangencial do lume da fibra	DLF	µm
Espessura de parede celular da fibra ((LF-DLF)/2)	EPF	µm
Altura do raio	AR	µm
Largura do raio	LR	µm
N°. de células do raio	NCR	n°.raio
Frequência de raios	FR	n°.mm

Para análise de permeabilidade da madeira à passagem de ar foram preparados cilindros com diâmetro aproximado de 17 mm e comprimento médio de 35 mm do alburno e do cerne, em cada posição longitudinal. As amostras foram retiradas com auxílio de uma serra copo. As laterais das amostras foram seladas com cola epóxi para garantir o fluxo apenas na direção longitudinal da amostra. A vazão de ar na amostra empregada na análise da permeabilidade da madeira foi determinada pelo método do fluxômetro, conforme descrito por Siau (1971) e adaptado por Baraúna (2010). Para a determinação da permeabilidade gasosa da madeira foi utilizada a equação abaixo, seguindo a lei de Darcy:

$$kg = \frac{Q \cdot L \cdot P_i}{A \cdot \Delta P \cdot P_m}$$

Em que: kg: permeabilidade ao gás (cm³/cm.atm.s); Q: volume do fluxo de gás que percorre o corpo de prova (cm³/s); L: comprimento da amostra (cm); Pi: pressão de entrada, a do ambiente (atm); A: área da seção transversal (cm²); ΔP: diferença de pressão (atm); Pm: média da pressão no corpo-de-prova (atm).

3.2.2 Secagem natural da madeira

A secagem natural da madeira dos quatro clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foi acompanhada durante 300 dias, por meio de pilhas de toras de madeira com altura de 1,5 m, sendo pilhas individuais para cada clone. A

umidade base seca (UBS) foi determinada a cada 30 dias em toras de 2.20 m de acordo com as classes diamétricas: 8 a 12 cm; 12 a 16 cm; 16 a 20 cm e 20 a 24 cm, em que ao final foram determinados valores médios entre as classes para cada clone, nos dias avaliados.

De acordo com as classes diamétricas de cada clone, foram selecionadas 6 toras, de cada classe diamétrica, alocadas na altura de 0,75 m na pilha de secagem, em seis quadrantes equidistantes (1 tora de cada classe por quadrante) para a retirada dos discos de 3 cm de espessura, nas posições de 0%, 50% e 100% da altura total da tora (2.20 m) para aferição da umidade a cada 30 dias, de acordo com a Figura 2. Para o clone 05, *E. urophylla*, foi utilizada uma curva de secagem padrão realizada e validada na empresa ArcelorMittal Bioflorestas, com dados internos da instituição e não divulgados.

Equações de regressão exponencial foram ajustadas para obtenção da umidade da madeira em função dos dias de secagem. Com a curva de secagem estabelecida para cada clone, obteve-se o tempo médio em dias de eliminação da água livre (TAL) adotando-se o PSF de 30% (SKAR, 1972), o tempo médio de saída da água adsorvida (TAA) adotando-se a umidade de equilíbrio em 12%, e, o tempo total de secagem da madeira (TT) que corresponde ao somatório de TAL e TAA.

Após o ajuste das equações de umidade e dias de secagem, o tempo necessário para eliminação da TAL, TAA e TT foram determinados pela identificação dos dias com os respectivos teores de umidade 30%, 12% e, o somatório de ambos. Foi determinada a taxa de secagem diária média, por meio da média diária de perda de água desde a umidade inicial até a secagem total (12%). Foram somadas as massas de água eliminadas diariamente até a umidade de equilíbrio e obteve-se a massa de água total (MAT). Determinou-se a relação entre a densidade básica da madeira e a massa de água e, ainda, a percentagem de tempo utilizada para eliminação da água livre e água de adesão. Figura 2 – Pilha de secagem e determinação de umidade da madeira.



3.2.3 Análises de dados

Todas as análises foram processadas no software R Studio versão 4.0.2 (R CORE TEAM, 2020). A experimentação foi organizada em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em que, os clones foram as fontes de variação e as árvores as repetições. Foram realizados os testes de Shapiro-Wilk e Cochran a Bartlett para verificação da normalidade e homogeneidade de variâncias, respectivamente.

As variáveis de caracterização da madeira foram submetidas à análise multivariada de componentes principais (PCA) para determinar a proximidade entre os clones e, identificar quais as variáveis que mais contribuem para as variações dos dados e semelhanças dos indivíduos (pacote Factoshiny, software estatístico R Studio).

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) entre os clones para todas as variáveis de caracterização da madeira e, também, entre as médias de cerne e alburno e, quando pertinente as médias foram submetidas ao teste de médias de scott-knott a 5% de significância.

Para cada clone foram testados diferentes modelos de regressão para geração da curva de secagem e, foram selecionados os melhores modelos de acordo com o maior R^2 e, os parâmetros da secagem foram identificados por meio da curva de secagem ajustada pelo modelo de regressão.

3.3. RESULTADOS

3.3.1 Características da madeira e da casca

Os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram em média, madeira 23% mais densa que *E. urophylla*. O clone 04, com progenitor feminino *C. citriodora*, apresentou madeira com densidade semelhante ao clone 02, híbrido com progenitor feminino *C. torelliana* que apresentou densidade mediana entre os demais. Embora o clone 03 tenha apresentado madeira menos densa entre os híbridos de *Corymbia*, ainda assim, foi 14% mais densa que a madeira de *E. urophylla* (Figura 3).

Embora os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram casca ligeiramente mais densa que a casca de *E. urophylla*, não houveram diferenças significativas. No entanto, a espessura e teor de cascas para os híbridos de

Corymbia 01, 02 e 03 foram respectivamente, 32% e 47 superiores que o clone 04, com progenitor feminino *C. citriodora* e *E. urophylla*, que foram iguais (Figura 3).

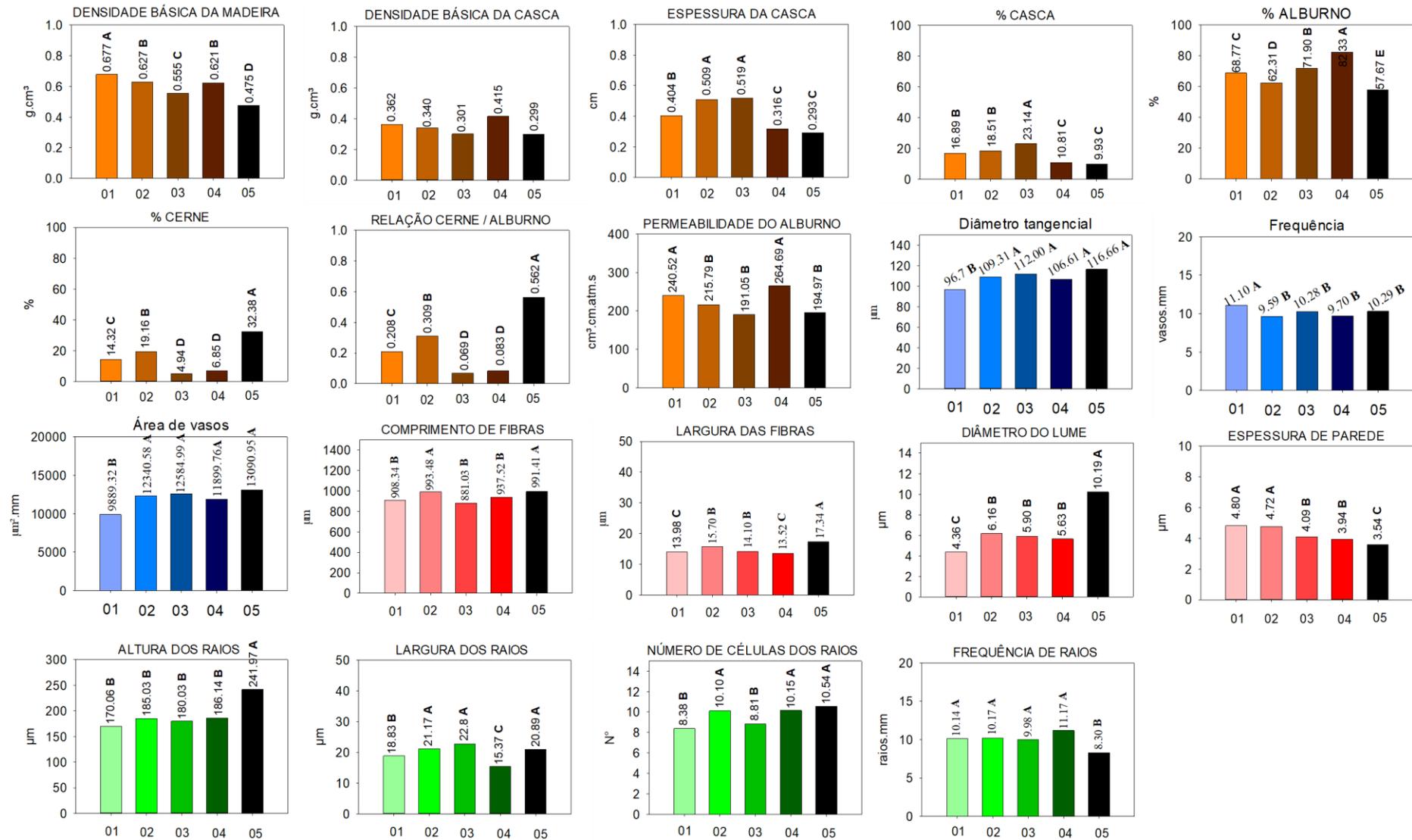
Todos os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foram marcados por apresentar em média três vezes menos cerne na madeira e 19% a mais em teor de alburno, o que resultou em na relação cerne/alburno 62% menor que para o clone 05, sendo esta menor para os clones 03 e 04, clones de menor percentagem de cerne na madeira (Figura 3). Em valores absolutos, três dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram madeira de alburno mais permeável que a madeira de *E. urophylla* (05), no entanto, apenas os clones 01 e 04, apresentaram maiores permeabilidades do alburno, sendo este último clone o de maior percentagem de alburno (Figura 3).

Apenas o clone 01, híbrido de *C. torelliana* e *C. citriodora*, apresentou configurações anatômicas de vasos diferente dos demais, em que, apresentou menor diâmetro tangencial de vasos e maior frequência destes, resultado em uma menor área de vasos. Não foi identificada diferença significativa nestas propriedades para os mais híbridos de *Corymbia* e *E. urophylla* (Figura 3).

Os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram em média fibras 7% mais curtas, 16% menos largas, com diâmetro de lume 45% menor e com parede 16% mais espessas que o clone 05 de *E. urophylla* (Figura 3), em destaque o clone 01 que apresentou menor área de vasos e maior espessura de parede de fibras e madeira mais densa (Figura 3).

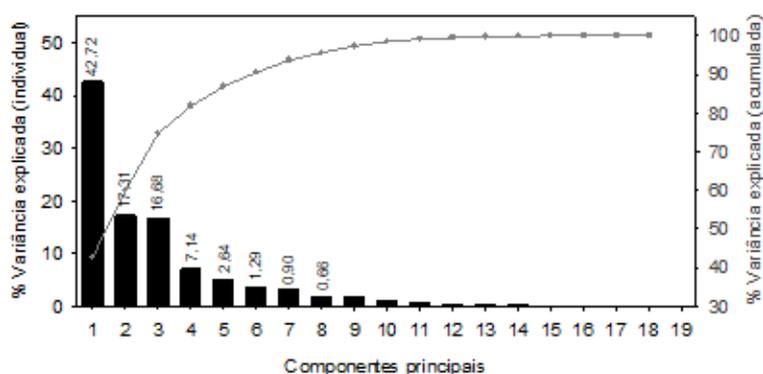
Os raios da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foram 25% mais curtos e 17% mais frequentes que os da madeira dos clones 05 de *E. urophylla*, no entanto, para a largura e número de células dos raios, apenas o clone 01 apresentou menores valores que na madeira de *E. urophylla* em ambas as propriedades (Figura 3).

Figura 3 – Densidade básica e anatomia da madeira de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



O primeiro e o segundo componente da análise de componentes principais explicaram 42,72% e 17,31%, respectivamente, da variação das características anatômicas da madeira, totalizando 60% da variação total, portanto, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nessas duas componentes principais (Figura 3).

Figura 3 – Variâncias individuais e acumuladas explicadas na análise multivariada por componentes principais de propriedades físicas e anatômicas da madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



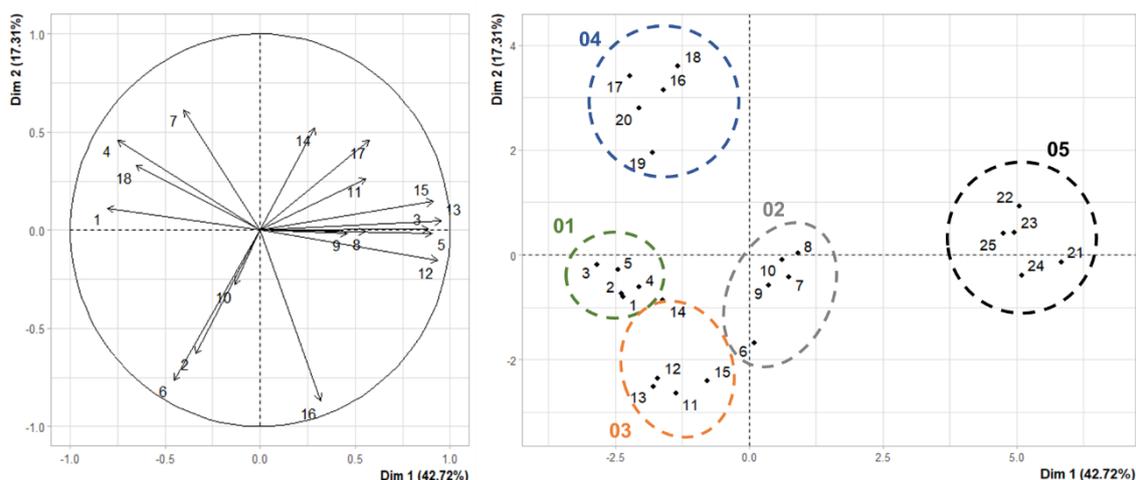
No primeiro componente, o diâmetro do lume, largura das fibras, percentagem de alburno e relação cerne e alburno, apresentaram as maiores contribuições relativas e, no segundo componente, a largura dos raios, percentagem de casca e permeabilidade do alburno, apresentaram maiores contribuições relativas (Tabela 3).

Tabela 3 – Autovetores e contribuições das variáveis originais na análise multivariada por componentes principais de propriedades físicas e anatômicas da madeira de cones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*

Variáveis	Componente 1		Componente 2	
	Autovetores	Contr. (%)	Autovetores	Contr. (%)
1 - Densidade básica da madeira	-0.80	8.41	0.11	0.40
2 - Espessura da casca	-0.34	1.51	-0.63	12.71*
3 - % Cerne	0.88	10.17*	0,00	0,00
4 - % Alburno	-0.75	7.31	0.46	6.69
5 - Cerne/Alburno	0.90	10.65*	-0.02	0.01
6 - % Casca	-0.45	2.69	-0.77	18.84*
7 - Permeabilidade do alburno	-0.4	2.1	0.61	12.06*
8 - Diâmetro tangencial dos vasos	0.56	4.01	-0.01	0,00
9 - Área de vasos	0.46	2.73	-0.02	0.01
10 - Frequência de vasos	-0.13	0.22	-0.027	2.43
11 - Comprimento das fibras	0.56	4.01	0.26	2.20
12 - Largura das fibras	0.93	11.32*	-0.15	0.74
13 - Diâmetro do lume	0.95	11.82*	0.05	0.07
14 - Espessura da parede das fibras	0.29	1.08	0.52	8.71*
15 - Altura dos raios	0.91	10.76*	0.15	0.68
16 - Largura dos raios	0.32	1.32	-0.87	24.21*
17 - N°. de células dos raios	0.58	4.32	0.46	6.76
18 - Frequência de raios	-0.66	5.58	0.33	3.47

Os cinco clones se comportaram de forma distinta quanto às características anatômicas, em que, no eixo x, houve maior distância entre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* para o clone de *E. urophylla* e, no eixo y, houve maior distanciamento entre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* (Figura 4).

Figura 4 – A) Gráfico de contribuição das características da madeira em cada eixo; B) Distribuição dos clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* na análise de componentes principais (PCA).



1 - Densidade básica da madeira; 2 - Espessura da casca; 3 - % Cerne; 4 - % Alburno; 5 - Cerne/Alburno; 6 - % Casca; 7 - Permeabilidade do alburno; 8 - Diâmetro tangencial dos vasos; 9 - Área de vasos; 10 - Frequência de vasos; 11 - Comprimento das fibras; 12 - Largura das fibras; 13 - Diâmetro do lume; 14 - Espessura da parede das fibras; 15 - Altura dos raios; 16 - Largura dos raios; 17 - N°. de células dos raios; 18 - Frequência de raios

No eixo x, nas coordenadas positivas, o *E. urophylla* se diferenciou dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, principalmente, por apresentar maiores valores de largura das fibras, relação C/A, percentagem de cerne, diâmetro do lume dos vasos, altura dos raios, comprimento das fibras e diâmetro dos vasos, ao passo que apresentou, menores valores de percentagem de alburno, densidade básica da madeira, frequência de raios e permeabilidade do alburno (Figura 4).

No eixo y, nas coordenadas positivas, a maior distinção foi entre os diferentes híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, em que, o clone 04 se diferenciou dos demais clones, principalmente por apresentar maiores valores para percentagem e permeabilidade do alburno e número de raios, ao passo que nas coordenadas negativas, os menores valores foram para espessura e percentagem de cascas e largura dos raios (Figura 4).

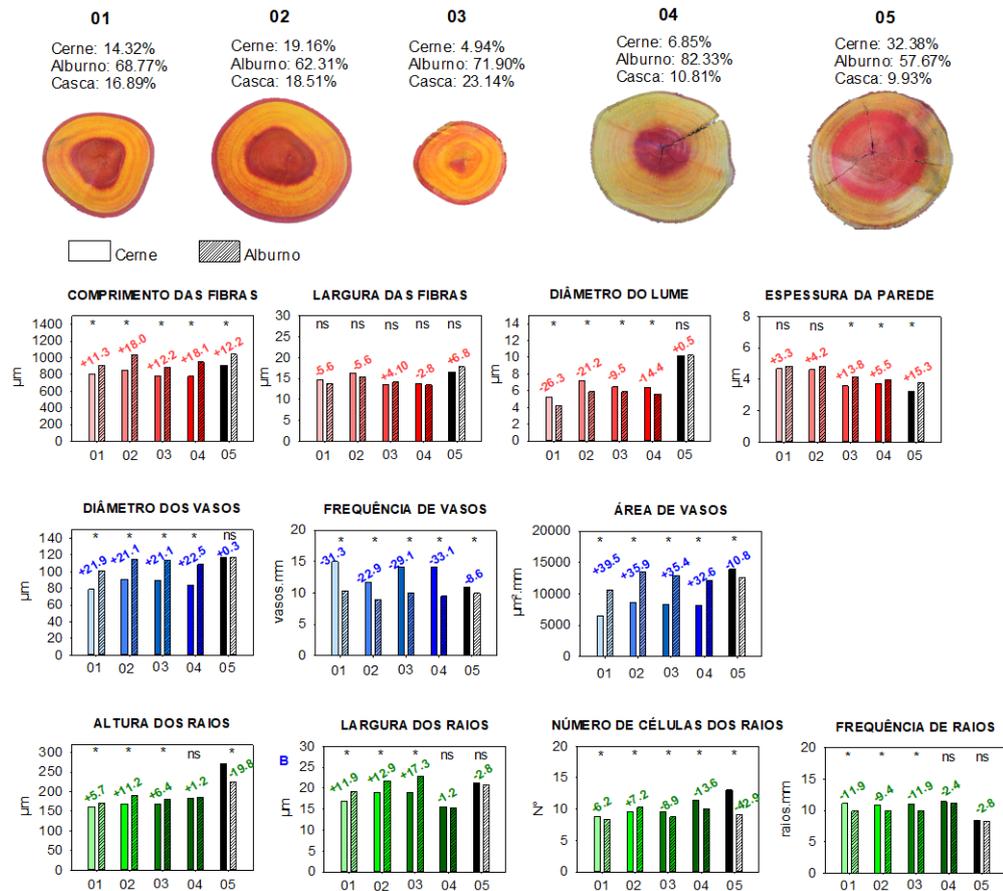
A alta contribuição das porcentagens de cerne e alborno para explicar a variação entre as características anatômicas dos clones na análise de componentes principais foram delineados na Figura 5, em que, estão descritas as diferenças entre valores de cada característica anatômica no cerne e no alborno.

O *E. urophylla* apresenta em média 65% a mais de cerne que a madeira dos clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, as diferenças entre as dimensões dos elementos anatômicos das estruturas de cerne e alborno, neste clone, a madeira do cerne possui fibras 12,2% mais curtas, com paredes 15,3% menos espessas, vasos 8,6% mais frequentes, área 10,8% maior e raios 19,8% mais altos e com 42,8% a mais de células em suas estruturas (Figura 5).

Em média, 71% do fuste dos clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* é constituída por alborno. Em relação à madeira de cerne, o alborno dos clones do gênero *Corymbia* apresentaram em média fibras 15,2% mais compridas, diâmetro de lume 17,7% maiores e com paredes 7% mais espessas. Os vasos do alborno apresentaram diâmetros 21,7% maiores e foram 30% menos frequentes, o que culminou em 36% a mais em área de vasos. Os raios do alborno foram em média 4% mais altos e 14% mais largos com, 10,3% a menos de células e 9% menos frequentes (Figura 5).

De acordo com as diferenças de dimensões dos elementos anatômicos da madeira de cerne e alborno para os dois gêneros, ambos apresentaram diferentes estratégias anatômicas. Na madeira do *E. urophylla* não houve alterações do diâmetro do lume das fibras, diâmetro dos vasos, altura, largura e frequência dos raios entre as madeiras de cerne e alborno. Já, para os clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, houve diminuição no diâmetro do lume das fibras e frequência dos raios, aumento do diâmetro e área de vasos e, altura e largura dos raios, da madeira de cerne para a madeira de alborno (Figura 5).

Figura 5 – A) Gráficos de diferenças de características físicas e anatômicas das madeiras de alburno e cerne dos clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* na análise de componentes principais (PCA).

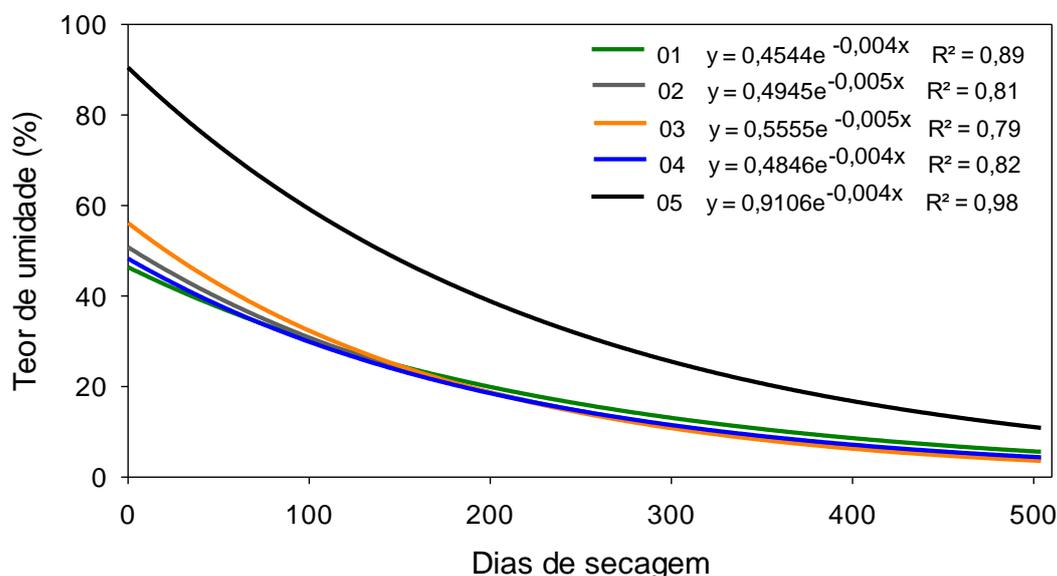


O* em cada clone indica significância do teste F a 5%.

3.3.2 Secagem natural da madeira de clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*

Os modelos de regressão para estimar a curva de secagem da madeira para híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram em média R^2 de 0,83 e RMSE de 6,25%, enquanto o modelo para *E. urophylla* apresentou R^2 de 0,98 e RMSE de 3,98% (Figura 6).

Figura 6 – Curvas de secagem e modelos de regressão exponencial para estimativa de teor de umidade base seca da madeira em relação aos dias de secagem para clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



As madeiras dos clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram umidades iniciais de 28% a 45% menores que a umidade inicial da madeira de *E. urophylla* e, entre os clones de *Corymbia*, os clones com madeira mais densa apresentaram menores teores de umidade em ordem decrescente e crescente, de densidade e umidade da madeira, sendo 01, 02, 04 e 03, respectivamente, com a mesma ordem observada para a área de vasos (Tabela 4).

Tabela 4 – Secagem natural da madeira em tora para clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.

Variáveis	Clones				
	01	02	03	04	05
UI (%)	52.53%	57.08%	69.37%	59.72%	97.00%
Dias secagem - TAL	102	105	113	114	261
Dias secagem - TAA	218	183	167	183	218
Dias secagem - TT	320	288	280	297	479
Taxa (%.dia)	0.11%	0.14%	0.17%	0.14%	0.14%
Massa de água total - 12% (kg.m ³)	232.9	243.1	236.9	249.53	372.8
Massa de madeira (kg.m ³)	678,0	627,0	537,0	608,0	475,0
Relação DB / massa de água	2.91	2.58	2.27	2.44	1.27
% Tempo de secagem (TAL)	32%	36%	40%	38%	54%
% Tempo de secagem (TAA)	68%	64%	60%	62%	46%

UI: Umidade inicial; TAL: Taxa de água livre; TAA: Taxa de água adsorvida; TT: Taxa de água total.

O tempo de eliminação das taxas de água livre (até 30%) para madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foi em média 40% menor que para a madeira de *E. urophylla*, em que, variou entre 102 a 114 dias, e, para a madeira de *E. urophylla* foram necessários 261 dias (Tabela 4). Os clones 01 e 02

apresentaram madeiras 12% mais densas, com 12% a menos de alburno e diminuição em 12% nas áreas de vasos. Isso resultou em madeiras com 10% a menos de umidade inicial que os demais clones e, conseqüentemente, 10 dias de agilidade na eliminação da taxa de água livre (Tabela 4). A quantidade de dias necessários para eliminação da água adsorvida da madeira (30% a 12%) foram semelhantes entre os cinco clones, em que, os clones de *Corymbia* levaram em média 30 dias a menos que o *E. urophylla* para a eliminação da TAA (Tabela 4).

Destaca-se a diferença entre as estratégias de secagem da madeira dos dois gêneros em que, a madeira dos clones de *Corymbia* apresentou em média 36% do seu período de secagem para eliminação da água livre e 64% para eliminação da água adsorvida, e, a madeira de *E. urophylla* utilizou 54% do seu período de secagem para eliminação da água livre e 46% para eliminação da água adsorvida. Estes resultados corroboram com as diferenças anatômicas entre os gêneros, as madeiras dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* com fibras de paredes 20% mais espessas e maiores percentagens de alburno apresentam maiores dificuldades na eliminação da água adsorvida, já o *E. urophylla*, apresenta maior dificuldade na eliminação da água livre por possuir maior umidade inicial, maior teor de cerne, estrutura com maior quantidade de vasos obstruídos por tiloses.

O tempo total de secagem da madeira entre os gêneros diferiram em média de 182 dias com taxas de secagem diárias similares, sendo as maiores diferenças pronunciadas em menos dias e maiores taxas de secagem para a eliminação da água livre na madeira de *Corymbia* em comparação à madeira de *Eucalyptus*.

Por fim, a relação entre a densidade da madeira e massa de água variou entre 2,27 a 2,91 para as madeiras dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e 1,27 para o *E. urophylla*, evidenciando que na madeira dos clones de *Corymbia*, o espaço é ocupado em maior parte por componentes da madeira e, no *E. urophylla* o espaço ocupado por madeira e água são quase equivalentes (Tabela 4).

3.4. DISCUSSÃO

3.4.1 Características da madeira e da casca

Algumas propriedades da madeira como densidade e teor de cerne têm ganhado destaque como importantes características para diferenciar as madeiras de espécies do gênero *Corymbia* das madeiras de espécies do gênero *Eucalyptus* (LOPES et al., 2017). Neste estudo, o menor teor de cerne foi determinante para diferenciar a madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* da madeira de *E. urophylla* e, embora a densidade não tenha sido a variável de maior contribuição para esta distinção, as características das fibras, que são altamente correlacionadas com a densidade da madeira (GONÇALEZ et al., 2014), contribuíram fortemente para diferenciar a madeira de *C. torelliana* e *C. citriodora* da madeira de *E. urophylla* (Figura 4).

A densidade da madeira mais elevada nos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* em relação a *E. urophylla*, pode ser atribuída em grande parte, às maiores espessuras de parede da fibra e menores áreas de vasos, esta relação é evidenciada principalmente para os clones 01 e 02, em que a combinação das duas características impulsionou para produção de madeira mais densa com a maior quantidade de espaços preenchidos por fibras.

O teor de cerne e alburno na madeira é influenciado pela idade, resposta ecofisiológica da planta ao ritmo de crescimento e condições ambientais (GOMINHO; PEREIRA, 2005; BEAUCHAMPET al., 2012; ALMEIDA et al., 2020). Foi evidenciado que a madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentaram maior teor de alburno que a madeira de *E. urophylla*, neste sentido, menor formação de cerne nos clones de *Corymbia* pode ser atribuída à sua maior tolerância aos estresses ambientais em que, por apresentar a copa das árvores mais densa (WARING et al., 1982; RIBCHOAUD; MATHVEN, 1992; ÁVILA, 2020), necessita-se de maior quantidade de madeira com vasos condutores ativos (alburno) para realizar a condução de água.

A variabilidade diametral das propriedades anatômicas influencia a formação de cerne e alburno na madeira, que, expõe as diferenças entre a madeira dos clones de *Corymbia* e *E. urophylla*. A madeira de *E. urophylla* apresenta alburno com fibras mais longas, de paredes mais espessas, menor área de vasos e raios mais delgados, estas configurações resultam em maior densidade básica da madeira nesta região (ALZATE et al., 2009; COSTA et al., 2017). Somados ao maior teor de alburno, os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, apresentaram alburno com fibras de menores lumes, maior área de

vasos e raios mais largos, culminando em acréscimo na densidade básica média da madeira e aumento da permeabilidade ao ar nesta região.

As dimensões dos vasos condutores é um dos fatores de maior influência na permeabilidade da madeira ao fluxo de ar e líquidos (ENGELUND et al., 2013; KEDROV, 2012). Souza et al. (2017) identificaram permeabilidade nula no cerne, para madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* e relatam que, dois fatores podem ter contribuído para o comportamento: alta impregnação dos vasos por tiloses ou queima dos poros ao preparar o material. Neste estudo, a permeabilidade nula do cerne foi relatada para todos os clones, resultado que confirma a impermeabilidade desta estrutura devido a possível impregnação das células por tiloses.

A área de vasos desobstruídos e as cavidades celulares entre os raios são responsáveis pela maior permeabilidade ao ar no sentido longitudinal e radial da madeira de alburno (PERRÉ et al., 1996; MOUCHOT et al., 2006; SILVA, 2007). A maior área de vasos no alburno dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e raios mais finos e mais frequentes em relação a *E. urophylla*, foram responsáveis pela maior permeabilidade atribuída, possibilitaram maior quantidade de cavidades desobstruídas com menores impedimentos físicos.

As particularidades anatômicas da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* como madeiras mais densas, vasos com maiores dimensões no alburno, fibras com paredes mais espessas, raios delgados e frequentes e, conseqüentemente, madeira com maior permeabilidade longitudinal, proporcionam comportamento distinto no processo de eliminação de água da madeira em que, não apenas o tempo de secagem pode ser modificado, mas, também o tempo de eliminação para cada tipo de água presente na madeira.

3.4.2 Secagem natural da madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*

Todos os clones apresentaram modelos de teor de umidade em relação aos dias de secagem com boas estatísticas de precisão, sugerindo alto potencial para utilização dos modelos exponenciais para estimar a umidade da madeira na secagem natural em toras para híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*. A curva comportamental da secagem da madeira para ambos os gêneros é caracterizada por maiores taxas de secagem antes do PSF e,

consequente, diminuição destas taxas abaixo do PSF (KOLLMANN; COTÊ, 1968; SANTOS; JANKOWSKY; ANDRADE, 2003).

A menor umidade inicial na madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* em relação à madeira de *E. urophylla*, pode ser justificada pela maior densidade básica e, impacta todas as etapas do processo de secagem da madeira, de forma distinta entre os dois gêneros. Para o gênero *Eucalyptus*, madeiras com maiores densidades são frequentemente associadas à secagem mais dificultada (OLIVEIRA et al., 2005; REZENDE et al., 2010; ZANUNCIO et al., 2014), mas, para o gênero *Corymbia* esse comportamento não é claro. Embora seja mais densa, a madeira de espécies *Corymbia* apresenta menor umidade inicial, o que ocasiona a redução de tempo da eliminação de água, mesmo com taxas de secagem diárias em percentagem semelhantes às das madeiras de *E. urophylla*.

A literatura aborda que, o aumento da densidade da madeira torna a secagem mais lenta, principalmente a devido à eliminação da água adsorvida, pois, paredes de fibras mais espessas, possibilitam menor difusão do vapor de água, no entanto, não é seguro esta associação entre madeiras de gêneros e espécies diferentes. Esta tendência foi reforçada aos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, em que, embora tenham apresentado maior agilidade no tempo total de secagem, a eliminação da água adsorvida necessitou de maior investimento de tempo, devido principalmente às paredes das fibras serem mais espessas.

A relação existente entre as características anatômicas da madeira e sua capacidade de secagem é considerada como a capacidade da madeira apresentar ou não impedimentos físicos para eliminação de água (REDMAN et al., 2012). Como exemplo temos que, na eliminação da água livre por meio da capilaridade as tiloses encontradas em vasos da madeira de cerne funcionam como impedimento físico, e, na eliminação da água adsorvida, por meio de difusão, fibras com paredes mais espessas podem dificultar a passagem das moléculas de água (MOUCHOT; ZOULALIAN, 2003; MONTEIRO et al., 2017).

Neste sentido, a madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, por apresentar menor teor de cerne que a madeira de *E. urophylla*, e conseqüentemente menor quantidade de vasos obstruídos e, maior teor de alburn, com maiores áreas de vasos a eliminação da água livre foi mais ágil. Para ambos os gêneros a eliminação da água adsorvida apresenta velocidades

semelhantes, mas por fatores diferentes, em que, na madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, esta eliminação se torna mais lenta devido ao impedimento físico de maior espessura da parede das fibras e, no *E. urophylla* por apresentar maior carga de água a ser eliminada, uma vez que sua umidade natural da árvore é mais elevada.

De maneira geral, madeiras que apresentam maior permeabilidade possuem secagem mais rápida, principalmente da água livre, pois o movimento axial é o mais influenciado por esta propriedade (REZENDE, 2009; SANTOS et al., 2002). Monteiro et al. (2020) identificaram que o fluxo de água na madeira de *C. citriodora* na direção longitudinal é 2 vezes maior que na seção radial e 3 vezes maior que na seção tangencial e, ainda que, o fluxo de água livre nesta espécie é em média 10 vezes maior que o de água adsorvida. Já para o *Eucalyptus*, indicam que o fluxo de água livre é em torno de 4 a 6 vezes maior que o de água adsorvida (ZEN et al., 2019; MONTEIRO et al., 2017).

O alburno da madeira dos quatro híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foi mais permeável que o alburno da madeira de *E. urophylla*. Além da maior permeabilidade, os clones de *Corymbia* possuem também uma maior quantidade de alburno, células desobstruídas que colaboram para eliminação de água por capilaridade de forma mais facilitada.

A relação entre a densidade da madeira e a massa de água presente em suas estruturas, nos fornece uma ideia da ocupação de uma carga pelo material de interesse. À medida que esta relação se torna maior há maior quantidade de massa de madeira por m³ em relação à massa de água, gerando ganhos econômicos em diversas etapas da cadeia produtiva, como planejamento de áreas de plantio, transporte e processos de transformação. Neste sentido, a madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, apresentou relação DB/massa de água 100% maior que a madeira de *E. urophylla*, evidenciando o potencial como alternativa para diminuição de custos na cadeia produtiva. Dentre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* esta relação foi crescente à medida que houve acréscimo na densidade básica da madeira.

As configurações anatômicas da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* favorecem o processo de secagem em relação à madeira de *E. urophylla*. É preciso entender também suas limitações em que, este gênero apresenta maior agilidade na eliminação da água livre, com ganhos significativos no tempo de secagem, já na eliminação da água adsorvida, o tempo de secagem

da madeira destes clones se torna semelhante ao tempo de secagem da madeira de *E. urophylla*.

3.5 CONCLUSÕES

A madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentam dimensões dos elementos anatômicos e configurações distintas da madeira de *E. urophylla*, em que, os clones de *Corymbia* tem madeira menos porosa, com fibras de paredes mais espessas, raios delgados e numerosos e menor teor de cerne. Além disso, ao sopesar sobre o teor de cerne e alburno, a madeira de *Corymbia* apresenta alburno com fibras de paredes mais espessas e maior área de vasos ao passo que a madeira de *E. urophylla* apresenta cerne com fibra de parede menos espessa e maior área de vasos, e, estes percentuais configuram a madeira de *Corymbia* como mais densa e permeável.

A maior agilidade na secagem total da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* em relação ao *E. urophylla* ocorre na eliminação da água livre, principalmente pelos fatores de menor teor de umidade inicial e maior permeabilidade do alburno, porção de maior ocorrência na madeira de *Corymbia*. Embora a quantidade de água adsorvida seja maior na madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, o tempo de eliminação é semelhante ao tempo utilizado pela madeira de *E. urophylla*, inferindo que, a secagem da madeira dos clones de *Corymbia* é mais eficiente para indústrias que desejem trabalhar com madeira em teor de umidade próximo ao PSF (30%).

As configurações anatômicas da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, relacionadas à maior agilidade no processo de secagem, revelam seu potencial para ganhos em custo benefício da cadeia produtiva em que, podem oferecer vantagens no transporte da madeira pela menor carga de água e menor tempo de estocagem da madeira em campo devido à secagem mais ágil.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 458, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>.

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

ÁVILA, P. A. D. **Aspectos morfofisiológicos da copa e do sistema radicular de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* com diferentes tolerâncias à deficiência hídrica**. 2020. Tese (Doutorado em Ciências, programa: Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

ALZATE, S. B. A. Estrutura anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus*. **Investigaciones Aplicadas**, Bolívia, v. 3, n. 5, p. 1-14, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/7153>. Acesso em: 01 fev. 2022.

BEUCHAMPET, K. *et al.* The regulation of sapwood area, water transport and heartwood formation in Sitka spruce. **Plant Ecology & Diversity**, [s. l.], v. 6, n.1, p. 45-56, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/17550874.2012.702359>.

BRITO, A. S. *et al.* Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of Eucalyptus wood. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.037818>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/LVc5qM6cYtpqQy78wbBcmJj/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 01 fev. 2022.

CAI, Z.; SENALIK, C.A.; ROSS, R.J. **Capítulo 12: Propriedades mecânicas de materiais compostos à base de madeira**. *In*: Manual de madeira - madeira como material de engenharia. Relatório Técnico Geral FPL-GTR-282. Madison, WI: Departamento de Agricultura dos EUA, Serviço Florestal, Laboratório de Produtos Florestais. 2021. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/62260>. Acesso em: 01 fev. 2022.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - COPANT. **Método para la descripción de características generales, macroscópicas de las maderas angiospermas dicotiledóneas**. Santiago, v. 30, p. 1-19, 1974.

COSTA, L. J. *et al.* Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.45, n.116, p. 629 – 639, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.04>. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr116/cap04.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ENGELUND, E.T. *et al.* A critical discussion of the physics of wood - water interactions. **Wood Science and Technology**, [s.l.], v. 47, p. 141-161, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0514-7>.

GARDNER, R. A.; LITTLE, K. M.; ARBUTHNOT, A. Wood and fibre productivity potential of promising new eucalypt species for coastal Zululand, South Africa. **Australian Forestry**, Austrália, v. 70, n. 1, p. 37-47, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2007.10676261>.

GOMINHO, J.; PEREIRA, H. The influence of tree spacing in heartwood content in *Eucalyptus globulus* labill. **Wood and Fiber Science**, Lisboa, v. 37, n. 4, p. 582-590, 2005.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, mar. 2014. Disponível em: [Wood-Fiber-size-and-density-relationship-along-the-stem-of-Eucalyptus-urograndis.pdf](#) (researchgate.net). Acesso em: 01 fev. 2022.

WHEELER, E.; GASSON, P. IAWA list of microscopic features for hardwood identification: with an Appendix on non-anatomical information **IAWA BULLETIN N.S**, Holanda, v. 10, n. 3, p. 221-332, 1989. Disponível em: [Hardwood List](#) (iawa-website.org).

JIANMIN, C., LIPING, C. An analysis of heat and mass transfer phenomenon in wood during drying. **J. Northeast For.** Harbin, China, v. 7, p. 62-65, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02843247>.

KEDROV, G.B. Functioning wood. **Wulfenia**, [s. l.], v. 19, p. 57 - 95, 2012. Disponível em: [Wulfenia_19_0057-0095.pdf](#) (zobodat.at). Acesso em: 01 fev. 2022.

KOLLMANN, F. P.; CÔTÉ JR, W. A. **Principles of wood science and technology**. 1. ed. New York: **Solid wood I**, 1968. E-book. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>.

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**, Australia, v. 70, n. 1, p. 11-16, 2007. DOI: 10.1080/00049158.2007.10676256.

MONTEIRO, T.C. *et al.* Fluxo de água em diferentes direções na madeira de *Corymbia citriodora*. **Maderas, Ciencia y tecnologia**, Chile, v. 22, n. 3, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000312>.

MONTEIRO, T. C. *et al.* Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 493-505, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n115.07>. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr115/cap07.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

MOUCHOT, N. *et al.* Characterization of diffusionnal transfers of bound water and water vapor in beech and spruce. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Chile, v. 8, n.3, p.139-147, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2006000300001>

MOUCHOT, N.; ZOULALIAN, A. Détermination des caractéristiques diffusionnelles de transfert d'un solute gazeux adsorbable au sein d'un milieu poreux. Aplicação au cas de la vapeur d'eau au sein du bois de hêtre. **Can. J.**

Chem. Eng. v. 83, p. 328-335. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450830220>.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMASELLO, M.; SILVA, J. C. RESISTÊNCIA NATURAL DA MADEIRA DE SETE ESPÉCIES DE EUCALIPTO AO APODRECIMENTO. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 993-998, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000600019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/NncNcSVZLjknKBdSNYh8d9R/abstract/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 01 fev. 2022

PERRÉ, P.; ZOHOUN, S.; BRANDÃO, A. Détermination de la diffusivité massique en regime permanent: résultats d'une campagne de mesure sur différentes essences tempérées et tropicales. *In: SCIENCES ET INDUSTRIES DU BOIS*. Nancy, France, **Anais [...]**, 1996.

PLUMB, O. A., SPOLEKT, G. A., OLMSTEAD, B. A. Heat and mass transfer in wood during drying. **[International Journal of Heat and Mass Transfer](#)**, Estados Unidos, v. 28, n. 9, p. 1669–1678, set.1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90141-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90141-3).

REDMAN, A. L. *et al.* Mass transfer properties (permeability and mass diffusivity) of four australian hardwood species. **BioResources**, [s.l.], v.7, n. 3, p. 3410-3424, 2012.

REZENDE, R. N. *et al.* Air drying of logs from an *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 565-572, out./ dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000400016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/zxMwclDPQ5JW3L4HrgFsRWy/?lang=en>. Acesso em: 01 fev. 2022.

REZENDE, R.N. **Secagem de toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

RIBCHOAUD, E.; MATHVEN, I. The applicability of the pipe model theory for the predictions of foliage biomass in threes for natural, untreated black spruce stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v. 22, n. 8, p. 1118-1123, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1139/x92-148>.

SANTOS, G.R.V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestali**, Piracicaba, n. 63, p. 214-220, jun. 2003.

SANTOS, G.R.V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* [Hill ex Maiden]**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2002.

SIAU, J.F. **Flow in wood**. 1. ed. Estados Unidos: Syracuse University Press, 1971.

SIAU, J.F. **Transport processes in wood**. 1. ed. New York: Springer Wood Science, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69213-0>. E-book.

SOUZA, P. P *et al.* Permeabilidade longitudinal das madeiras de *E. pilularis*, *E. cloeziana*, *C. citriodora* e *Toona ciliata*. *In*: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 3., 2017, Florianópolis, SC. **Anais [...]**, Florianópolis, SC, UFSC, 2017.

SKAAR, B. **Water in wood**. 1. ed. Estados Unidos: Syracuse University Press, 1972.

STRANDGARD, M. *et al.* Use of modelling to compare the impact of roadside drying of *Pinus radiata* D.Don logs and logging residues on delivered costs using high capacity trucks in Australia. **Biomass and Bioenergy**, Australia, v. 147, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106000>.

WARING, R. H.; SCHROEDER, P. E.; OREN, R. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v. 12, n. 3, p. 556-560, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1139/x82-086>.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Secagem ao ar livre da madeira para produção de Carvão Vegetal. **Floresta e Ambiente**, Lavras, MG, v. 21, n. 3, p. 401-408, jul./set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.028713>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/KRz8Y7xNfWmvZJ9d6sLRqZC/?lang=pt>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ZANUNCIO, A.J.V. *et al.* Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestali**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 353-360, set. 2013. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr99/cap06.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

3 CAPÍTULO 3

CRESCIMENTO, QUALIDADE DA MADEIRA E PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL DE HÍBRIDOS DE *Corymbia torelliana* E *Corymbia citriodora* PARA O RANQUEAMENTO DE CLONES

Resumo

A reatividade do carvão vegetal ao dióxido de carbono é uma propriedade importante para mensurar a qualidade do carvão vegetal de uso siderúrgico. Encontrar materiais genéticos que produzam carvão vegetal menos reativo é um gargalo da indústria florestal. Os objetivos desta pesquisa foram ranquear os clones quanto à reatividade do carvão vegetal ao CO₂ e verificar as diferenças de crescimento, qualidade da madeira e propriedades do carvão vegetal entre os clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* e, qual dos grupos de variáveis possibilitam ranqueamento semelhante ao da reatividade do carvão vegetal. Foram estudados quatro clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e um clone de *E. urophylla* (controle), todos aos sete anos de idade, plantados em Bom Despacho – MG. Determinou-se a reatividade do carvão vegetal ao CO₂ e estudaram-se as características de crescimento (diâmetro, altura, volume, incremento médio anual, com e sem casca, e biomassa do fuste), características de qualidade da madeira (densidade, casca, cerne/alburno, química estrutural, química imediata, relação S/G, índice de cristalinidade e poder calorífico) e, propriedades do carvão vegetal (densidades a granel, verdadeira e aparente, granulometria, composição imediata, poder calorífico e porosidade). Foi realizado o ranqueamento dos clones por meio da reatividade do carvão vegetal e, para cada grupo de variáveis. Por meio da análise de componentes principais foi realizado o agrupamento dos clones e identificadas as variáveis de maior influência para diferenciação entre eles. O carvão vegetal oriundo da madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* pode ser de 8% a 42% menos reativo que o carvão vegetal de *E. urophylla*, delimitando também diferenças significativas de reatividades para o carvão vegetal de diferentes híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*. Dentre os três grupos de características, o estudo das propriedades do carvão vegetal é mais eficiente para ranqueamento de todos os clones em relação ao ranqueamento pela reatividade.

Palavras-chave: reatividade do carvão vegetal, novos clones de *Corymbia*; biorredutor, siderurgia

3.1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por carvão vegetal na siderurgia é um fato crescente, pela produtividade e economia envolvida nesse processo de conversão e pela renovabilidade do processo (ANDRADE et al., 2018; BRASIL, 2017). Mas, qual o desafio na seleção de espécies e materiais genéticos compatíveis com a produção de carvão vegetal como biorredutor siderúrgico? Primordialmente, deseja-se a seleção de espécies que produzam carvão vegetal com alto rendimento e características que beneficiem seu comportamento em alto forno, como por exemplo, a menor reatividade do carvão vegetal ao dióxido de carbono, pois assim esta matéria-prima cumpre com o tempo ideal para realização do processo de redução.

O gênero *Corymbia* recentemente foi reclassificado do gênero *Eucalyptus* por apresentar diferenças filogenéticas e cladísticas e, principalmente impossibilidade de hibridação com espécies de *Eucalyptus* (WHITAU et al., 2017; LADIGES et al., 2010; HILL; JOHNSON, 1995) outras características que diferenciam os gêneros são menor crescimento volumétrico e maior densidade básica da madeira de *Corymbia* (MOURA, 2001) que, quando combinados resultam em produção de biomassa compatível às espécies de *Eucalyptus*. Apesar de todas as informações das espécies de *Corymbia*, pesquisas que destaquem as principais diferenças entre o crescimento e qualidade da madeira e do carvão vegetal de híbridos dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* são escassas. Os ganhos em termos de eficiência energética e/ou econômica que o emprego correto desse novo gênero proporciona à cadeia produtiva e qualidade do carvão vegetal são pouco conhecidos mundialmente.

A comparação entre os dois gêneros não é a única chave para obtenção de maior eficiência, mas a correta estratificação de materiais genéticos favorece a escolha de melhores clones para o investimento. Assim, a combinação entre crescimento, qualidade da madeira e do carvão vegetal, tem mostrado significativos resultados nas características do produto final (HSING et al., 2016; PROTÁSIO, 2016; TRUGILHO et al., 2001).

A maior densidade da madeira é apontada como responsável pelas propriedades físicas e mecânicas do carvão vegetal, como por exemplo, sua densidade. Carvão vegetal mais denso em geral, contribui para maior concentração de carbono fixo por m³, e proporciona menor consumo específico

na redução do minério de ferro no alto-forno, contribuindo para maximização da produção de ferro gusa (ISBAEX, 2018; ASSIS et al., 2015; BISWAS et al., 2011). Mas, dentre diversas características, quais são mais relevantes para diferenciação dos clones?

Estudos têm destacado o rendimento gravimétrico satisfatório em carvão vegetal e sua alta densidade, quando produzido com madeira de *Corymbia* (PERES et al., 2019; COSTA et al., 2017; MOUTINHO et al., 2017). Logo, clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* tem se apresentado como alternativa viável para produção de carvão vegetal siderúrgico, pois a alta densidade da madeira, entre 0,550 e 0,650 g.cm³, proporciona alta densidade e resistência mecânica ao carvão vegetal (COUTO et al., 2015; LOUREIRO et al., 2019).

Entender e quantificar os ganhos em qualidade do carvão vegetal oriundo de novas espécies, como os híbridos de *Corymbia*, com características de crescimento e qualidade da madeira distintas de *Eucalyptus*. É um desafio que deve ser explorado para oferecer respostas conclusivas de como garantir maior eficiência nas cadeias produtivas do ferro gusa e aço e, entender que, o planejamento deve começar na escolha correta do material genético a ser plantado.

Os objetivos do trabalho foram: i) identificar e quantificar os ganhos na utilização da madeira de *Corymbia* para produção de carvão vegetal em relação ao *Eucalyptus*, ii) identificar a influência das características dendrométricas, da madeira e do carvão vegetal na diferenciação dos gêneros e a relação entre os grupos de características.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área e materiais de estudo

Foram estudados o crescimento, qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* (01, 02, 3 e 04) e um clone de *Eucalyptus urophylla* (05) aos 07 anos de idade, provenientes de um plantio experimental, no município de Bom Despacho, região leste de Minas Gerais, Brasil. A região apresentou temperatura média de 24,6°C e precipitação de 835 mm.ano⁻¹ entre os anos de 2012 a 2019. A área do plantio foi de 2,5 ha, sendo 0,5 ha para cada clone, com espaçamento de 4 x 1,75 metros

e, para todos os clones foram adotados os mesmos manejos silviculturais. Na Tabela 1 estão descritas a características de crescimento dos clones.

Tabela 1 – Características de crescimento de quatro clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e um clone de *E. urophylla* aos sete anos de idade.

Clones	Espécies	Altura total (m)	Altura comercial (m)	DAPcc (cm)	DAPsc (cm)	Volume (m ³ .ha ⁻¹)
01	Ct x Cc	19,92	16,91	11,55	10,55	132.3
02	Ct x Cc	14,85	11,81	12,99	11,87	178.08
03	Cc x Ct	15,16	11,07	9,73	8,41	82.95
04	Cc x Ct	25,02	17,35	14,26	13,38	246.47
05	Eu	28,12	24,72	14,50	13,90	274.61

Em que: Ct = *Corymbia torelliana*; Cc = *Corymbia citriodora*; Eu = *Eucalyptus urophylla*; DAPcc = diâmetro a 1,30 metro com casca; DAPsc = diâmetro a 1,30 metro sem casca.

Foram colhidas cinco árvores de cada clone com diâmetro médio do plantio. Procedeu-se a cubagem rigorosa pelo método de Smalian, em que se adotou 5 cm de diâmetro mínimo para determinação da altura comercial. Discos de 3 cm de espessura foram retirados em seis posições do fuste sendo elas, 0, 1,30 m, 25, 50 e 75 e 100% da altura comercial.

3.2.2 Caracterização do crescimento e qualidade da madeira

As características de crescimento para os cinco clones foram representadas pela determinação do diâmetro a altura do peito com e sem cascas, altura total, altura comercial com diâmetro mínimo de 5 cm, altura da copa, volume e incremento médio anual com e sem cascas. A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a com a NBR 11941 (ABNT, 2003), em que, foram retiradas cunhas opostas nos discos das seis posições e, determinou-se a densidade básica média de cada posição e, procedeu-se a ponderação pelo volume de cada secção, referente às seis posições, obtendo-se a densidade básica ponderada da árvore, de acordo com a metodologia proposta por Mendes et al. (1999).

Os teores de casca, alburno e cerne na madeira foram determinados em discos das seis posições das árvores, polidos com lixas de grão n° 80 e posterior coloração com amarelo de metila (BRITO et al., 2019). Posteriormente, os discos foram fotografados e as áreas foram mensuradas pelo software Axiovisio, procedeu-se a ponderação pelo volume de cada secção, referente às seis posições, obtendo-se os teores de casca, alburno e cerne da árvore (SANTOS et al., 2021).

Foram moídas amostras de madeira das seis posições ao longo do fuste e, obteve-se a serragem composta em granulometria entre 40 e 60 mesh, de acordo com a norma TAPPI T 257 cm-85, para realização das análises químicas. A análise química molecular para determinação de teores de extrativos (solubilidade em ???, ???? e água quente), lignina e holocelulose foi realizada pelas metodologias propostas pelas normas TAPPI T 264 cm-97, TAPPI T 280 pm-99 e teor de lignina Klason pelos procedimentos determinados por Gomide; Demuner (1986). A relação siringil/guaiacil foi realizada por meio da cromatografia líquida após oxidação da serragem da madeira com nitrobenzeno, conforme Lin e Dence (1992). A separação dos produtos da oxidação por nitrobenzeno foi alcançada utilizando-se uma coluna LC-18. A fase móvel usada foi acetonitrila/água (1:6 v/v) com pH igual a 2,6, tamponado com ácido trifluoroacético (TFA), detecção: UV, 280 nm, T=40°C, fluxo: 1,0 mL minuto⁻¹, injeção 20µl; padrão cromatográfico: vanilina para guaiacil e siringaldeído para siringil. A pressão utilizada foi de, aproximadamente, 160 kgf cm⁻².

A análise imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) da madeira foi realizada de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986) e o poder calorífico superior (PCS) de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984). O índice de cristalinidade da madeira foi determinado por meio da leitura de amostras compostas de madeira classificadas em 150 mesh em difratômetro de raios-X (marca RIGAKU). Os difratogramas foram obtidos, utilizando-se radiação Cu (k) e comprimento de onda 1542 Å (k). As medidas foram realizadas em varredura horizontal contínua, à velocidade de 2° min⁻¹, no intervalo angular de 5 - 50° para o ângulo de espalhamento 2 (Ângulo de Bragg), operando a uma potência de 40 mA e 40 KV (MWAIKAMBO; ANSELL, 2002).

3.2.3 Carbonização e caracterização do carvão vegetal

Para cada material genético foram realizadas duas carbonizações em forno industrial retangular tipo AM32, com dimensões de 32 metros de comprimento, 5 metros de largura e 4 metros de altura das paredes, e 1,27 m de flecha na cúpula, com capacidade volumétrica de enforamento de 320 m³ de madeira com casca. A temperatura de carbonização foi monitorada, online, via sistema supervisorio, por meio de doze termopares posicionados nas paredes laterais e na copa a cada 3,5 m de comprimento. O aquecimento do forno de carbonização foi iniciado simultaneamente por 8 ignitores, posicionados na parte

inferior do forno, próximo ao piso. O fechamento dos ignitores foi realizado com base na temperatura média da copa, da seguinte forma: a) aos 150°C, 50% dos ignitores foram fechados, b) aos 200°C, 75% dos ignitores foram fechados, c) 250°C, 90% dos ignitores foram fechados, d) 280°C, 100% dos ignitores foram vedados.

As temperaturas médias máximas registradas na copa do forno, parede com chaminé e parede sem chaminé, durante a carbonização foram de 325°C, 165°C e 150°C, respectivamente. A madeira enfiada apresentou umidade entre 13 e 15% na base seca. A temperatura final de carbonização foi de 300°C, e a temperatura de abertura do forno foi de 38°C. O ciclo de produção do carvão vegetal em média 14,6 dias, sendo em torno de 5 dias de carbonização e 10 dias de resfriamento para os cinco clones estudados, de acordo com a Tabela 2.

Clones	Umidade da madeira enfiada (%)	Ciclo total de carbonização (Dias)	Carbonização (Dias)	Resfriamento (Dias)
01	13,8	15,0	4,5	10,5
02	13,8	12,1	3,1	8,9
03	15,8	14,5	4,7	9,8
04	14,7	16,5	5,1	11,3
05	14,8	14,8	4,8	10,0

A reatividade do carvão vegetal para os cinco clones foi determinada em partículas de carvão vegetal com granulometria de 19 a 22 mm submetidas ao gás CO₂ numa vazão de 3 L min⁻¹ e temperatura mantida constante em 800 °C, durante 60 min, de acordo com a metodologia proposta por Fraga (2020).

O carvão vegetal foi caracterizado quanto ao seu rendimento gravimétrico, em que foi dimensionada a razão entre o o volume de carvão vegetal produzido e o volume de madeira enfiada, o consumo específico de madeira em m³ para produzir uma tonelada e carvão vegetal, a sua densidade a granel (DG, t.m³); percentagem de finos (%) por meio do teste de friabilidade; distribuição granulométrica (carvão vegetal grosso (CVG, %); carvão vegetal médio (CVM, %); finos (finos, %), friabilidade (Fr, %); teor de materiais voláteis (MTV, %), carbono fixo (CF, t.m³), cinzas (CZ, %); e carbono fixo (CF, %), poder calorífico superior (PCS, kcal kg⁻¹); densidade verdadeira (Dv, kg.m³); densidade aparente (Da, kg.m³) e porosidade (Po, %).

A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada de acordo com a NBR 6922 (ABNT, 1981), a distribuição granulométrica de acordo com a NBR 7402 (ABNT, 1982) em que foi considerado carvão grosso que ficou retido nas

peneiras de 63 mm e 25 mm, o carvão médio o que ficou retido nas peneiras de 19 mm a 9,5 mm e os finos a fração com granulometria menor que 9,5 mm. A friabilidade do carvão vegetal de acordo com a NBR 8740 (ABNT, 1985). A análise imediata seguiu a metodologia da NBR 8112 (ABNT, 1986) e o poder calorífico de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984). A densidade verdadeira, aparente e a porosidade do carvão vegetal foram determinadas de acordo com a NBR 9165 (ABNT, 1985).

3.2.4 Análise de dados

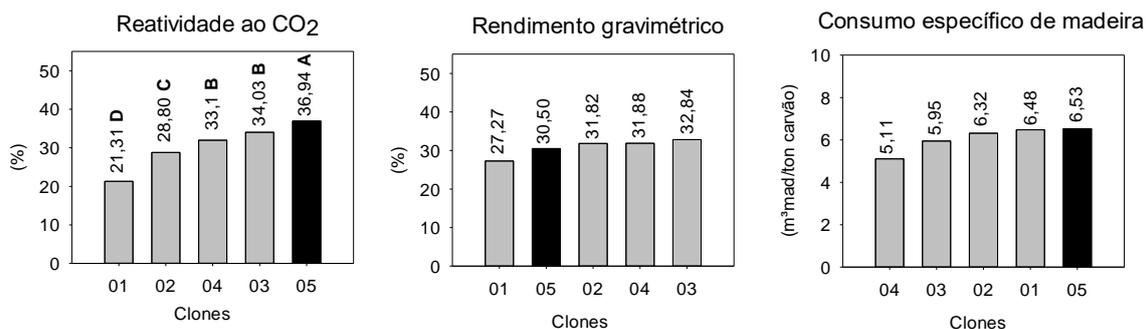
Os dados de características de crescimento, qualidade da madeira e propriedades do carvão vegetal foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett para verificação das pressuposições de normalidade e homocedasticidade, respectivamente. Depois os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quanto pertinente, as médias foram comparadas por meio da aplicação do teste Scott Knott a 95% de probabilidade.

Com a finalidade de extratificação dos clones, cada grupo de variáveis foi submetido à análise de componentes principais (PCA) em que foram determinadas as variáveis de maior influência para distinção dos clones, bem como o agrupamento dos mesmos, utilizando como repetições os valores para as árvores individuais.

3.3 RESULTADOS

O carvão vegetal oriundo da madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* pode ser de 8% a 42% menos reativo que o carvão vegetal de *E. urophylla*, delimitando também diferenças significativas de reatividades para o carvão vegetal dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* (Figura 2). Em média, o carvão vegetal dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foram 21% menos reativos à ação do gás CO₂ que o carvão vegetal proveniente da madeira de *E. urophylla*.

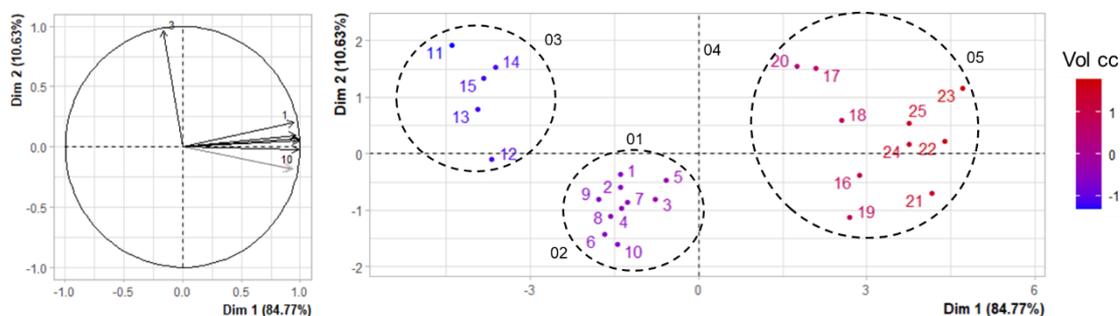
Figura 2 – Reatividade do carvão vegetal dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* ao gás CO₂.



Os clones 02, 04 e 03, híbridos de *Corymbia* apresentaram maiores rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e conseqüentemente menores consumos específicos de madeira para carbonização, com exceção para o clone 01. (Figura 2).

O primeiro e o segundo componente da análise de componentes principais explicaram 84,77% e 10,63%, respectivamente, da variação das características de crescimento, totalizando 95,40% da variação total, portanto, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nessas duas componentes principais (Figura 3).

Figura 3 – A) Gráfico de contribuição das variáveis de crescimento em cada eixo; B) Distribuição dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* na análise de componentes principais (PCA).



Vol cc: Volume com casca (m³.ha)

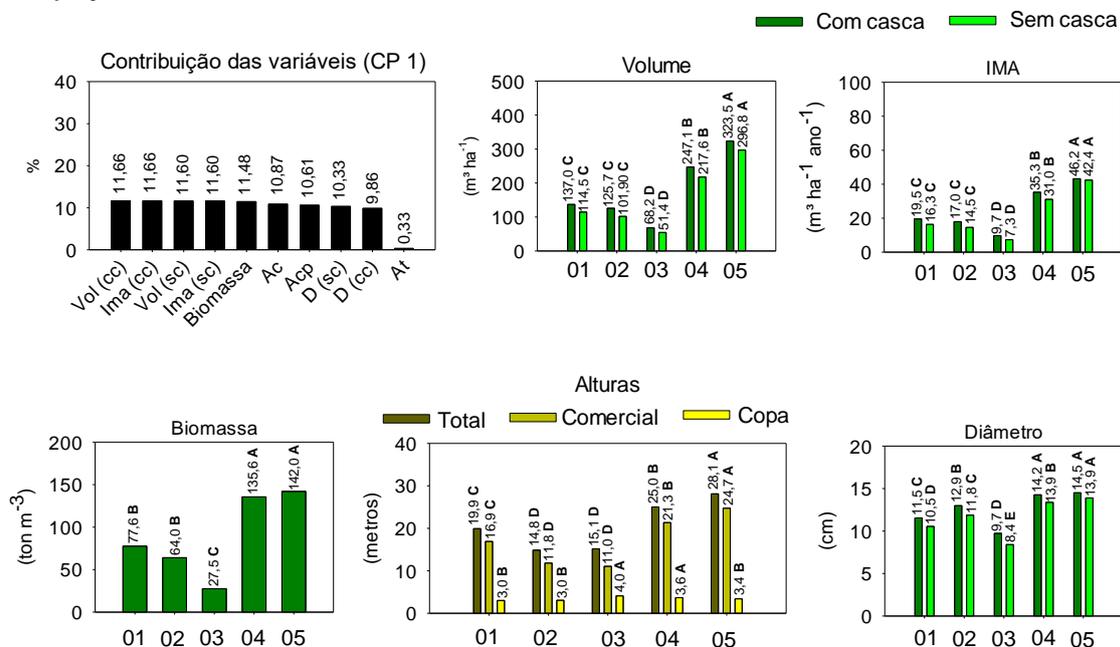
1: Altura total (m); 2: Altura comercial (m); 3: Altura da copa (m); 4: Diâmetro a 1,30 m com cas (cm); 5: Diâmetro a 1,30 m sem casca (cm); 6: Volume com casca (m³.ha); 7: Volume sem casca (m³.ha); 8: Incremento médio anual com casca (m³.ha.ano⁻¹); 9: Incremento médio anual sem casca (m³.ha.ano⁻¹); 10: Biomassa de madeira (ton.m³).

Na primeira dimensão, os clones formaram três grupos, em que, para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, o clone 03 foi distinto dos demais, 01 e 02 foram semelhantes e, 04 foi semelhante ao clone de *E. urophylla*, classificação entre os clones, distinta da proposta pelos valores de reatividade (Figura 2).

Na primeira componente, quase todas as variáveis apresentaram contribuições semelhantes para distinção entre os clones, em que, a produção volumétrica e IMA com casca foram as de maiores contribuições (Figura 4). Para

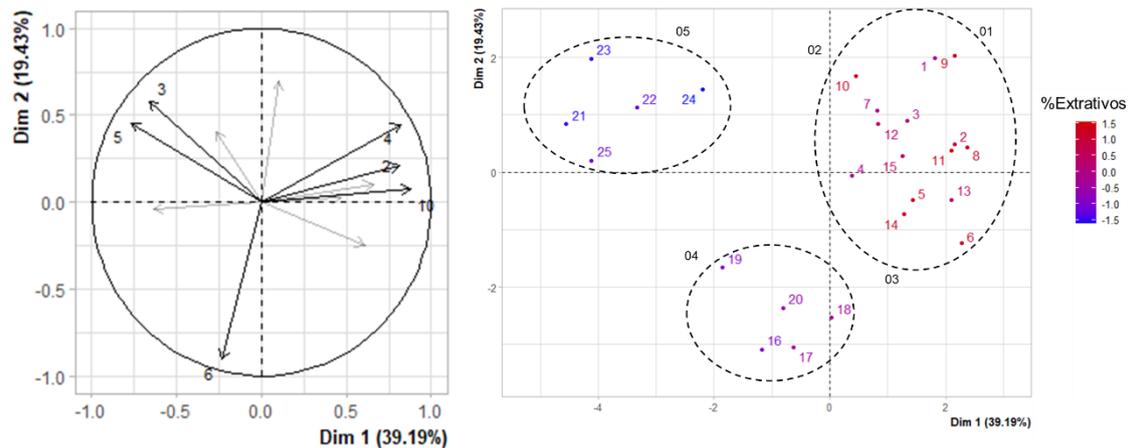
todas as variáveis de crescimento, os clones apresentaram o mesmo padrão de agrupamento, em que o clone 03 foi distinto dos demais, 01 e 02 foram semelhantes entre si e, 04 foi semelhante ao clone 05 de *E. urophylla* (Figura 4)

Figura 4 - Contribuição das variáveis no primeiro componente principal e características de crescimento dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



O primeiro e o segundo componente da análise de componentes principais explicaram 39,19% e 19,43%, respectivamente, da variação das características de qualidade da madeira, totalizando 58,62% da variação total, em que, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nesses dois primeiros componentes principais (Figura 5).

Figura 5 – A) Gráfico de contribuição das variáveis de qualidade da madeira em cada eixo; B) Distribuição dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* na análise de componentes principais (PCA).

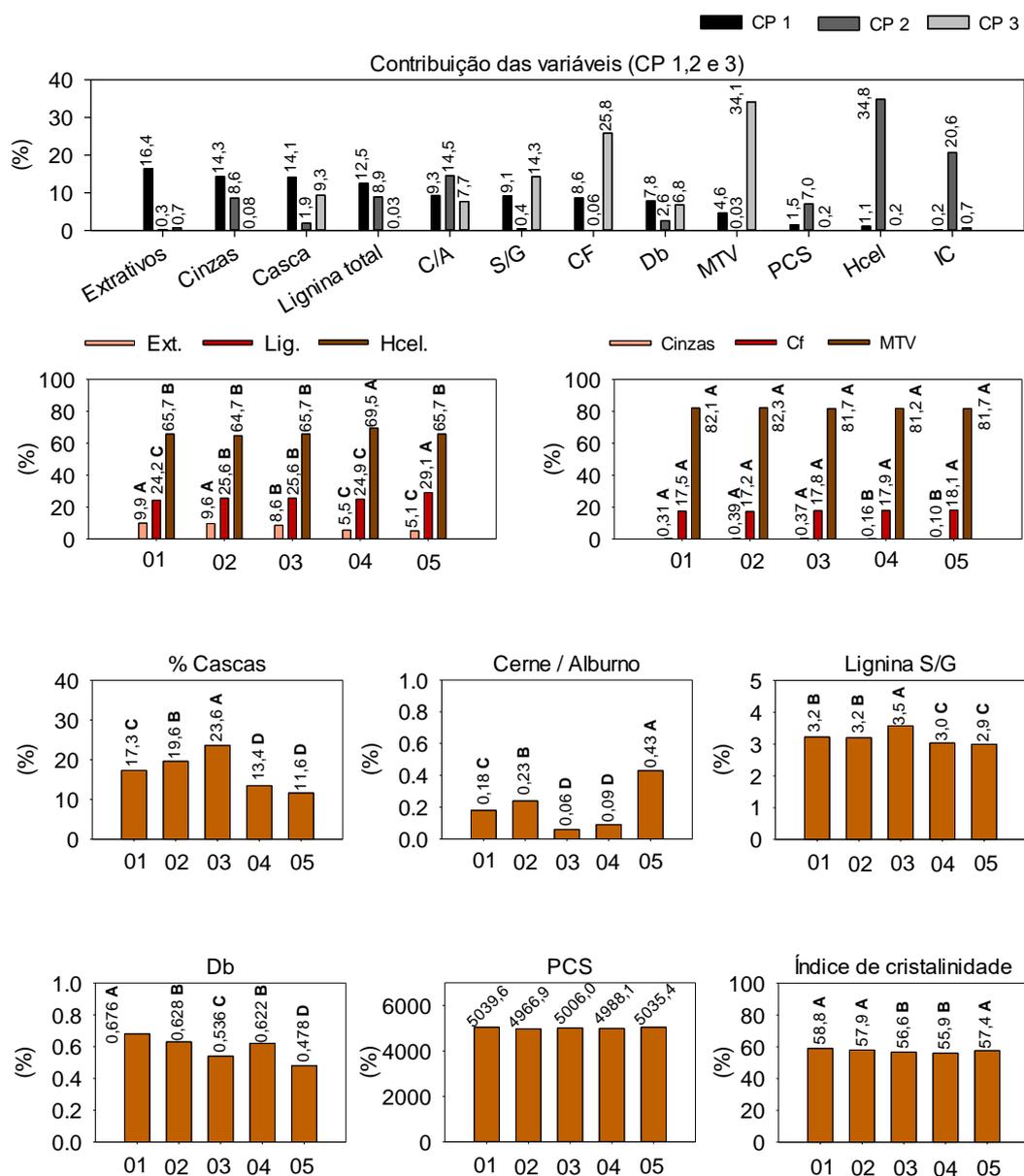


1: Densidade básica da madeira (g.cm³); 2: % de casca; 3: Relação cerne / alburno; 4: % extrativos totais; 5: % de lignina total; 6: % de holoceluloses; 7: Índice de cristalinidade (%); 8: Relação lignina siringil / lignina guaiacil; 9: Materiais voláteis (%); 10: % de cinzas; 11: % de carbono fixo; 12: Poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹).

Os clones formaram três grupos em que, o *E. urophylla* (05) foi distinto dos demais e, dentre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, 01, 02 e 03 foram semelhantes, distinguindo-se do 04, esta classificação foi distinta da proposta pela reatividade e análise de componentes principais das características de crescimento (Figura 5).

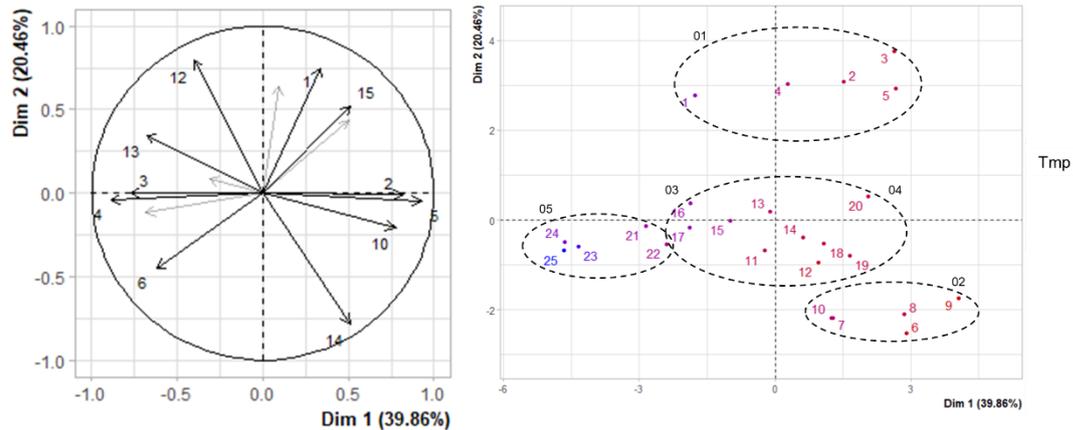
A variável de maior contribuição para a distinção dos clones no componente 1, foi o teor de extrativos (Figura 6). A distinção entre os grupos foi demarcada principalmente pelos maiores valores de extrativos, teor de cascas e cinzas atribuídos aos clones 01, 02 e 03, maior teor de holoceluloses ao 04 e, maiores teores de lignina total, relação c/a e carbono fixo na madeira do 05, clone de *E. urophylla*. Dentre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* o 04 se diferenciou dos demais principalmente pelos menores teores de casca, cinzas e extrativos e maior teor de holoceluloses (Figuras 5 e 6).

Figura 6 - Gráfico de contribuição das variáveis no primeiro, segundo e terceiro componentes principais e gráficos de características de qualidade da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



O primeiro e o segundo componente da análise de componentes principais explicaram 39,86% e 20,46%, respectivamente, da variação das características de qualidade da madeira, totalizando 60,32% da variação total, em que, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nesses dois primeiros componentes principais (Figura 7).

Figura 7 – A) Gráfico de contribuição das propriedades do carvão vegetal em cada eixo; B) Distribuição dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla* na análise de componentes principais (PCA).



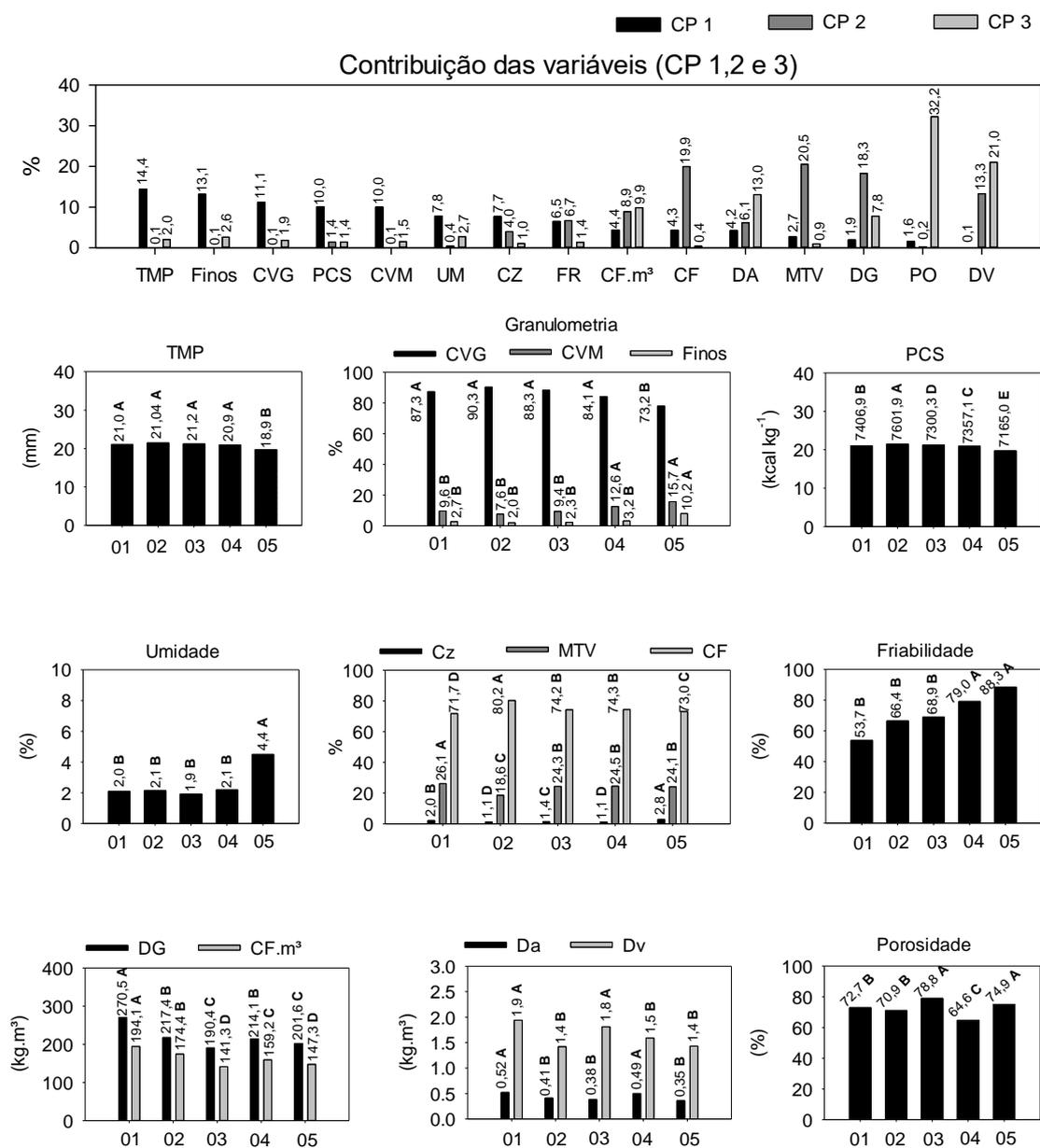
TMP: Tamanho médio de partículas (mm)

1: Densidade a granel (kg.m³); 2: Carvão vegetal grande (%); 3: Carvão vegetal médio (%); 4: % de finos; 5: Tamanho médio de partículas (mm); 6: Friabilidade (%); 7: Densidade aparente (kg.m³); 8: Densidade verdadeira (kg.m³); 9: Porosidade (%); 10: Poder calorífico superior (kcal.kg); 11: Umidade (%); 12: Materiais voláteis (%); 13: Cinzas (%); 14: Carbono fixo (%); 15: Carbono fixo por m³ (kg.m³).

Os clones formaram quatro grupos em que, o 05 foi distinto dos demais e, dentre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, 03 e 04 foram semelhantes, distinguindo-se do 01 e 02, que também foram distintos entre si, esta classificação foi igual à proposta pela reatividade e distinta das análises de componentes principais das características de crescimento e qualidade da madeira (Figura 5).

A variável de maior contribuição para a distinção dos clones no componente 1, foi o tamanho médio das partículas de carvão vegetal (Figura 7 e 8). A distinção do carvão vegetal proveniente da madeira do clone 05, *E. urophylla*, para o carvão proveniente da madeira dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* foi demarcada principalmente pelos altos valores de umidade, teor de cinzas, finos e friabilidade do carvão vegetal de *E. urophylla* (Figura 8).

Figura 8 - Gráfico de contribuição das variáveis no primeiro, segundo e terceiro componentes principais e gráficos de características do carvão vegetal dos híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* e *E. urophylla*.



Os clones 03 e 04 distinguiram-se dos demais, principalmente pelos maiores valores associados ao teor de carvão médio e menor poder calorífico, no entanto o carvão vegetal do clone 03 foi semelhante ao carvão vegetal do 05, de *E. urophylla* (Figura 8). O carvão vegetal do clone 01 se diferenciou dos demais principalmente pelos maiores valores em densidade à granel e carbono fixo por m³ e baixos valores de friabilidade e percentagem de carbono fixo (Figura 8). Por fim, o clone 02 proporcionou carvão vegetal com altos valores de teor de carbono fixo e poder calorífico e baixo teor de materiais voláteis e cinzas (Figura 8).

A análise de componentes principais para as características do carvão vegetal foi a que apresentou maior semelhança no agrupamento dos clones com

a estratificação realizada pela reatividade do mesmo, evidenciando o potencial de se analisar o material para prever sua reatividade.

3.4 DISCUSSÃO

Em geral, as espécies de *Corymbia* sp. apresentam produção volumétrica de madeira de 20% a 30% menor que as espécies de *Eucalyptus* sp. (MOURA, 2001; FLOREZ et al., 2019). A absorção do carbono e forma em que ele é distribuído pelas partes de uma árvore é que delimita a alometria de crescimento da espécie e sua adaptação às condições de crescimento (PAUL et al., 2007). Alguns estudos relatam que a alocação de biomassa entre espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* se diferenciam em média nas seguintes porcentagens para cada parte: *Eucalyptus*: 22% galhos, 10% folhas, 10% casca e 56% fuste, *Corymbia*: 26% galhos, 15% folhas, 7% casca e 50% fuste (PAUL et al., 2008; CERNUSAK et al., 2011). O maior investimento de biomassa em galhos e folhas, adotado por algumas espécies e clones de *Corymbia*, evidencia o mecanismo de maior investimento de recursos em estruturas que captam matéria-prima para seus processos fisiológicos, e menor investimento em crescimento, justificando assim, sua menor produção volumétrica do fuste.

Neste contexto, a separação dos clones de diferentes gêneros é bem demarcada pelas variáveis de crescimento. Alguns clones como o 04 apresentam crescimento equivalente ao *E. urophylla*, o que indica o potencial da geração desses híbridos que atendam a demanda volumétrica. No entanto, as características de crescimento não são tão eficientes para seleção precoce de clones adequados aos usos siderúrgicos, uma vez que, os clones com menor produção de madeira apresentaram valores de reatividade do carvão vegetal ao CO₂ maiores, características não desejadas ao processo de redução do minério de ferro.

Em geral, para espécies de *Eucalyptus*, a menor porcentagem de cerne na madeira é reflexo do menor crescimento diamétrico do fuste (Almeida et al., 2020). Porém, para os clones de *Corymbia* deste estudo, o clone com maior produção volumétrica apresentou menor porcentagem de cerne, o que comprova a inexistência de desta regra para o gênero. Sabe-se que, o cerne apresenta alto teor de extrativos, no entanto, mesmo com menor porcentagem de cerne, as madeiras de híbridos de *C. telliana* e *C. citriodora* apresentam maior teor de

extrativos, características esta, muito importante para distinção destes híbridos para madeira de *E. urophylla*.

A formação de extrativos na madeira está relacionada ao metabolismo secundário da planta em que, é acentuada em situações de que a planta necessita ativar o sistema de defesa. Esta informação, adicionada ao fato de os clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* apresentarem menor teor de cerne na madeira, endossa a ideia de que, a produção de extrativos na madeira, nem sempre está atrelada apenas à formação de cerne e, esta foi uma característica essencial para distinção dos clones de *Corymbia* para *E. urophylla*.

A maior percentagem de alburno nos caules de uma árvore é uma variável confiável para predição de área foliar, uma vez que delega a percentagem de tecido condutor ativo e possibilita a maior absorção de seiva e translocação para as partes aéreas (WARING et al., 1982; RIBCHOAUD; MATHVEN, 1992), assim, as maiores percentagens de alburno presentes nas espécies de *Corymbia*, podem ser justificadas pelas espécies deste gênero geralmente possuir copas mais frondosas que as espécies do gênero *Eucalyptus* (VILAS BÔAS; MAX; MELO, 2009).

Assim, como o teor de cerne na madeira, a densidade básica é altamente influenciada pela idade e pode variar significativamente a partir dos três anos (BRITO et al., 2020) no entanto, para os híbridos desta pesquisa, nós identificamos que mesmo em idade jovem, há diferenças marcantes em densidade, principalmente entre os gêneros. É preciso ressaltar que, a densidade é uma propriedade de alta herdabilidade genética (TAN et al., 2018), o que justifica a maior densidade da madeira de todos os híbridos de *Corymbia* em relação ao *Eucalyptus*.

A densidade básica da madeira de *Eucalyptus* varia em torno de 0,350 a 0,650 g.cm⁻³ (BARBOSA et al., 2018; ALMEIDA et al., 2020; COSTA et al., 2020). O gênero *Corymbia*, apresenta densidade básica da madeira em média 20% maior que o gênero *Eucalyptus* e varia entre 0,500 a 0,800 g.cm³ até os 15 anos de idade (GEROMEL et al., 2011; GLENCROSS et al., 2014; GARCIA et al., 2014; HUNG et al., 2016; MEDEIROS et al., 2016; FLOREZ et al., 2019). Neste estudo, tiveram híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, em três níveis de densidade sendo consideradas baixa (0,55 ton.m³), média (0,61 ton.m³) e alta (0,64 ton.m³), mas, todos com maiores densidades que o *E. grandis* x *E. urophylla*, demarcando a herdabilidade desta propriedade para o gênero.

Geralmente as características dos híbridos são traços intermediários aos seus progenitores (ROSENTHAL et al., 2002), assim, Trueman et al., (2012) obtiveram as características da madeira do *C.torelliana*: 18,2% de cerne, 43,2% de alburno e DB da madeira 547 kg.m³. Para o presente estudo, os híbridos de *C.torelliana* e *C.citriodora* apresentaram percentagens de cerne e alburno e densidade da madeira maiores que o *C. torelliana* investigado por Trueman et al. (2012), inferindo que, para a ocorrência desses valores no híbrido, o *C.citriodora*, em sua matriz genética possivelmente, apresenta quantidade de cerne, alburno e DB da madeira ligeiramente maiores que 18,2%, 43,2% e 547 kg.m³, respectivamente.

Ao verificar a maior densidade básica da madeira ocasionada pela menor área de vasos, o carvão vegetal pode se apresentar com menor porosidade, e, a baixa porosidade contribui para menor reatividade do carvão vegetal ao dióxido de carbono, característica desejável pela indústria siderúrgica (RAMOS et al., 2019; KUMAR; GUPTA, 1994). No entanto, neste estudo, esta relação com a densidade não foi tão clara, principalmente por esta propriedade não ser tão influente par extratificação dos clones.

Algumas propriedades da madeira como sua composição química, são intimamente relacionadas com a produção e qualidade do carvão vegetal, dentre elas a relação S/G e, também o índice de cristalinidade da celulose, em que, deseja-se menor relação S/G, ocasionada pelo maior teor de lignina guaiacil, pois esta possibilita maior rendimento e carvão vegetal (SOARES et al., 2015). Já o maior índice de cristalinidade contribui para a velocidade do processo de decomposição da madeira, em que, quanto mais fração cristalina, mais lenta será a decomposição térmica deste componente, possibilitando maior controle do processo de carbonização (ZICKLER et al., 2007; PARIS; ZOLLFRANK; ZICKLER, 2005).

A maior quantidade de carbono fixo por m³ para os híbridos de *C.torelliana* e *C.citriodora*, inferem que, embora o carbono fixo absoluto no carvão tenha sido semelhante aos clones de *Eucalyptus*, a maior densidade do carvão vegetal é importante tanto para proporcionar maior teor de CF por unidade de volume quanto para o consumo específico do carvão vegetal no alto-forno. Alguns trabalhos identificaram que, à medida que a DG do CV aumenta, o consumo para produção de ferro gusa diminui, inferindo menor reatividade para o CV de alta densidade garantindo faixas ótimas de redução do minério de ferro e melhor

relação custo-benefício (ISBAEX, 2018). Neste estudo, esta evidência foi confirmada, em que os clones de *Corymbia* com maior quantidade de carbono fixo por m³, foram também os menos reativos.

No entanto, a variável de maior influência para distinção entre os clones de *Corymbia* e *E. urophylla*, foi o tamanho médio das partículas que, por sua vez, apresenta relação próxima com a reatividade do carvão vegetal em que, o carvão vegetal, diferentemente do carvão mineral, não passa pelo processo de coqueificação, logo, é injetado no alto forno com forma e granulometria das partículas irregulares. Alguns trabalhos, por meio de modelagem espacial, identificaram que carvão vegetal em formas mais esféricas e com granulometria abaixo de 20 mm proporcionam maior reatividade e combustão mais rápida, no entanto partículas com maiores granulometrias dependem da sua composição química para ter sua reatividade reduzida (LIU; SHEN, 2018; BACKREED et al., 2005), relação evidenciada neste estudo para o carvão vegetal de *E. urophylla*.

Estes resultados são explicados pela maior superfície de contato que partículas menores e mais esféricas proporcionam para a permeabilidade do CO₂. As partículas de maiores granulometrias tendem a percorrer caminhos mais longos contra a explosão de ar quente, assim o CO₂ é consumido de forma mais lenta causando menor consumo da partícula após a reação, além de proporcionarem maior permeabilidade de carga no alto forno (LIU; SHEN et al., 2019 a e b).

O fato de os clones 01 e 02 terem carvão vegetal mais denso e menos friável culmina com a ocorrência de maiores percentagens de carvão vegetal em granulometria grande, evidenciando que, para os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, existe tendência linear entre densidade do carvão vegetal, resistência mecânica e granulometria, uma vez que, que ocorrência de carvão vegetal com granulometria pequena gerado pela quebra.

A menor friabilidade do carvão vegetal, responde questões sobre a maior capacidade de o carvão vegetal suportar choque mecânico, como por exemplo, operações de transporte e manuseio do carvão vegetal (ASSIS et al., 2016 b; VIEIRA, 2009; SILVA; QUINTÃO, 1991; CETEC, 1982).

Dentre os grupos de características, as da madeira foram as de maior heterogeneidade para os híbridos de *Corymbia* e *E. urophylla*, o que evidencia a importância destas para diferenciação entre os gêneros. No entanto, as características de crescimento e do carvão vegetal apresentaram proximidade

entre pelo menos um clone de *Corymbia* e *E. urophylla*, comprovando-se a menor eficiência para distinguir os gêneros, exceto quando se relaciona esta estratificação, como no caso das características do carvão vegetal e sua reatividade.

O entendimento de como as características de crescimento e a qualidade da madeira influenciam na produção e propriedades do carvão vegetal é uma ferramenta para inferências da cadeia produtiva e de comercialização do produto, por exemplo, com informações sobre produtividade de madeira e sua qualidade, é possível selecionar materiais genéticos que forneça carvão vegetal mais adequado ao uso siderúrgico e prever o seu comportamento no alto-forno (FERREIRA, 2000). Esta informação, além subsidiar planejamento florestal mais eficiente, subsidiam também inferências econômicas para empresas que tem posse da cadeia completa de produção de ferro-gusa, com inferências sobre matéria-prima e produto.

3.5 CONCLUSÕES

Os clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* se diferem de *E. urophylla* em características de crescimento, qualidade da madeira e propriedades do carvão vegetal, em diferentes grandezas, no entanto, as características de crescimento e qualidade da madeira proporcionam maior distanciamento entre os gêneros que as características do carvão vegetal. Os grupos de características de crescimento, qualidade da madeira e propriedades do carvão vegetal são eficientes para extratificação prévia entre clones de *E. urophylla* e *C. torelliana* x *C. citriodora* em correspondência à extratificação realizada pela reatividade do carvão vegetal, no entanto, dentre os três grupos de características, o estudo das propriedades do carvão vegetal é mais eficiente para ranqueamento de todos os clones, inclusive entre os clones de *C. torelliana* x *C. citriodora* em correspondência à extratificação pela reatividade do carvão vegetal.

Dentre os clones híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora*, o clone 04, com progenitor feminino *C. citriodora*, apresenta características de crescimento e carvão vegetal semelhantes a *E. urophylla*, e características da madeira distintas dos demais clones.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 458, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>.
- ANDRADE, F. W. C.; FILHO, M. T.; MOUTINHO, V. H. P. Influence of Wood Physical Properties on Charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, n. 25, v. 3, p. 1-8, 2018. <http://dx.doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201701546>
- ASSIS, M. R. A. **Study of the variability of mechanical and physical properties of charcoal obtained under different pyrolysis conditions**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS CARVÃO VEGETAL. **NBR 6922**: Carvão vegetal - Ensaios físicos - Determinação da massa específica Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7402**: Carvão vegetal - Determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633 (MB2007)**: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS CARVÃO VEGETAL. **NBR 8740**: Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão. Rio de Janeiro, 1985. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS CARVÃO VEGETAL. **NBR 9165**: Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8p.
- BACKREEDY, R. I. *et al.* Co-firing pulverised coal and biomass: a modeling approach. **Proceedings of the Combustion Institute**, [s.l.], v. 30, n. 2, p. 2955- 2964, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.085>.
- BARBOSA, T. L. *et al.* Influence of site in the wood quality of Eucalyptus in plantations in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, [s.l.], v. 81, n. 3, p. 247-253, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2019.1570453>.
- BISWAS, A. K. *et al.* Change of pyrolysis characteristics and structure of woody biomass due to steam explosion pretreatment. **Fuel Processing Technology**,

Estocolmo, Suécia, v. 92, n.10, p.1849-1854, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.038>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Matriz Energética Nacional 2016 - Ano Base 2015**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2016>. Acesso em: 20 de maio de 2020. (Provável mudança de citação no texto).

BRITO, A. S. *et al.* Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of Eucalyptus wood. **Floresta e Ambiente**, Jerônimo Monteiro, ES, v. 26, n. 1, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.03781>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/LVc5qM6cYtpqQy78wbBcmJj/?lang=en>. Acesso em: 20 de maio de 2020.

BRITO, A. S. *et al.* Influência da idade nas propriedades da madeira de eucalipto. *In: VIDAURRE, G.B et al. (org.). Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil*. Vitória: EDUFES, 2020, p. 103 -131.

CERNUSAK, L. A. *et al.* Photosynthetic physiology of eucalypts along a sub-continental rainfall gradient in northern Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Austrália, v. 151, n. 11, p. 1462-1470, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.006>.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte, 1982. 393 p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=73148>. Acesso em: 01 fev. 2022.

COSTA, L. J. *et al.* Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 116, p. 629-639, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.04>.

COSTA, S. E. L. *et al.* The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from *eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 458, n.15, p. 461- 470, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>.

FERREIRA, O. C. **O FUTURO DO CARVÃO VEGETAL NA SIDERURGIA: EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO E CONSUMO DO CARVÃO VEGETAL**. Economia & Energia, 2000. Disponível em: <https://ecen.com/eee21/emiscar2.htm#futucarvao>. Acesso em: 29 maio. 2019.

FLOREZ, L. G. *et al.* Developing biomass estimation models for above-ground compartments in *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia citriodora* plantations. **Biomass and Bioenergy**, Austrália, v. 130, p. 1-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105353>.

GARCIA, R. A. *et al.* Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, Seropédica, RJ, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201420041316>.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cerne/a/ZgLTqxpZQgNdqFJMzXYttK/?lang=pt>. Acesso em: 01 fev. 2022.

GEROMEL, G. K. S.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Caracterização físico-química da madeira e produção de carvão de *Corymbia citriodora*. **Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**. Jaboticabal, v.3, 2011.

GLENCROSS, K. *et al.* Basal area increment is unaffected by thinning intensity in young *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia variegata* plantations across different quality sites. **Forest Ecology and Management**, Australia, v. 318, p. 326-333, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.041>.

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, ago. 1986.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **TELOPEA**, [s. l.], v. 6, p. 185-504, 1995. DOI: <https://doi.org/10.7751/telopea1995301>. Disponível em: [75_833_telopea19953017.pdf](https://doi.org/10.7751/telopea1995301). Acesso em: 01 fev. 2022.

HSING, T. Y.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 273-283, jan./ mar. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509821119>.

HUNG, T. D. *et al.* Genetic variation in growth and wood-quality traits of *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* across three sites in south-east Queensland, Australia. **Southern Forests**, Australia, v. 78, n. 3, p. 225-239, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183095>.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

KUMAR, M.; GUPTA, R.C. Influence of carbonization conditions and wood species on carbon dioxide reactivity of resultant wood char powder. **Fuel Processing Technology**, Varanasi, Índia, v. 38, n. 3, p. 223-233, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0378-3820(94)90050-7).

LADIGES, P. Y.; BAYLY, M. J.; NELSON, G. J. East-west continental vicariance in *Eucalyptus* subgenus *Eucalyptus*. In: WILLIAMS, D.M., KNAPP, S. (Eds.). **Beyond Cladistics: The Branching of a Paradigm**. University of California, 2010. p. 267-302.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1992. E-book.

LIU, Y.; SHEN, Y. Computational Fluid Dynamics Study of Biomass Combustion in a Simulated Ironmaking Blast Furnace: Effect of the Particle Shape. **Energy Fuels**, [s. l.], v. 32, p. 4372-4381, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03150>.

SHEN, Y. Three-dimensional modelling of charcoal combustion in an industrial scale blast furnace. **Fuel**, Australia, v. 258, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116088>.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Chile, v. 21, n. 4, p. 619-630, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000417>. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2019005000417&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 01 fev. 2022.

MEDEIROS, B. L. M. A. *et al.* 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, nov./dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v04n06a10>. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/3730/pdf_1. Acesso em: 01 fev. 2022.

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, n. 28, 32 p. 2001. Disponível em: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=202714>. Acesso em: 01 fev. 2022.

MOUTINHO, V. H. P. *et al.* Caracterização e correlação estatística entre as propriedades físicas e mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1095-1103, jul./set. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/b6NHwrfKXTfTW95QnjqQDLS/abstract/?lang=pt&stop=next&format=html>. Acesso em: 01 fev. 2022.

PROTÁSIO, T. P. **Características de crescimento, madeira e carvão para classificação de clones de *Eucalyptus* spp. visando o uso energético**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.

TAPPI T257 om-85. **Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: Tappi Press, 1985.

TAPPI T 264 cm-97. **Preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TAPPI T 280 pm-99. **Acetone extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi Press, 1999.

TRUGILHO, P. F. *et al.* Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **CERNE**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104 -114, 2001.

- PAUL, K. I. *et al.* Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, Australia, v. 243, n. 2-3, p. 237-247, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.029>.
- PARIS, O.; ZOLLFRANK, C.; ZICKLER, G. A. Decomposition and carbonisation of wood biopolymers - a microstructural study of softwood pyrolysis. **Carbon**, Alemanha, v. 43, n.1, p. 53-66, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.08.034>.
- PAUL, K. I. *et al.* Predicting growth and sequestration of carbon by plantations growing in regions of low-rainfall in southern Australia. **Forest Ecology and Management**, Australia, v. 254, n. 2, p. 205-216, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.003>.
- PERES, L.C. *et al.* Clonal selection of *Corymbia* for energy and charcoal production. **Advances in Forestry Science**, Viçosa, MG, v. 6, n. 3, p. 749-753, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v6i3.8293>.
- RAMOS, D. C. *et al.* Quality of Wood and Charcoal from Eucalyptus Clones for Metallurgical Use. **Floresta e Ambiente**, [s.l.], v. 26, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043518>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/tTNvcXSdHVp3RMFH4gmW5Dx/?lang=en>. Acesso em: 01 fev. 2022.
- RIBCHOAUD, E.; MATHVEN, I. The applicability of the pipe model theory for the predictions of foliage biomass in threes for natural, untreated black spruce stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v. 22, n. 8, p. 1118-1123, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1139/x92-148>.
- ROSENTHAL, D. M. *et al.* Phenotypic Differentiation between Three Ancient Hybrid Taxa and Their Parental Species. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v. 163, n. 3, p. 387-398, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1086/339237>.
- SANTOS, L. M. H. *et al.* Variations in heartwood formation and wood density as a function of age and plant spacing in a fast-growing eucalyptus plantation. **Holzforschung**, Berlin, v. 75, n. 11, p. 979-988, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0215>.
- SOARES, V. C. *et al.* Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **CERNE**, Minas Gerais, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>.
- TAN, B. *et al.* Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid *Eucalyptus*. **Plant Science**, [s. l.], v. 267, p. 84-93, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.11.011>.
- TRUEMAN, S. J. *et al.* Characterising wood properties for deployment of elite subtropical and tropical hardwoods. [s. l.], 2012.

VIEIRA, R. S. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão vegetal produzido entre 350°C e 900°C**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

VILAS BÔAS, O., MAX, J.C.M., MELO, A.C.G. Crescimento comparativo de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* no município de Marília, sp. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 63-72, 2009.

WARING, R. H.; SCHROEDER, P. E.; OREN, R. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v. 12, n. 3, p. 556-560, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1139/x82-086>.

WHITAU, R. *et al.* Charcoal analysis at Riwi cave, Gooniyandi country, Western Australia. **Quaternary International**, Australia, v. 457, p. 140-154, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.046>.

ZICKLER, G. A. *et al.* In situ X-ray diffraction investigation of thermal decomposition of wood cellulose. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 80, n. 1, p. 134-140, 2007.

Comprovado que os pontos ideais para amostragem da madeira são distintos para cada material genético, esforços que visem validar estes modelos, como aumento da intensidade amostral e estudo de novas posições devem ser estimulados, no entanto, o conhecimento da variabilidade inter e intra árvores das propriedades da madeira deve ser o ponto chave para direcionar estas pesquisas, uma vez que, é necessário conhecer as tendências de variações tanto para espécies e clones do gênero *Corymbia* como para o gênero *Eucalyptus*.

O arranjo anatômico da madeira de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* com menores espaços vazios explica a menor carga de água existente nesta madeira, esta característica subsidia definições importantes em diversas áreas da cadeia produtiva do carvão vegetal, principalmente a diminuição do tempo de estocagem de madeira em campo e melhor aproveitamento no transporte de madeira, em que, madeira o volume de carga será preenchido por menor carga de água e maior quantidade de massa de madeira.

Embora os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* tenham apresentados características de qualidade da madeira e do carvão vegetal superiores para sua utilização na indústria siderúrgica, pode-se concluir que, a madeira e o carvão vegetal destes não alcançaram ainda o seu máximo potencial de qualidade pois, o manejo e métodos de produção empregados foram os desenvolvidos para espécies de *Eucalyptus*, sendo necessário pesquisa que visem desenvolver metodologias específicas para que estes híbridos atinjam o seu máximo potencial.

Dentre os híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* houve heterogeneidade para as características de crescimento, qualidade da madeira e do carvão vegetal, não apenas ao comparar clones com progenitores femininos distintos, mas também entre clones com progenitores femininos semelhantes e com diferentes níveis de crescimento, o que nos leva a concluir que, a produção volumétrica de madeira também pode ser um fator altamente correlacionado com a qualidade da madeira e do carvão vegetal em clones de *Corymbia*.

