

WAGNER PATRÍCIO DE SOUSA JÚNIOR

BALANÇO DE CARBONO E DESEMPENHO DE MADEIRAS DE *Corymbia* spp. E *Eucalyptus* spp. DESTINADAS À PRODUÇÃO DE ENERGIA, CARVÃO VEGETAL, POLPA CELULÓSICA E PAPÉIS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Ana Márcia Macedo Ladeira
Carvalho

Coorientadora: Angélica de Cassia Oliveira
Carneiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S725b
2024

Sousa Júnior, Wagner Patrício de, 1977-

Balanço de carbono e desempenho de madeiras de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. destinadas à produção de energia, carvão vegetal, polpa celulósica e papéis / Wagner Patrício de Sousa Júnior. – Viçosa, MG, 2024.

1 tese eletrônica (127 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.246>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira como combustível. 2. Pirólise. 3. Eucalipto - Melhoramento genético. I. Carvalho, Ana Márcia Macedo Ladeira, 1964-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.983981

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

WAGNER PATRÍCIO DE SOUSA JÚNIOR

BALANÇO DE CARBONO E DESEMPENHO DE MADEIRAS DE *Corymbia* spp. E *Eucalyptus* spp. DESTINADAS À PRODUÇÃO DE ENERGIA, CARVÃO VEGETAL, POLPA CELULÓSICA E PAPÉIS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Wagner Patrício de Sousa Júnior
Autor

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho
Orientadora

À minha família, em especial à minha mãe, Rute,
ao meu pai, Wagner (*in memoriam*), minha
esposa Miriam e aos meus queridos filhos Arthur
e João Vitor;
Ao professor Ricardo Marius Della Lucia (*in
memoriam*).

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa.

Ao Departamento de Engenharia Florestal/UFV.

Ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Campus Salinas.

À Aperam BioEnergia, pelo fornecimento das madeiras, apoio técnico e por oportunizar aos discentes da graduação e pós-graduação a participação direta nos projetos de pesquisa desenvolvidos.

À EMBRAPPII Fibras florestais e Sociedade de Investigações Florestais (SIF).

À Professora Ana Márcia Macedo L. Carvalho, pela orientação e confiança, inestimável aprendizado na grande área de celulose e pelo incentivo durante todo o curso.

À Professora Angélica de Cassia Oliveira Carneiro (Cassinha), pelo agradável convívio, pelas preciosas orientações e pelo conhecimento compartilhado nas disciplinas, grupo de estudos, eventos científicos e no LAPEM.

À professora Iara Fontes Demuner, pelas contribuições à pesquisa em vários momentos desde a concepção do projeto.

À Dra. Lilian Reis, por todo apoio técnico, sugestões e ensinamentos em diferentes oportunidades desde o início das pesquisas.

Ao pesquisador Dr. Daniel Barcellos, pelas sugestões técnicas e pela presteza habitual.

Aos estagiários, bolsistas de iniciação científica e colegas da pós-graduação do LAPEM, LCP e LPM que contribuíram direta e indiretamente para a pesquisa.

Aos colaboradores e servidores técnico-administrativos do LAPEM/LCP/LPM (UFV).

À Dra. Lauana Blenda Silva e ao professor Laércio Antônio Gonçalves Jacovine.

À Msc. Sherellyn Daphnee, pelo apoio nos trabalhos nos eixos correlatos da pesquisa.

Ao Dr. Alexmiliano Vogel (EPAMIG), professor Msc. Vinicius Orlandi (IFNMG) e professora Dra. Tatianne Gizelle (IFNMG) pelas sugestões nas análises estatísticas.

Ao PBQS/IFNMG, pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

SOUSA JÚNIOR, Wagner Patrício de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Balanco de carbono e desempenho de madeiras de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. destinadas à produção de energia, carvão vegetal, polpa celulósica e papéis.** Orientadora: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

O desenvolvimento de novos materiais genéticos que atendam aos requisitos silviculturais e do processo produtivo constituem atividades que demandam longo prazo. Os novos clones requerem validação técnica para serem competitivos sob vários indicadores de qualidade frente aos híbridos já consolidados no setor florestal. Neste sentido, há de destacar o surgimento de novos híbridos de *Eucalyptus*, como exemplo, os tri-cross, assim como aqueles pertencentes ao gênero *Corymbia*. Esses materiais genéticos têm despertado o interesse das empresas do setor pela possibilidade de obtenção de mais massa de madeira por hectare, que tende a minimizar os custos envolvidos em diferentes processos ao longo da cadeia produtiva. O objetivo deste trabalho foi avaliar dezesseis materiais genéticos de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp. e seus híbridos, para fins de geração de energia térmica e elétrica, produção de carvão vegetal e polpa celulósica para papel. Foram obtidos os valores das propriedades da madeira, carvão vegetal, indicadores de produções/rendimento e níveis de emissões dos gases do efeito estufa. O trabalho foi subdividido em 4 capítulos. No primeiro capítulo, avaliou-se os clones de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. destinados à combustão direta de lenha em sistemas de cogeração de energia térmica e elétrica. No segundo, utilizou-se a análise de componentes principais para classificação dos genótipos supracitados para produção de energia por meio das principais propriedades da madeira e do carvão vegetal. No terceiro, obteve-se, com a utilização do sistema *Charcoal System*, os balanços de carbono para cada genótipo em simulações da produção de carvão vegetal em fornos retangulares. No quarto capítulo, a partir das dimensões dos elementos anatômicos, obtiveram-se os principais índices de qualidade das fibras. Em conjunto com as informações de rendimento da polpação fornecidas na literatura, selecionou-se, por meio da análise de agrupamento, os materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. para produção de polpa celulósica para diferentes tipos de papéis. Os materiais genéticos de *Corymbia* foram indicados principalmente para produção de energia térmica e elétrica (clones 1, 4, 5), carvão vegetal (clone 4), produção de polpa celulósica para papéis tissue (clones 1 e 4), sacarias e embalagens (clones 3 e 5), destacando-se, ainda, por apresentarem balanço de emissões mais eficientes (clone 4). Em relação aos materiais genéticos de *Eucalyptus*, destacaram-se os

resultados obtidos para *E. cloeziana* (clone 2) na indicação para uso na geração de energia térmica/elétrica e produção de carvão vegetal. Os híbridos tri-cross (clones 10 e 15) também foram indicados para produção de carvão vegetal, destacando-se especialmente no rendimento gravimétrico. Em relação à produção de polpa celulósica para papéis, os híbridos de *Eucalyptus* tiveram indicação para produção de polpa para papéis tissue, embalagens e sacarias, com participação nos três grupos de materiais genéticos estabelecidos. O estudo das propriedades da madeira, carvão vegetal e da qualidade das fibras para fornecimento de polpa para papéis indicou que híbridos de *Corymbia* tiveram resultados gerais que os qualificam para fornecimento de madeira para as diferentes finalidades propostas.

Palavras-chave: Energia da madeira; Pirólise lenta; Descarbonização; Qualidade das fibras.

ABSTRACT

SOUSA JÚNIOR, Wagner Patrício de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2024. **Carbon balance and performance of *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp. for energy, charcoal, cellulose pulp, and paper production.** Advisor: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Coadvisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The development of new genetic materials that meet both silvicultural and production process requirements constitutes a long-term endeavor. These new clones must undergo technical validation to ensure they are competitive across various quality indicators when compared to hybrids already established in the forestry sector. In this respect, the advent of new *Eucalyptus* hybrids, including tri-cross varieties and those from the genus *Corymbia*, merits attention. Such genetic materials have piqued the interest of companies in the sector due to their potential to yield a greater wood mass per hectare, which tends to minimize costs across different stages of the production chain. This study aimed to assess 16 genetic materials from *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp., and their hybrids regarding their utility in generating thermal and electrical energy, as well as producing charcoal and cellulose pulp for paper. Measurements were taken of wood and charcoal properties, production/yield indicators, and greenhouse gas emission levels. The study was divided into four chapters. The first chapter evaluated *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp. clones for their suitability in the direct combustion of firewood for thermal and electrical energy cogeneration systems. The second chapter employed principal component analysis to classify the aforementioned genotypes for energy production, based on the main wood and charcoal properties. In the third chapter, carbon balances for each genotype were determined through simulations of charcoal production in rectangular kilns using the Charcoal System. The fourth chapter determined the main fiber quality indices based on the dimensions of anatomical elements. Together with pulp yield data from the literature, cluster analysis was used to select *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. genetic materials for producing cellulose pulp for various paper types. *Corymbia* spp. genetic materials were primarily recommended for producing thermal and electrical energy (clones 1, 4, 5), charcoal (clone 4), and cellulose pulp for tissue paper (clones 1 and 4), bags, and packaging (clones 3 and 5), also noted for their more efficient emissions balance (clone 4). Regarding *Eucalyptus* genetic materials, *E. cloeziana* (clone 2) showed notable potential for indication in thermal/electrical energy generation and charcoal production. The tri-cross hybrids (clones 10 and 15) were particularly recommended for charcoal production, standing out primarily for gravimetric yield. For pulp production,

Eucalyptus hybrids were suitable for tissue paper, packaging, and bags, participating in the three groups of established genetic materials. The examination of wood and charcoal properties, along with fiber quality for paper pulp supply, revealed that *Corymbia* hybrids are broadly qualified to provide wood for the various intended uses.

Keywords: Wood energy; Slow pyrolysis; Decarbonization; Fiber quality.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| INTRODUÇÃO GERAL | 11 |
| REFERÊNCIAS | 12 |
| METODOLOGIA GERAL | 13 |
| | |
| CAPÍTULO I - GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA A PARTIR DE MADEIRA DE CLONES DE <i>Corymbia</i> spp. e <i>Eucalyptus</i> spp. | 15 |
| RESUMO | 15 |
| ABSTRACT | 16 |
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 2. OBJETIVOS | 19 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 20 |
| 3.1. Descrição da localização do teste clonal e materiais genéticos | 20 |
| 3.2. Obtenção dos discos de madeira e preparo das amostras | 21 |
| 3.3. Propriedades da madeira | 22 |
| 3.4. Estimativa de geração de Energia térmica e elétrica | 23 |
| 3.5. Análise estatística | 25 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 5. CONCLUSÕES | 33 |
| REFERÊNCIAS | 35 |
| APÊNDICE A - Simulação do consumo de combustível dos materiais genéticos avaliados considerando-se três diferentes teores de umidade da madeira (U=20, 30 e 50%). | 40 |
| | |
| CAPÍTULO II - INSIGHTS DAS PROPRIEDADES DE MADEIRAS DE <i>Corymbia</i> spp. e <i>Eucalyptus</i> spp. E SEUS IMPACTOS NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL | 41 |
| RESUMO | 41 |
| ABSTRACT | 42 |
| 1. INTRODUÇÃO | 43 |
| 2. OBJETIVOS | 45 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 46 |
| 3.1. Descrição da localização do teste clonal e materiais genéticos | 46 |
| 3.2. Preparo das amostras de madeira | 47 |
| 3.3. Propriedades da madeira | 48 |
| 3.4. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal | 51 |
| 3.5. Incremento em massa seca (IMS)..... | 52 |
| 3.6. Incremento médio anual em carvão (IMA _{CV}) | 53 |
| 3.7. Análise estatística | 53 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 56 |
| 5. CONCLUSÕES | 72 |
| REFERÊNCIAS | 73 |
| APÊNDICE A – Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal para os 16 materiais genéticos..... | 79 |
| APÊNDICE B - Valores médios da análise dos nutrientes da madeira obtidos para os dezesseis materiais genéticos. | 80 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO III – BALANÇO DE CARBONO NO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS DE <i>Corymbia</i> spp. e <i>Eucalyptus</i> spp. EM FORNOS RETANGULARES..... | 81 |
| RESUMO | 81 |
| ABSTRACT | 82 |
| 1. INTRODUÇÃO | 82 |
| 2. OBJETIVOS | 85 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 85 |
| 3.1. Descrição da localização do teste clonal e materiais genéticos | 85 |
| 3.2. Sistema <i>Charcoal System</i> | 87 |
| 3.3. Propriedades da madeira e do carvão vegetal | 89 |
| 3.4. Análise estatística | 90 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 90 |
| 5. CONCLUSÕES | 97 |
| REFERÊNCIAS | 99 |
| | |
| CAPÍTULO IV - ÍNDICES DE QUALIDADE DAS FIBRAS DAS MADEIRAS DE <i>Corymbia</i> spp. E <i>Eucalyptus</i> spp. PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS GENÉTICOS DESTINADOS A PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA | 102 |
| RESUMO | 102 |
| ABSTRACT | 103 |
| 1. INTRODUÇÃO | 105 |
| 2. OBJETIVOS | 106 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 107 |
| 3.1. Obtenção dos discos de madeira, preparo das amostras e medição dos elementos anatômicos | 108 |
| 3.2. Rendimento depurado da polpa marrom no processo de polpação kraft | 110 |
| 3.3. Índices de qualidade de fibras | 110 |
| 3.4. Análise estatística | 110 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 111 |
| 5. CONCLUSÕES | 120 |
| REFERÊNCIAS | 121 |
| APÊNDICE A - Valores individuais de rendimento depurado e índice de qualidade das fibras obtidos para os dezesseis materiais genéticos. | 125 |
| | |
| CONCLUSÕES GERAIS..... | 126 |

INTRODUÇÃO GERAL

Em 2022 foram produzidos no Brasil 6,9 milhões de toneladas de carvão vegetal e 25 milhões de toneladas de polpa celulósica (IBA, 2023). Os resultados expressivos evidenciam a tendência de crescimento desses setores em relação aos anos anteriores. Com isso, também, ampliaram os desafios para obtenção de madeira em quantidade e qualidade apropriada a cada destinação final.

Neste mesmo ano, em relação à utilização da madeira e derivados na geração de energia elétrica pelas empresas do setor, no contexto da utilização exclusiva de biomassa florestal, o licor negro se manteve como a principal matéria-prima utilizada (73,5%), seguido pela utilização dos resíduos florestais (17,7%) e lenha (5,3%) (ANEEL, 2023).

Dentre as estratégias para o atendimento à elevada demanda de madeira para essas indústrias, destaca-se o desenvolvimento e seleção de genótipos. Tem-se demanda por híbridos com bons indicadores de produtividade florestal e que tenham características químicas, físicas e anatômicas que potencializem melhores índices de conversão da matéria-prima em cada produto final desejado (energia térmica e elétrica, carvão vegetal ou polpa celulósica).

Os ganhos advindos com a utilização da madeira mais uniforme e com melhor índice de qualidade em suas propriedades mais críticas no processo de transformação na indústria, refletem diretamente nos custos envolvidos com áreas plantadas, transporte, mão de obra, massa de madeira utilizada nos fornos/digestores/caldeiras, dentre outros.

A integração entre floresta e indústria é essencial para eleger, priorizar e redirecionar características de qualidade da madeira para seleção e melhoramento tendo em vista seu destino final (Fonseca *et al.*, 2010).

Desta forma, a expansão da área de cultivo de eucaliptos e a melhor adequação da matéria-prima tem expandido o número de espécies e híbridos na silvicultura brasileira. Espécies do gênero *Corymbia* e alguns de seus híbridos interespecíficos também expandiram em áreas plantadas, devido aos aspectos de adequação da madeira para a indústria e adaptação às condições ambientais adversas (Pinto Junior; Silveira, 2021).

Na busca deste objetivo, o desenvolvimento e seleção de novos materiais genéticos, resulta, muitas vezes, na necessidade da avaliação técnica de um elevado número de híbridos. Além disso, tem-se propriedades da madeira relevantes para cada segmento e, de forma

indissociável, ao atendimento às premissas dos critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*).

O objetivo principal deste trabalho foi classificar materiais genéticos de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp. e seus híbridos, mediante a obtenção das principais propriedades da madeira, carvão vegetal, indicadores de produções/rendimento e níveis de emissões dos GEE, para fins de geração de energia térmica e elétrica, produção de carvão vegetal e polpa celulósica. Para atendimento aos objetivos propostos, a tese foi subdividida em 4 capítulos:

Capítulo I: Geração de energia térmica e elétrica a partir de madeira de clones de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp.

Capítulo II: Insights das propriedades de madeiras de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. e seus impactos na produção e qualidade do carvão vegetal.

Capítulo III: Balanço de carbono no processo de carbonização de madeiras de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. em fornos retangulares.

Capítulo IV: Índices de qualidade das fibras das madeiras de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. para seleção de materiais genéticos destinados a produção de polpa celulósica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Matriz elétrica brasileira**. Disponível em: www.gov.br/aneel/pt-br. Acesso em: 25 set. 2023.

FONSECA, S. M.; RESENDE, M. D. V.; ALFENAS, A. C.; GUIMARÃES, L. M.; ASSIS, T. F.; GRATTAPAGLIA, D. **Manual prático de melhoramento genético do Eucalipto**. Viçosa, MG. Editora UFV, 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2023**. Disponível em: iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf. Acesso em: 23 nov. 2023.

PINTO JUNIOR, J. E.; SILVEIRA, R. A. A introdução do eucalipto no Brasil pela Embrapa: bases institucionais e sua estruturação para a pesquisa com eucaliptos e corímbias. **Embrapa Florestas**, 2021.

METODOLOGIA GERAL

Para a realização deste trabalho foram utilizadas quarenta e oito árvores de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp., aos 7 anos de idade, fornecidas por empresa produtora de carvão vegetal situada no Vale do Jequitinhonha, na cidade de Itamarandiba – MG.

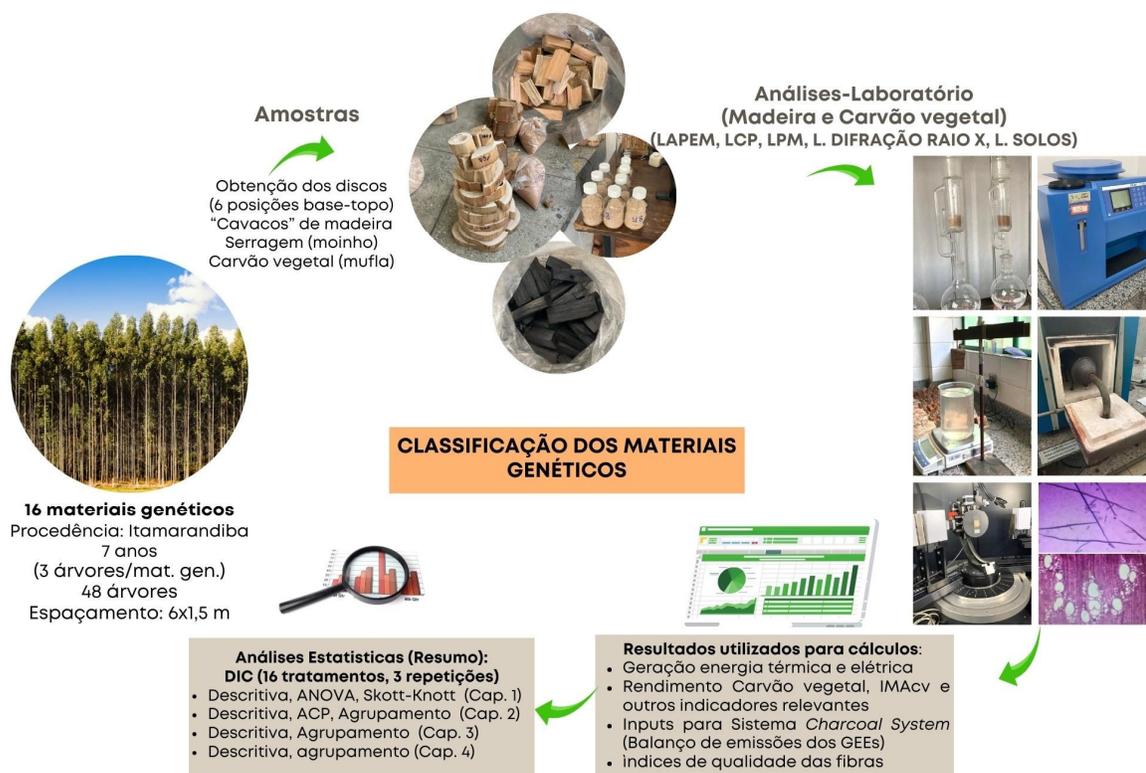
Antes da colheita das árvores selecionadas, foram efetuadas as medições de altura total, comercial e diâmetro à altura do peito (DAP). Após a derrubada, foram obtidos seis discos por árvore ao longo da sua altura comercial, em posições preestabelecidas. O material foi identificado, embalado em sacos plásticos e transportados para o Laboratório de energia da Madeira (LAPEM), na Universidade Federal de Viçosa.

As informações dendrométricas dos materiais genéticos selecionados e também referentes às condições edafoclimáticas do talhão experimental de onde foram obtidas as árvores foram descritas na metodologia de cada Capítulo.

A partir dos discos representativos de cada material genético, foram obtidas as subamostras no formato de cunhas opostas, tendo a medula como referência ao centro. Este material, subdividido em diferentes fragmentos de formatos específicos e granulometrias, foi utilizado para as análises físicas, químicas e anatômicas da madeira, para a carbonização em mufla e ensaios correlatos.

A Figura 1 ilustra, resumidamente, as principais informações dos materiais genéticos utilizados, a metodologia para obtenção dos resultados das propriedades da madeira e do carvão vegetal e, por fim, os procedimentos adotados para a classificação desses materiais.

Figura 1 – Resumo da descrição dos materiais genéticos utilizados e etapas para classificação em grupos de acordo com as finalidades propostas nos os Capítulos 1, 2, 3 e 4.



Fonte: Elaboração própria

CAPÍTULO I - GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA A PARTIR DE MADEIRA DE CLONES DE *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp.

RESUMO

A participação da madeira na matriz energética brasileira tem grande potencial de expansão considerando toda a conjuntura social, ambiental e tecnológica favorável ao uso desta fonte renovável. A conversão da biomassa florestal em vapor e energia elétrica tem vantagens sob vários aspectos em comparação com outros combustíveis, dentre elas a menor emissão de gases poluentes e a possibilidade de aproveitamento de resíduos. Neste contexto, o desenvolvimento de novos materiais genéticos para atendimento aos requisitos de produtividade florestal e qualidade da madeira fazem parte das estratégias de competitividade das empresas do setor, que visam a utilização da madeira como fonte de energia. O estudo teve como objetivo principal avaliar clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* destinados à combustão direta em sistemas de cogeração de energia térmica e elétrica. Foram avaliados dezesseis materiais genéticos, provenientes de madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp. e seus híbridos, por meio de três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6x1,5 m, provenientes de talhão experimental situado na cidade de Itamarandiba/MG. Foram determinadas as densidades básica e energética, composição química elementar, poder calorífico superior, inferior e útil e energia disponível. Para estimativa de desempenho industrial foi realizada simulação da utilização dos clones na geração elétrica e consumo de combustível via combustão direta de lenha em usina termoeletrica (UTE) de 10 MW. De acordo com os resultados, em relação ao gênero *Eucalyptus*, o clone 2 (*E. cloeziana*) se destacou nos valores de densidades básica e energética, poder calorífico útil e baixo consumo de combustível nas simulações da UTE. De forma geral, considerando-se todos os materiais genéticos, o clone 4, híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana*, teve desempenho superior aos demais para produção de energia térmica e elétrica. Este resultado se deve principalmente pelos valores elevados obtidos para as densidades básica (626 kg m^{-3}) e energética (2966 Mcal m^{-3}), energia disponível ($174507 \text{ kWh ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), poder calorífico útil ($2909 \text{ kcal kg}^{-1}$) e menor consumo de lenha na caldeira ($2,3 \text{ m}^3 \text{ lenha MWh}^{-1}$). Além destas características, este clone destacou-se em incremento médio anual e massa seca. Desse modo, a simulação realizada evidenciou, em muitos aspectos, a viabilidade técnica da utilização de lenha de *Corymbia* em usinas termoeletricas movidas a biomassa.

Palavras-chave: Cogeração; Ciclo a vapor; Termoeletricidade.

ABSTRACT

The inclusion of wood in Brazil's energy mix holds significant potential for expansion, given the favorable social, environmental, and technological context for utilizing this renewable resource. The transformation of forest biomass into steam and electrical energy presents several advantages over alternative fuels, including reduced emissions of polluting gases and the opportunity to repurpose waste. In this setting, creating new genetic materials to fulfill the demands for forest productivity and wood quality is part of the competitive strategies of industry players, which aim to harness wood as an energy source. The primary aim of this study was to assess *Eucalyptus* and *Corymbia* clones for their suitability in direct combustion within thermal and electrical energy cogeneration systems. We analyzed 16 genetic materials sourced from the wood of *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp., and their hybrids. The evaluation utilized three trees of median diameter per treatment, aged 81 months and planted at a 6x1.5 m spacing, from an experimental plot in the municipality of Itamarandiba/MG. Basic and energy densities, elemental chemical composition, higher, lower, and net heating values, and available energy were measured. To gauge industrial performance, a simulation was carried out to examine the use of these clones for electrical generation and fuel usage through the direct combustion of wood in a 10 MW thermal power plant (TPP). The findings indicated that among the *Eucalyptus* genus, clone 2 (*E. cloeziana*) was highlighted in terms of basic and energy densities, net heating value, and reduced fuel requirements in TPP simulations. Overall, considering all genetic materials, clone 4, a hybrid of *C. citriodora* and *C. torelliana*, outperformed the rest in thermal and electrical energy generation. This superiority is attributed to its high basic (626 kg m^{-3}) and energy (2966 Mcal m^{-3}) densities, available energy ($174507 \text{ kWh ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), favorable net heating value ($2909 \text{ kcal kg}^{-1}$), and lower wood consumption in the boiler ($2,3 \text{ m}^3 \text{ firewood MWh}^{-1}$). Beyond these features, this clone also showed notable average annual growth and dry mass. Therefore, the simulations demonstrated the technical feasibility of employing *Corymbia* wood in biomass-powered thermal plants in many aspects.

Keywords: Cogeneration; Steam cycle; Thermoelectricity.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia para produção de energia térmica e elétrica a partir de madeira é muito conhecida e destaca-se, recentemente, pelos novos desenvolvimentos tecnológicos que permitem a geração mais eficiente, por meio de equipamentos que operem a altas pressões e temperaturas (IAB, 2015). Segundo Silva *et al.* (2015) a energia derivada da biomassa é uma alternativa econômica eficaz e viável para suprir a demanda de diversos setores, com relevante participação na matriz energética nacional.

O aumento da participação da biomassa na geração de energia em muitos países ocorre como consequência do uso de tecnologias mais eficientes, concessão de subsídios governamentais, estabelecimento de novas políticas em favor da utilização da biomassa, aumentos das metas de redução de emissões, descarbonização da indústria e introdução de créditos de carbono comercializáveis (Akhtari; Sowlati; Day, 2014). A utilização de biomassa de florestas renováveis na geração de energia é vantajosa sob vários aspectos, como exemplo, não estar sujeito a oscilações de preços de combustíveis por questões geopolíticas ou outros fatores externos, obedecendo principalmente às leis de oferta e demanda do mercado interno (Nunes; Matias; Catalão, 2015).

A conversão da biomassa em formas úteis de energia, também denominada bioenergia, pode ser conseguida a partir de várias soluções tecnológicas que podem ser separadas em duas categorias básicas, denominados processos termoquímicos e bioquímicos/biológicos (Caputo *et al.*, 2005).

O Brasil tem vantagens competitivas em relação a utilização da madeira para esta finalidade considerando-se, principalmente, grande extensão territorial, materiais genéticos adaptados a diferentes condições de clima e solo e atuação de fabricantes de equipamentos com tecnologias competitivas para o processo de conversão de energia (Santos; Nascimento; Alves, 2017).

As usinas termelétricas brasileiras utilizam, majoritariamente, combustíveis fósseis em seu processo de obtenção de energia, principalmente gás natural (38%), óleo diesel/combustível (15%) e carvão mineral (6%) (ANEEL, 2023).

Face ao crescimento acentuado do consumo de energia no Brasil e às previsões para os próximos anos, estudos da Empresa de Pesquisa Energética demonstram ser prementes a busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica, dentro do contexto energético sustentável. De acordo com a entidade, a participação da biomassa no setor elétrico atinge 8,5% e o potencial nacional para incrementar a produção da biomassa é bastante significativo

(EPE/MME, 2022). Em métodos de projeções baseados em sustentabilidade, a contribuição potencial total da bioenergia em 2050 pode variar entre 110–245 EJ/ano (Dias *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2019).

Além da disponibilidade de longo prazo da biomassa, sua qualidade é um fator importante na viabilidade econômica dos projetos de bioenergia e na quantidade de energia gerada a partir dela (Shabani; Sowlati, 2013). A qualidade da biomassa depende de uma variedade de fatores, como poder calorífico superior, teor de umidade, propriedades físicas, químicas e térmicas. Neste sentido, de acordo com Trugilho *et al.* (2015), é importante determinar as propriedades físicas e químicas da madeira de espécies e clones plantados industrialmente com vistas a utilização como fonte de energia ou conversão em produto combustível.

A maioria dos estudos são realizados com madeira das espécies e clones do gênero *Eucalyptus*, que possuem baixa densidade básica (Loureiro *et al.*, 2021). No entanto, o gênero *Corymbia* vem se destacando por ter elevada densidade básica, associada a maiores incrementos volumétricos.

Sistemas de cogeração são mais eficientes na conversão da madeira em calor e energia quando comparados com projetos que visam apenas gerar eletricidade (Zerbe, 2006). Em relação aos custos envolvidos na conversão, Macedo (2003) destaca que independente da tecnologia empregada, há necessidade de redução dos valores aportados em biomassa.

O mercado potencial de cogeração é constituído por segmentos da indústria que utilizam grandes quantidades de vapor e eletricidade no próprio processo. As indústrias de polpa celulósica e papel, química e petroquímica, siderurgia, açúcar e álcool, alimentos, bebidas e têxtil representam parcela significativa dessa demanda (EPE/MME, 2017).

As principais informações disponíveis quanto à utilização de biomassa em sistemas de cogeração de energia são referentes ao uso do bagaço de cana, lixívia e resíduos florestais.

Atualmente, há espaço disponível para maior valorização da madeira no panorama energético nacional, utilizando-se a queima da biomassa proveniente de resíduos já disponíveis, bem como no estabelecimento de florestas especificamente destinadas à geração de termoeletricidade (Dias Júnior *et al.*, 2017).

Apesar das vantagens ambientais e econômicas da utilização de resíduos florestais, problemas como desuniformidade da matéria prima, baixa densidade energética e dependência da atividade geradora de resíduos justificam a implantação de florestas dedicadas à produção de biomassa (Goldemberg, 2017; Müller, 2005).

Em relação à competitividade, em muitos casos, a opção por sistemas de geração de energia a partir da biomassa depende de estudos preliminares sobre a disponibilidade e qualidade da matéria-prima (Brand, 2010).

Neste contexto, para atendimento a projetos específicos a partir do estabelecimento de florestas energéticas, compreende-se a necessidade de novas pesquisas para identificação de materiais genéticos capazes de suprir a demanda de madeira, com melhor eficiência na conversão da matéria-prima em energia.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi avaliar clones de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. destinados à combustão direta em sistemas de cogeração de energia térmica e elétrica.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar a composição química elementar, densidade básica e poder calorífico de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* e *Corymbia*;
- Obter a densidade energética e energia térmica disponível por hectare em função dos diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* e *Corymbia*;
- Simular o desempenho de materiais genéticos de *Eucalyptus* e *Corymbia* para geração elétrica e consumo de combustível por meio da combustão direta de lenha em usina termoelétrica (UTE) de 10 MW.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da localização do teste clonal e materiais genéticos

Para a realização do trabalho foram utilizados 16 materiais genéticos, sendo colhidas três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6,0x1,5m, provenientes de plantios situados na cidade de Itamarandiba/MG (latitude 17° 44' 45" S; longitude 42° 45' 11" W; altitude 1.000 m), totalizando 48 unidades amostrais.

A região de instalação do experimento tem topografia plana (chapada) e vegetação nativa do bioma Cerrado. O solo é do tipo latossolo vermelho distrófico típico e vermelho amarelo distrófico típico, com textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturado. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.166 mm e a temperatura média de 21°C. O clima pela classificação de Köppen é classificado como sendo tropical de altitude – Cwa – temperado úmido com inverno seco e verão quente (Henriques *et al.*, 2017).

O teste clonal foi instalado em parcelas de 8 linhas com 8 plantas para cada material genético. Os diâmetros à altura do peito (DAP's) das árvores selecionadas variaram entre 14,2 a 22,8 cm, com valor médio de 18,3 cm. As alturas comerciais (Hc's) variaram entre 17,7 a 25,3 m, com valor médio de 22,11 m.

Para a obtenção do volume individual das árvores amostradas utilizou-se o método de *Smallian*. O volume total de madeira produzido por hectare foi calculado pela multiplicação do volume individual das árvores pelo número de árvores por hectare. O valor do IMA foi calculado utilizando-se a equação 1.

$$IMA = \frac{V}{t} \quad (1)$$

onde IMA = Incremento médio anual ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); V = Volume de madeira por hectare ($m^3 \text{ ha}^{-1}$) e t = Idade (anos).

Na Tabela 1 é apresentada a descrição das combinações genéticas que foram utilizadas assim como informações dendrométricas relacionadas a volumetria.

Tabela 1 - Descrição dos genótipos de *Corymbia* e *Eucalyptus* utilizados na pesquisa.

| Clones | Materiais genéticos | % casca (**) | IMA s/casca (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) | IMA c/casca (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|--------|---|--------------|--|--|
| 1 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 13,9 | 26,2 | 30,5 |
| 2 | <i>Eucalyptus cloeziana</i> | 23,4 | 37,9 | 49,6 |
| 3 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 16,5 | 43,2 | 51,7 |
| 4 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 12,9 | 51,2 | 58,8 |
| 5 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 14,4 | 26,5 | 30,9 |
| 6 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. (*) | 10,5 | 41,2 | 46,1 |
| 7 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. (*) | 9,7 | 48,7 | 54,0 |
| 8 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. (*) | 10,6 | 55,6 | 62,2 |
| 9 | <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 30,6 | 34,0 |
| 10 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) | 10,8 | 41,0 | 45,9 |
| 11 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,3 | 46,9 | 51,8 |
| 12 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 8,0 | 48,4 | 52,6 |
| 13 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 55,5 | 59,5 |
| 14 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 7,7 | 46,9 | 50,8 |
| 15 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 41,8 | 46,4 |
| 16 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus pellita</i> | 11,1 | 56,7 | 63,8 |

(*) Híbrido espontâneo de *Eucalyptus* spp.; (**) Valor médio ponderado pelo volume das árvores.

3.2. Obtenção dos discos de madeira e preparo das amostras

Para a caracterização da madeira foram retirados discos com espessura aproximada de 7 cm, dispostos longitudinalmente na árvore nas posições da base (posição 0), DAP (diâmetro

a altura do peito), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Cada disco foi subdividido em 4 partes, considerando a medula como referência central. Na sequência, duas cunhas opostas foram utilizadas para formação de amostra composta na forma de serragem, após processamento em moinho tipo Wiley (TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 2001)). A amostra composta obtida por árvore foi utilizada para a análise química elementar e poder calorífico superior. As duas cunhas opostas restantes foram utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira. Os procedimentos realizados para obtenção dos discos e preparo das amostras foram sumarizados na Figura 1.

Figura 1 – Seleção dos materiais genéticos no talhão experimental, retirada dos discos no sentido base topo da árvore (altura comercial), obtenção de cunhas opostas e amostra composta de serragem.



Fonte: Elaboração própria. (a) Seleção das árvores diâmetro médio; (b) e (c) Colheita e retirada/identificação dos discos em posições pré-estabelecidas; (d) e (e) preparo (marcação e desdobro) dos discos para obtenção de cunhas opostas; (f) Amostra composta de serragem (Moinho tipo Wiley).

3.3. Propriedades da madeira

A densidade básica da madeira foi obtida conforme ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003), com valores médios calculados por meio da média aritmética das densidades obtidas das cunhas opostas e da ponderação pelos valores dos volumes das seções ao longo do tronco, conforme descrito por Vital (1984) e apresentado na equação 2.

$$DB = \frac{\sum_{i,j=1}^n \frac{(DB_i + DB_j)}{2} \times v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (2)$$

Onde: DB: Densidade básica da madeira (kg m^{-3}); DBi: Densidade básica do disco i ; Densidade básica do disco j ; v_i : volume da seção i pela fórmula de *Smallian* (m^3); V_i : volume total (m^3).

O incremento em massa seca ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi determinado utilizando-se os valores do Incremento médio anual (IMA) e da densidade básica da madeira (DB), de acordo com a equação 3.

$$\text{IMS} = \text{IMA} \times \text{DB} \quad (3)$$

Onde: IMS: Incremento em massa seca ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); IMA: Incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); DB: Densidade básica da madeira (kg m^{-3}).

A composição química elementar da madeira foi realizada em duplicatas, em equipamento da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube CHNS-O). Foram subtraídos dos valores médios obtidos a fração inorgânica contida na madeira, por meio do teor de cinzas (Paula *et al.*, 2011).

O poder calorífico superior da madeira (PCS) foi determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática (modelo IKA300), segundo metodologia descrita pela ABNT NBR 8633 (1984).

Para a determinação do poder calorífico inferior (PCI), expresso em kcal kg^{-1} , foi utilizada a equação 4 (Brito, 1993).

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \left(600 \times \left(\frac{9xH}{100} \right) \right) \quad (4)$$

onde PCI = poder calorífico inferior da madeira (em kcal kg^{-1}); PCS = poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}); H = teor de hidrogênio (%).

O poder calorífico útil (PCU) foi calculado de acordo com a equação 5 (Brito, 1993):

$$\text{PCU} = \text{PCI} - (1 - u) \times (600 \times u) \quad (5)$$

onde PCU = poder calorífico útil da madeira (kcal kg^{-1}); PCI = poder calorífico inferior da madeira (kcal kg^{-1}); U = umidade da madeira (%).

3.4. Estimativa de geração de Energia térmica e elétrica

Para realizar as estimativas de geração de energia térmica e elétrica utilizou-se o valor da densidade energética da madeira obtida pelo produto do poder calorífico superior (PCS) e a densidade básica da madeira, de acordo com a equação 6.

$$DE = DB \times PCS \quad (6)$$

em que DE = densidade energética (kcal m^{-3}); DB = densidade básica (kg m^{-3}); PCS = poder calorífico superior (kcal kg^{-1}).

Para obtenção do potencial energético da madeira, ou energia disponível da madeira ($\text{kWh ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), multiplicou-se a massa de matéria seca de madeira pelo poder calorífico superior, de acordo com a equação 7.

$$ED = MSM \times PCS \quad (7)$$

em que ED = energia disponível ($\text{kWh ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); MSM = massa seca de madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e PCS = poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}).

A relação entre o consumo de combustível, expresso em ($\text{kg combustível MWh}^{-1}$) e em ($\text{m}^3 \text{ combustível MWh}^{-1}$) foi determinada considerando-se as especificações de usina termoeletrica (UTE) com potência nominal de 10 MW, conforme metodologia utilizada por Ribeiro *et al.* (2021a), ajustando-se a eficiência da caldeira para uso de lenha.

O consumo de combustível em kg h^{-1} e $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ foi calculado de acordo com as equações 8 e 9.

$$cc(\text{kg h}^{-1}) = \frac{\text{Energia total}}{\text{PCU}} \quad (8)$$

em que cc = Consumo de combustível (kg h^{-1}); Energia Total = energia da caldeira (Kcal h^{-1}); PCU = Poder calorífico útil (kcal kg^{-1}), teor de umidade = 30%.

$$cc(\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) = \frac{cc(\text{kg h}^{-1})}{\text{DB}} \quad (9)$$

em que cc = Consumo de combustível ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$); cc = Consumo de combustível (kg h^{-1}); DB = Densidade básica da madeira (kg m^{-3}).

Desta forma, o consumo em quilos e em metro cúbico de lenha necessários para geração de 1 MWh foi calculado de acordo com as equações 10 e 11.

$$cc(\text{kg MWh}^{-1}) = \frac{cc(\text{kg h}^{-1})}{\text{Energia gerada}} \quad (10)$$

$$cc(m^3 MWh^{-1}) = \frac{cc(kg MWh^{-1})}{DB} \quad (11)$$

Na Tabela 2 são apresentadas sumariamente as principais características técnicas da caldeira utilizadas na simulação.

Tabela 2 - Parâmetros técnicos da Caldeira para UTE de 10 MW.

| Parâmetros técnicos | |
|---|----------|
| Vazão de vapor (kg h ⁻¹) | 40000 |
| Pressão (bar) | 70 |
| Temperatura do vapor superaquecido (°C) | 495 |
| Entalpia água (kcal kg ⁻¹) | 105 |
| Entalpia vapor (kcal kg ⁻¹) | 811,9 |
| Eficiência (%) | 75 |
| Energia total (kcal h ⁻¹) | 37699309 |
| Energia líquida (kcal h ⁻¹) | 28274482 |
| Regime de trabalho (h mês ⁻¹) | 720 |

Fonte: Elaboração própria a partir de Ribeiro *et al.* (2021a).

3.5. Análise estatística

Para avaliação dos resultados experimentais foi considerado o delineamento inteiramente casualizado com dezesseis tratamentos (clones) e três repetições (árvores). A análise descritiva foi utilizada como estudo preliminar, visando obter as medidas de dispersão e posição.

Posteriormente, foi realizada a análise de variância e aplicado o teste de agrupamento univariado Scott-Knott (95% probabilidade), utilizando-se o software estatístico R versão 4.1.0 (R Core Team, 2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva evidenciou que o conjunto de clones avaliados apresentou valores absolutos muito distintos em crescimento volumétrico e produção de massa seca. Na Tabela 3 são apresentados os valores médios e as respectivas medidas de dispersão para cada propriedade, considerando-se os 16 clones.

Tabela 3 - Valores médios e análise descritiva das propriedades da madeira dos diferentes clones.

| Propriedade | Média | Dp* | CV** (%) | Amplitude | Varição (%) |
|---|--------------|------------|-----------------|------------------|--------------------|
| Densidade básica (kg m ⁻³) | 533 | 62,2 | 11,67 | 200 | 45,7 |
| Incremento médio anual (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 49,3 | 10,2 | 20,77 | 33,3 | 109,2 |
| Incremento massa seca (t ha ⁻¹) | 181,8 | 36,6 | 20,14 | 128,3 | 99,1 |
| Carbono (%) | 49,1 | 0,43 | 0,87 | 1,4 | 2,9 |
| Hidrogênio (%) | 5,9 | 0,16 | 2,66 | 0,7 | 13 |
| Oxigênio (%) | 44,6 | 0,44 | 0,98 | 1,7 | 3,9 |
| Nitrogênio (%) | 0,07 | 0,02 | 28,6 | 0,06 | 150 |
| Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹) | 4675 | 76,9 | 1,64 | 232 | 5,1 |
| Poder calorífico inferior (kcal kg ⁻¹) | 4359 | 75,7 | 1,74 | 234 | 5,5 |
| Poder calorífico útil (kcal kg ⁻¹) | 2871 | 53,0 | 1,84 | 164 | 5,9 |
| Densidade energética (Mcal m ⁻³) | 2492,9 | 321,9 | 12,91 | 1036,7 | 51,8 |
| Energia disponível (kWh ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 121463 | 24694,7 | 20,3 | 89052 | 104,2 |
| Consumo Combustível (m ³ lenha MWh ⁻¹) | 2,82 | 0,37 | 13 | 1,3 | 59,1 |
| Consumo Combustível (kg lenha MWh ⁻¹) | 1477,6 | 28,8 | 1,95 | 100,4 | 7,0 |

*Desvio-padrão **CV=coeficiente de variação; Teor de enxofre=0%.

Observou-se que além das variáveis silviculturais, em alguns casos, a grande amplitude dos resultados das propriedades da madeira indicou a possibilidade de existência de materiais genéticos com desempenho na geração térmica e elétrica significativamente diferentes. A densidade básica, por exemplo, teve amplitude de 200 kg m⁻³ com variação percentual de 45,7% entre clones e coeficiente de variação próximo a 12%. Dada a forte correlação existente entre esta propriedade física e outras propriedades importantes (Cruz; Pio; Iwakiri, 2019; Dias *et al.*, 2018; Gonçalves *et al.*, 2009) esperava-se obter grupos distintos em relação ao desempenho na geração de energia térmica e elétrica.

Os teores de hidrogênio, utilizados no cálculo do poder calorífico inferior, tiveram pequena variação entre os clones, com valor médio de 5,9%. Além dos teores de hidrogênio, carbono, oxigênio e nitrogênio, no agrupamento estatístico pelo teste Skott-knott não se incluiu o resultado dos clones em relação aos poderes caloríficos superior e inferior. Assim,

optou-se pela utilização do poder calorífico útil, que considera a energia desprendida para retirada da água (fase endotérmica do processo de combustão), sendo esse o valor considerado nos cálculos operacionais da caldeira.

A análise de agrupamento dos materiais genéticos indicou a existência de até 6 grupos distintos para determinadas propriedades, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Agrupamento de clones por propriedade da madeira e consumo de combustível pelo teste Skott-knott a 5% significância.

| Propriedades e Consumo da madeira | Agrupamento | | | | | |
|---|---------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|------------|-------|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| Densidade básica (kg m ⁻³) | 2;4 | 1;5 | 6;9;15;10 | 3;8 | 16;13;12;7 | 11;14 |
| Incremento médio anual (m ³ ha ano) | 16;8;13;4 | 7;12;11;3; 14;2;15;6; 10 | 9;5;1 | | | |
| Incremento massa seca (t ha ⁻¹) | 4 | 8;2;16;13 | 3;7;12;6; 15;10;11; 14 | 9;1;5 | - | - |
| Poder calorífico útil (kcal kg ⁻¹) | 1;2;10;15; 4;5;6 | 13;12 | 11;8;3;7 | 14;9;16 | - | - |
| Densidade energética (Mcal m ⁻³) | 2;4;1 | 5 | 6;15;10;9 | 3;8 | 13;12;7;16 | 11;14 |
| Energia Disponível (kWh ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 4 | 2;8;16;13 | 3;7;6;15; 12;10 | 11;14;1;5; 9 | - | - |
| Consumo combustível/MWh (m ³ lenha MWh ⁻¹) | 2;4;1;5 | 15;6;10;9 | 3;8 | 13;12;7;16 | 11;14 | |
| Consumo combustível/MWh (kg lenha MWh ⁻¹) | 6;5;4;15; 10;2;1 | 12;13 | 7;3;8;11 | 16;9;14 | - | - |

Os resultados permitiram, dentre outras comparações, verificar o desempenho dos clones de *Corymbia* em relação aos clones pertencentes ao gênero *Eucalyptus*, assim como a análise dentro de cada gênero. Salienta-se que em alguns casos a comparação com híbridos utilizados em outros trabalhos tornou-se inviável, dado a dificuldade de obter informações sobre resultados para os mesmos cruzamentos utilizados.

Em relação ao poder calorífico dos combustíveis, observou-se que na conversão da lenha em energia há entraves comuns, como o teor de umidade e a densidade da madeira.

Estas propriedades estão relacionadas com os custos de transporte, alimentação da fornalha, eficiência da conversão em eletricidade, vapor de processo ou calor (Lavoranti *et al.*, 2021)

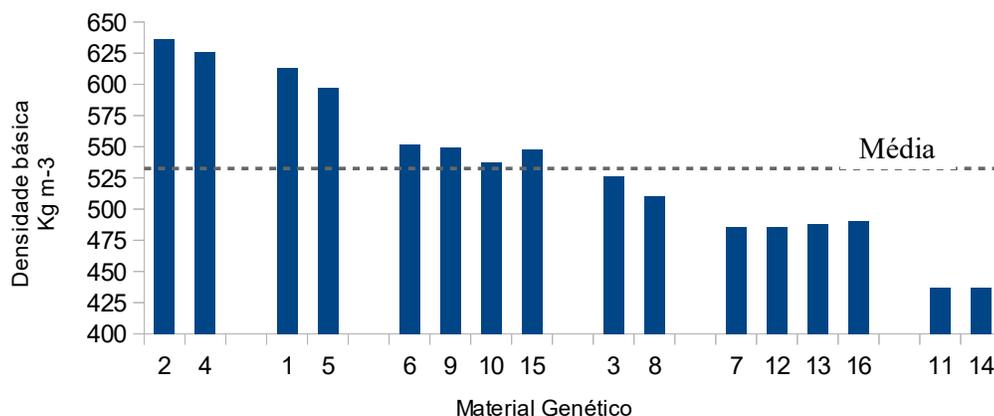
Nigay *et al.* (2020) estimaram que o consumo de energia para secagem de biomassa lenhosa para uso em caldeiras está entre 10 a 13% do poder calorífico da madeira, considerando material com umidade entre 50 e 70%. Neste sentido, Dzurenda e Banski (2019) ao avaliarem a eficiência energética de uma caldeira a biomassa em relação à umidade do combustível verificaram que o consumo de lenha para produzir 1 GJ de calor variou de 107 kg (30% de umidade) a 245 kg (60% de umidade). Com essa variação de umidade, além do consumo de 2,28 vezes maior de lenha, os autores verificaram um aumento de 47% na produção dos gases de combustão, justificando a necessidade da pré-secagem do combustível.

Em relação à densidade básica da madeira, quatro clones se destacaram nos dois primeiros grupos, três pertencentes ao gênero *Corymbia*. Os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (clones 4, 1 e 5), apresentaram, respectivamente, densidades básicas de 626, 613 e 597 kg m⁻³ ao passo que o clone 2, representante do gênero *Eucalyptus*, teve densidade básica de 637 kg m⁻³. Essas madeiras são classificadas como madeiras de média densidade (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1985) e muito pesadas (Forest Products Laboratory, 1973). O clone 3, diferentemente do desempenho dos outros híbridos de *Corymbia*, teve densidade básica de 526 kg m⁻³, valor abaixo do esperado para este material genético. De acordo com Brun *et al.* (2018) e Carneiro *et al.* (2014) a densidade está diretamente relacionada com a produção de massa seca e de energia, constituindo uma característica muito importante para a escolha de espécies para queima direta da madeira.

Os maiores valores obtidos para os híbridos de *Corymbia* estão próximos aos obtidos por Segura (2015) e Valente (2017) correspondentes a 622 kg m⁻³ (árvores com 7 anos) e 609 kg m⁻³ (árvores com 6 anos), respectivamente. Os valores médios obtidos para *E. cloeziana* são inferiores aos encontrados em árvores com idade variando de 6,5 a 7 anos, em trabalhos realizados por Cabral *et al.* (2006), Paes *et al.* (2015) e Pereira *et al.* (2000), correspondentes a 706, 762 e 680 kg m⁻³, respectivamente.

Na Figura 2 são apresentados os valores médios de densidade básica dos dezesseis clones agrupados em classes.

Figura 2 - Valores médios de densidade básica da madeira, separados em seis grupos não semelhantes pelo teste Scott-Knott ($\alpha=5\%$).



Observou-se que 50% dos clones apresentaram densidade básica abaixo do valor médio obtido considerando todos os materiais avaliados. Os híbridos de *E. urophylla*, *E. urophylla* x *E. grandis*, *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), *E. camaldulensis* x *E. grandis* x (*E. urophylla*) e *E. urophylla* x *E. pellita* tiveram valores inferiores de densidade básica em relação aos clones situados nos grupos I e II, com valor máximo de 552 kg m⁻³ obtido para o clone 6.

Ao avaliar a densidade do híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*, Rocha (2011) obteve valor médio de 551 kg m⁻³. A autora não observou efeito significativo para o espaçamento (3,0x1,5 m; 3,0x2,0 m e 3,0x3,0 m) na densidade básica da madeira desse híbrido. Os híbridos *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) e (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* utilizados nesse trabalho apresentaram valor médio de 537 e 479 kg m⁻³, respectivamente.

Em relação à madeira de *E. pellita*, Jesus *et al.* (2017) obtiveram densidade de 466 kg m⁻³, abaixo dos valores médios obtidos para o híbrido *E. urophylla* x *E. pellita*. Os valores obtidos para *E. grandis* x *E. urophylla* assemelham-se aos encontrados por Carneiro *et al.* (2014), Costa (2011), Jesus *et al.* (2017) e são superiores aos encontrados por Medeiros *et al.* (2016), que obteve 460 kg m⁻³ para este híbrido.

Por estar associada ao cálculo da densidade energética e considerando-se o baixo coeficiente de variação observado para o PCS, a densidade básica influenciou diretamente no resultado desta propriedade, destacando-se os mesmos clones mencionados anteriormente nos grupos I e II.

Os resultados de incremento médio anual e em massa seca demonstraram que os clones avaliados apresentaram variação percentual de 109,2 e 99,1%, respectivamente, entre os menores e maiores valores obtidos e coeficientes de variação em torno de 20%. Destacou-se nestes resultados o clone 4, que além de ter maior crescimento em volume de madeira, teve maior produção de massa seca e densidade básica. Com exceção deste clone, nenhum outro híbrido de *Corymbia* foi incluído no grupo I, seja em relação ao melhor desempenho em crescimento volumétrico ou massa seca de madeira.

Fialho *et al.* (2019) obteve valores médios semelhantes de IMA ao avaliar o potencial de híbridos de *Eucalyptus* para fins de produção de carvão vegetal provenientes da mesma região, idade e espaçamento de plantio utilizado nesse trabalho, com valor mínimo e máximo de 25 e 67 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

Miranda *et al.* (2017) ao avaliarem o potencial da utilização de madeira de eucalipto para produção de energia térmica industrial, obtiveram, respectivamente, valores de densidade básica e poder calorífico útil de 500 kg m⁻³ e 2711 kcal kg⁻¹, com custo menor quando comparado ao uso de combustíveis fósseis (Óleo combustível/diesel e GLP). Para *Eucalyptus*, obteve-se, neste estudo, respectivamente, 513 kg m⁻³ e 2861 kcal kg⁻¹ e para os híbridos de *Corymbia* 591 kg m⁻³ e 2900 kcal kg⁻¹, o que possibilitaria maior redução de custos nas condições simuladas pelo autor, em especial na opção pela utilização de híbridos de *Corymbia*.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2021b), a densidade de energia, obtida pela multiplicação do poder calorífico superior e densidade básica, indica o potencial de geração de energia por amostra e também a viabilidade de transporte e armazenamento de biomassas. Os autores obtiveram valores de densidade energética que variaram de 2120 a 2550 Mcal m⁻³ para *Eucalyptus* (híbridos *urograndis*). Estes valores são semelhantes aos obtidos neste estudo para os híbridos de *Eucalyptus*, onde obteve-se valor médio de 2400 Mcal m⁻³. Jesus *et al.* (2017) avaliaram 5 espécies de *Eucalyptus* aos seis anos de idade e obtiveram valor médio de densidade energética de 1402 a 1788 Mcal m⁻³, inferiores aos obtidos neste estudo. Os menores valores observados pelos autores podem ser justificados pela menor densidade básica da madeira dessas espécies na comparação com os valores obtidos para este trabalho.

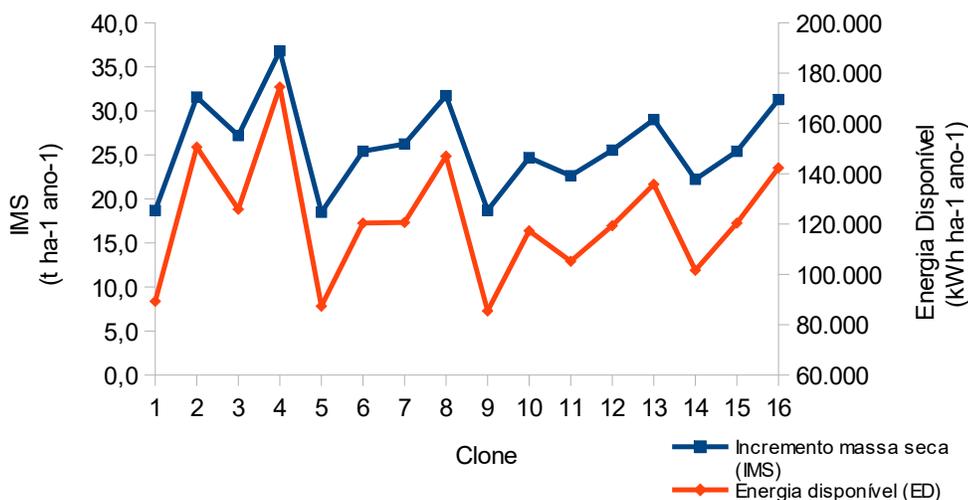
Os clones situados nos dois melhores grupos em produção de massa seca tiveram o mesmo desempenho em relação ao estoque de energia disponível. Os valores de energia disponível também variaram demasiadamente e podem ser explicados considerando-se a maior influência da variação da produção de massa seca em comparação com a menor variação dos valores de PCS, resultando na formação de quatro grupos distintos.

Para os híbridos de *Eucalyptus*, observou-se valores de energia disponível variando entre 85455 e 150615 kWh ha⁻¹ ano⁻¹. Em relação aos híbridos de *Corymbia*, destacou-se o desempenho do clone 4 que teve valor médio superior a 170000 kWh ha⁻¹ ano⁻¹, influenciado pela maior quantidade de massa seca de madeira.

Brun *et al.* (2018) não encontraram diferença estatística para esta propriedade ao avaliar o desempenho de três clones de *Eucalyptus*, aos 5 anos de idade, e obtiveram valores médios próximos aos obtidos para alguns clones avaliados neste trabalho.

Na Figura 3 são representados os valores médios para incremento médio em massa seca e energia disponível por hectare, para os diferentes clones.

Figura 3 - Valores médios de Incremento em massa seca (IMS) e Energia disponível (ED) para os dezesseis materiais genéticos.



A dispersão dos pontos no gráfico mostrou tendências similares para as curvas, reiterando a maior influência nos valores finais obtidos para massa seca de madeira e a menor influência do poder calorífico superior em função da sua menor variação entre os materiais genéticos.

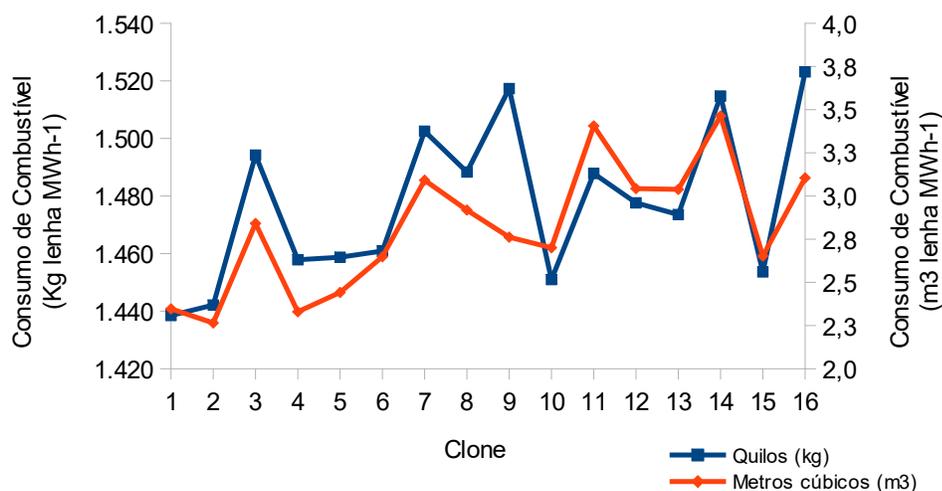
Com base nos resultados das propriedades relacionadas ao potencial de geração térmica e elétrica (DE e ED) dos diferentes materiais genéticos, observou-se que os híbridos de *Corymbia* (clones 1 e 4) e o clone 2 (*E. cloeziana*) foram superiores aos demais, como reflexo, principalmente, da maior densidade básica e massa seca de madeira.

Na simulação do consumo de lenha (kg lenha MWh⁻¹) para atendimento a uma usina termoeletrica com capacidade de 10 MW verificou-se que três dos quatro clones de *Corymbia* (1, 5 e 4) tiveram maior eficiência na conversão juntamente a outros quatro clones de

Eucalyptus (2, 6, 10 e 15). Esses materiais genéticos tiveram, em média, valores mais elevados de poder calorífico útil em relação aos demais.

A simulação da variação do consumo de combustível em função da utilização da madeira em diferentes teores de umidade pode ser observado no APÊNDICE A. Na Figura 4 é apresentada a simulação dos valores médios de consumo de combustível por hora (30% umidade), necessário para alimentação da caldeira e produção de energia, expressos em demanda em massa (Quilos de lenha consumida para geração de 1 Megawatt hora de energia) e volume de madeira (metros cúbicos de lenha consumida para geração de 1 Megawatt hora de energia).

Figura 4 - Simulação dos valores médios do Consumo de combustível em caldeira (madeira a 30% umidade) para os dezesseis materiais genéticos.



Bilgili *et al.* (2015) e Toklu (2017) ressaltam a importância da cogeração de energia em sistemas de combustão a biomassa, onde a eficiência de conversão em energia elétrica está entre 80 a 90%, ao passo que em sistemas convencionais de turbina a vapor a eficiência situa-se entre 17 e 33%.

Ao simularem a utilização de madeira com densidade básica média de 518 kg/m³ em uma UTE de 10 MWh, Ribeiro *et al.* (2021a) obtiveram consumo de 1,32 toneladas de madeira/MWh, valor 10,6% inferior à média obtida para os clones avaliados neste estudo.

Pighinelli, Schaffer e Boateng (2018) simularam a viabilidade econômica da produção de eletricidade a partir de madeira de eucalipto via pirólise rápida a gás residual (TGRP) e pirólise rápida tradicional. Os autores obtiveram, respectivamente, 2 e 2,4 MWh/tonelada de

biomassa, superiores aos valores médios obtidos para os materiais genéticos de *Corymbia* e *Eucalyptus* utilizados neste estudo.

A maior eficiência no consumo volumétrico (m^3 lenha MWh^{-1}) é uma característica importante considerando-se os processos de transporte, armazenamento e abastecimento da caldeira. No agrupamento dos materiais genéticos, o grupo I tornou-se mais restrito e teve os mesmos clones de *Corymbia* citados no consumo anterior e apenas o clone 2 (*E. cloeziana*) como representante de *Eucalyptus*. Vale destacar que esses materiais genéticos se situaram nos grupos de maior densidade básica da madeira, condição que influenciou diretamente nos consumos volumétricos.

Observou-se diferença de 53% na comparação dos materiais genéticos com melhor e pior consumo volumétrico de madeira nas operações da caldeira. Este fato indicou que os custos operacionais envolvidos no processo como um todo tendem a ser muito distintos.

Essa grande variação observada ratificou a necessidade da escolha de materiais genéticos mais eficientes na conversão de biomassa em energia. Para Dias Junior *et al.* (2017), os incentivos de ordem ambiental e econômico são os principais responsáveis pelo crescente interesse na maior inserção da biomassa florestal na geração de termoeletricidade no Brasil.

Hipoteticamente, ao considerar o consumo de madeira por hora dos clones mais e menos eficientes no processo de conversão de energia e um valor médio de R\$ 130/ m^3 da lenha, haveria uma diferença de R\$ 1385,00/hora nas despesas com combustível (lenha) da UTE, sem contar os demais custos envolvidos.

Os valores obtidos relacionados aos clones com menor consumo de lenha para geração elétrica evidenciaram que, com exceção do clone 4, os demais clones com bom desempenho na conversão madeira em energia não foram necessariamente os que tiveram em campo os melhores incrementos volumétricos e em massa seca.

5. CONCLUSÕES

O número de grupos formados na análise de agrupamento demonstrou que os materiais são muito distintos em várias propriedades relevantes para utilização como fonte energética.

Para o gênero *Eucalyptus*, o clone 2 (*E. cloeziana*) destacou-se para as propriedades densidades básica e energética, poder calorífico útil e teve baixo consumo de madeira para geração elétrica.

Os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (clones 1, 4 e 5) e *E. cloeziana* demonstraram maior eficiência na conversão de lenha em energia elétrica na simulação de uma UTE de 10 MW. Desta forma, tem seu uso recomendado considerando-se as vantagens em questões operacionais envolvidas na utilização de caldeiras, principalmente pela maior quantidade de energia por unidade de volume.

O clone 4, híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana*, apresentou desempenho geral superior na produção de energia térmica e elétrica, devido a sua alta densidade básica e energética, energia disponível, poder calorífico útil e baixo consumo de lenha na caldeira. Além destas características, este clone destacou-se em incremento médio anual e massa seca, sendo o mais indicado para as finalidades propostas no trabalho.

Os materiais genéticos selecionados de *Corymbia* e *Eucalyptus* demonstraram que possuem características técnicas desejáveis para suprimento de combustível para fins de cogeração de energia na indústria. De forma complementar, ratificou-se a importância da utilização de madeira com menor teor de umidade, considerando a influência direta nas propriedades avaliadas, que podem vir a depreciar o potencial energético do material.

As diferenças obtidas entre os dezesseis materiais genéticos nas propriedades térmicas e consumo de combustível indicaram que a inobservância das mesmas pode implicar diretamente nos custos operacionais em processos que envolvem utilização de caldeiras.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA - Sistema de informações de geração da ANEEL**. Disponível em: www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao. Acesso em: 14 dez. 2023.
- AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; DAY, K. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 33, p. 117-127, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- BILGILI, M.; OZBEK, A.; SAHIN, B.; KAHRAMAN, A. An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the world. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 323-334, 2015.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010. 114 p.
- BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, Congresso Florestal Brasileiro, 7, 1993, Curitiba, **Anais...**Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993, p.280-282.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, v. 21, p. 185-193, 2007.
- BRUN, E. J.; BERSCH, A. P.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; BARBA, Y. R.; JUNIOR, J. R. D. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* **Floresta**, v. 48, n. 1, p. 87-92, 2018.
- CABRAL, C. P. T.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PIMENTA, A. S.; SOARES, C. P. B.; CARVALHO, A. M. M. L. Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v. 30, p. 659-667, 2006.
- CAPUTO, A. C.; PALUMBO, M.; PELAGAGGE, P. M.; SCACCHIA, F. Economia da utilização da energia da biomassa em usinas de combustão e gaseificação: efeitos de variáveis logísticas. **Biomassa e Bioenergia**. Volume 28, Edição 1, p. 35-51, 2005.
- CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O., SANTOS, R. C. D.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus sp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, p. 375-381, 2014.
- COSTA, J. A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose kraft**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

CRUZ, G. K. A.; PIO, N.S.; IWAKIRI, S. Variação longitudinal e transversal nas propriedades físicas da madeira de tauari vermelho. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019.

DIAS JÚNIOR, A. F. LANA, A. Q.; BERNARDES, F. F.; BRITO, J. O. Madeira, energia e geração de termoeletricidade. **Energia na agricultura**, v. 32, n. 2, p. 157-163, 2017.

DIAS, A. C.; MARCHESAN, R.; ALMEIDA, V. C.; MONTEIRO, T. C.; MORAES, C. B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Ciência da Madeira**, v.9, n.1, p.37-44, 2018.

DIAS, T. A. C.; LORA, E. E.; MAYA, D. M. Y.; DEL OLMO, O. A. Avaliação do potencial global de terras disponíveis para projetos de bioenergia em 2050 dentro dos limites de segurança alimentar. **Política de Uso do Solo**, v.105, 105346, 2021.

DZURENDA, L.; BANSKI, A. The effect of firewood moisture content on the atmospheric thermal load by flue gases emitted by a boiler. **Sustainability**, v. 11, n. 1, p. 284, 2019.

EPE/MME. **Plano nacional de energia 2050. Ministério de Minas e Energia/ Empresa de pesquisa energética.** Disponível em: www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050. Acesso em: 13 nov. 2022.

EPE/MME. **Projeção da demanda de energia elétrica.** Estudos de demanda. Nota técnica DEA 001/17. Disponível em: www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes. Acesso em: 26 ago. 2022.

FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for *Eucalyptus* spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1-9, 2019.

FOREST PRODUCTS LABORATORY - Standard terms for describing wood. USDA. Forest Service. **Forest Products Laboratory Research Paper**. Madison, v. 0171, p. 1-10, 1973.

GOLDEMBERG, J. Atualidade e perspectivas no uso de biomassa para geração de energia. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 15-28, 2017.

GONÇALVES, F.G.; OLIVEIRA, J.T.S.; DELLA LUCIA, R.M.; NAPPO, M.E.; SARTÓRIO, R.C. Densidade e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 33, n. 2, p. 277-288, 2009.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C. B.; SEBBENN, A. M.; FILHO, M. T.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 105-113, 2017.

Instituto Acende Brasil (IAB). **Sumário executivo.** Avaliação do potencial de geração de eletricidade a partir de madeira no Brasil. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Madeira: o que é e como pode ser processada e utilizada.** São Paulo: 1985. 189p.

JESUS, M. S., COSTA, L. J., FERREIRA, J. C., FREITAS, F. P., SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, 47(1), p. 11-16, 2017.

LAVORANTI, O. J.; BELLOTE, A. F. J.; BUSCHINELLI, C. C. A.; SIMIONI, F. J.; ANDRADE, G. C.; SILVA, H. D.; BRITO, J. O.; RIBASKI, J.; DAMASO, M. C. T.; SANTOS, P. E.T.; COURI, S. Florestas energéticas. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, cap. 26, 2021.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp. para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 214-232, 2021.

MACEDO, I. **Estado da arte e tendências das tecnologias para energia**. Brasília: CGEE/MIC, 76 p., 2003.

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

MIRANDA, M. A. S.; RIBEIRO, G. B. D.; VALVERDE, S. R.; ISBAEX, C. Potencial do cavaco da madeira de *Eucalyptus* sp. para produção de energia térmica industrial. **Revista árvore**, v. 41, 2017.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

NIGAY, N. A.; KUZNETSOV, G. V.; SYRODOY, S. V.; GUTAREVA, N. Y. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 42, n. 16, p. 1997-2005, 2020.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALAO, J. P. S. Wood pellets as a sustainable energy alternative in Portugal. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1011-1016, 2015.

PAES, J. B.; BROCCO, V. F.; MOULIN, J. C.; MOTTA, J. P.; ALVES, R. C. Efeitos dos extrativos e da densidade na resistência natural de madeiras ao térmita *Nasutitermes corniger*. **Cerne**, v. 21, p. 569-578, 2015.

PAULA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Revista Cerne**, v.17, n.2, p.237-246, 2011.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p.

PIGHINELLI, A. L.; SCHAFFER, M. A.; BOATENG, A. A. Utilization of eucalyptus for electricity production in Brazil via fast pyrolysis: A techno-economic analysis. **Renewable Energy**, v. 119, p. 590-597, 2018.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

RIBEIRO, G. B. D.; BATISTA, F. R. S.; MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; AMARAL, D. G. Análise de viabilidade técnico-econômica de uma usina de eucalipto utilizando cavacos de madeira. **Biomassa e Bioenergia**, v. 153, p. 106218, 2021a.

RIBEIRO, G. B. D.; MAGALHAES, M. A.; BATISTA, F. R. S.; MIRANDA, M. A. S.; VALVERDE, S. R.; CARNEIRO, A. C. O. Avaliação da utilização de cavacos de madeira de eucalipto como combustível para usinas termelétricas. **Maderas: Ciencia Y Tecnologia**, vol. 23, 29, 2021b.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Uningá Review**, v. 29, n. 2, 2017.

SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada**. Tese de Doutorado. USP, Piracicaba, SP, 2015.

SHABANI, N.; SOWLATI, T. Um modelo de programação não linear inteiro misto para otimização tática da cadeia de valor de uma usina de biomassa de madeira. **Energia Aplicada**, v. 104, p.353-361, 2013.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi Standard Methods**. Atlanta: Tappi, 2001.

TOKLU, E. Biomass energy potential and utilization in Turkey. **Renewable Energy**, v. 107, p. 235-244, 2017.

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, p. 661-666, 2015.

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

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.

WU, W.; HASEGAWA, T.; OHASHI, H.; HANASAKI, N.; LIU, J.; MATSUI, T.; FUJIMORI, S.; MASUI, T.; TAKAHASHI, K. Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures. **GCB Bioenergy**, 11 (9), p. 1041-1055, 2019.

ZERBE, J. I. Thermal energy, electricity, and transportation fuels from wood. **Forest product journal**. Vol. 56, n°. 1: p. 6-14, 2006.

APÊNDICE A - Simulação do consumo de combustível dos materiais genéticos avaliados considerando-se três diferentes teores de umidade da madeira (U=20, 30 e 50%).

| Parâmetros | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Densidade básica (kg/m ³) | 613 | 637 | 526 | 626 | 598 | 552 | 486 | 510 | 550 | 538 | 437 | 486 | 488 | 437 | 548 | 490 |
| IMA s/c (m ³ /ha/ano) | 26 | 38 | 43 | 51 | 26 | 41 | 49 | 56 | 31 | 41 | 47 | 48 | 55 | 47 | 42 | 57 |
| Poder calorífico útil (kcal kg ⁻¹) U=20% | 3455 | 3446 | 3329 | 3410 | 3408 | 3403 | 3311 | 3343 | 3280 | 3426 | 3344 | 3366 | 3375 | 3285 | 3420 | 3268 |
| Poder calorífico útil (kcal kg ⁻¹) U=30% | 2948 | 2941 | 2838 | 2909 | 2907 | 2903 | 2822 | 2850 | 2795 | 2923 | 2851 | 2870 | 2878 | 2800 | 2917 | 2784 |
| Poder calorífico útil (kcal kg ⁻¹) U=50% | 1934 | 1929 | 1856 | 1906 | 1905 | 1902 | 1845 | 1864 | 1825 | 1916 | 1865 | 1879 | 1885 | 1828 | 1912 | 1817 |
| Densidade energética (Mcal m ⁻³) | 2931 | 3038 | 2436 | 2966 | 2825 | 2608 | 2235 | 2357 | 2514 | 2557 | 2030 | 2270 | 2288 | 2001 | 2596 | 2232 |
| Energia disponível (kWh ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 89322 | 150615 | 125907 | 174507 | 87399 | 120405 | 120641 | 146992 | 85455 | 117354 | 105235 | 119367 | 135808 | 101652 | 120398 | 142359 |
| Consumo combustível (Umidade da madeira = 20%) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (m ³ lenha MWh ⁻¹) | 2,0 | 1,9 | 2,4 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 2,5 | 2,4 | 2,3 | 2,9 | 2,6 | 2,6 | 3,0 | 2,3 | 2,6 |
| (kg lenha MWh ⁻¹) | 1227 | 1230 | 1274 | 1244 | 1244 | 1246 | 1281 | 1269 | 1293 | 1238 | 1268 | 1260 | 1257 | 1291 | 1240 | 1298 |
| Consumo combustível (Umidade da madeira = 30%) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (m ³ lenha MWh ⁻¹) | 2,3 | 2,3 | 2,8 | 2,3 | 2,4 | 2,6 | 3,1 | 2,9 | 2,8 | 2,7 | 3,4 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 2,7 | 3,1 |
| (kg lenha MWh ⁻¹) | 1438 | 1442 | 1494 | 1458 | 1459 | 1461 | 1503 | 1488 | 1517 | 1451 | 1488 | 1478 | 1474 | 1515 | 1454 | 1523 |
| Consumo combustível (Umidade da madeira = 50%) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (m ³ lenha MWh ⁻¹) | 3,6 | 3,5 | 4,3 | 3,6 | 3,7 | 4,0 | 4,7 | 4,5 | 4,2 | 4,1 | 5,2 | 4,6 | 4,6 | 5,3 | 4,0 | 4,8 |
| (kg lenha MWh ⁻¹) | 2192 | 2198 | 2285 | 2225 | 2226 | 2230 | 2299 | 2275 | 2324 | 2213 | 2274 | 2257 | 2251 | 2319 | 2218 | 2334 |

CAPÍTULO II - INSIGHTS DAS PROPRIEDADES DE MADEIRAS DE *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. E SEUS IMPACTOS NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

RESUMO

As empresas florestais, pautadas no conceito de qualidade e eficiência energética, buscam cotidianamente o desenvolvimento de novos genótipos para utilização em plantios comerciais. Neste sentido, conhecer e correlacionar as propriedades da madeira e do carvão vegetal são atividades fundamentais para contribuir no processo de classificação de novos materiais genéticos, bem como aumentar a eficiência de conversão e qualidade do produto final. O estudo teve como objetivo principal avaliar diferentes genótipos superiores de *Eucalyptus* e *Corymbia* para produção de carvão vegetal. Foram avaliados dezesseis materiais genéticos, provenientes de madeiras de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp. e seus híbridos, por meio de três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6x1,5 m. Determinou-se as propriedades físicas, anatômicas e químicas da madeira, bem como o rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal para atendimento a indústria. Os resultados obtidos foram avaliados preliminarmente pela análise exploratória dos dados para observação da variabilidade geral existente entre os materiais genéticos e, posteriormente, submetidos às análises de componentes principais (ACP) e de agrupamento hierárquico. Na ACP obteve-se de forma satisfatória a redução da dimensionalidade dos dados, com variância explicada superior a 65% nas duas primeiras componentes principais. A análise de agrupamento permitiu corroborar as evidências verificadas na ACP, onde os híbridos de *Corymbia* tiveram algumas propriedades muito distintas em relação aos resultados obtidos para os híbridos de *Eucalyptus* (por exemplo, as densidades básicas da madeira, teores de lignina e extrativos, densidade aparente e rendimento gravimétrico em carvão vegetal). Dentre os híbridos de *Corymbia*, o material genético 4 (*C. citriodora* x *C. torelliana*) foi o mais indicado para as finalidades propostas, considerando-se os melhores resultados observados de forma conjunta nas propriedades da madeira, do carvão vegetal e crescimento volumétrico. Dentre os materiais genéticos de *Eucalyptus*, o clone de *E. cloeziana* teve o melhor desempenho em relação aos demais, destacando-se, principalmente, pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal, densidade básica da madeira, densidade aparente do carvão vegetal e baixo teor de cinzas. Em relação aos híbridos tri-cross, os clones 10 (*E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*)) e 15 ((*E.*

camaldulensis x *E. grandis*) x *E. urophylla*) também demonstraram ser indicados para produção de carvão, apresentando valores satisfatórios de rendimento gravimétrico, teores de lignina total e densidade aparente do carvão vegetal. Pelo exposto, o material genético selecionado de *Corymbia* proporciona vantagens como menor tempo de secagem das toras no campo, em razão da menor relação C/A, carvão vegetal com maior resistência mecânica para uso no alto-forno, porém, possui teor de cinzas mais elevado. Já os materiais genéticos selecionados de *Eucalyptus* tiveram rendimentos gravimétricos em carvão vegetal superiores a 35% e teores de cinzas inferiores a 1%, porém, produzem carvão vegetal mais friável. Todos os 4 materiais genéticos selecionados são recomendados para a produção de carvão vegetal e, na escolha dentre estas opções, deve-se observar os critérios de maior impacto no processo de produção e qualidade do produto final.

Palavras-chave: Tri-cross; Seleção de clones; *Corymbia*.

ABSTRACT

Forestry companies, guided by the concept of quality and energy efficiency, continuously strive to develop new genotypes for commercial plantation use. Within this context, understanding and correlating wood and charcoal properties are crucial for classifying new genetic materials and enhancing the efficiency and quality of the final product. The primary objective of this study was to assess various superior genotypes of *Eucalyptus* and *Corymbia* for charcoal production. We examined 16 genetic materials derived from the wood of *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*, *Eucalyptus* spp., and their hybrids, using three trees of average diameter per treatment, aged 81 months, with a planting spacing of 6x1.5 m. We determined the physical, anatomical, and chemical properties of wood, along with the gravimetric yield and properties of charcoal, to meet industry needs. Initial exploratory data analysis was conducted to examine the variability general among genetic materials, followed by principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering. The PCA effectively reduced data dimensionality, with the first two principal components accounting for over 65% of the variance. Cluster analysis confirmed PCA findings, distinguishing *Corymbia* hybrids by their unique properties (e.g. wood basic density, lignin and extractive contents, apparent density, and gravimetric yield of charcoal) from those of *Eucalyptus* hybrids. Among the *Corymbia* hybrids, genetic material 4 (*Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*) was identified as most suitable for the described purposes, given its superior wood and charcoal

properties and volumetric growth. Among the *Eucalyptus* genotypes, the *E. cloeziana* clone outperformed the rest, particularly in charcoal gravimetric yield, wood basic density, charcoal apparent density, and low ash content. As for tri-cross hybrids, clones 10 (*E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*)) and 15 ((*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*) were also deemed suitable for charcoal production, exhibiting favorable gravimetric yields, total lignin content, and apparent density in charcoal. *Corymbia*-selected genetic materials offer advantages like shorter log drying times in the field due to lower C/A ratios and mechanically stronger charcoal suitable for blast furnaces, albeit with higher ash content. *Eucalyptus*-selected materials yielded charcoal gravimetric yields over 35% and ash contents below 1%, but produced more friable charcoal. All four selected genetic materials are recommended for charcoal production, and selection criteria should consider their impact on the production process and final product quality.

Keywords: Tri-cross; Clone selection; *Corymbia*.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de madeira oriunda de florestas plantadas para produção de carvão vegetal tem se consolidado anualmente para atendimento à demanda por energia sustentável nas indústrias nacionais de siderurgia e ligas metálicas. Dados da EPE (2022), publicados no balanço energético nacional, evidenciaram que em 2021 a utilização da lenha e carvão vegetal tiveram participação de 8,7% na matriz energética e, especificamente na indústria, representaram 13%, sendo superada pela participação do carvão mineral e derivados, eletricidade e bagaço de cana.

A indústria brasileira do aço teve iniciativa pioneira de utilizar o carvão vegetal como agente redutor do minério de ferro nos altos-fornos, com menores emissões de carbono. A redução das emissões de gases de efeito estufa, devido ao plantio de florestas, é um diferencial do Brasil em relação aos demais países produtores de aço (IAB, 2021).

Para atendimento à crescente demanda por madeira e carvão vegetal, os programas atuais de melhoramento genético de *Eucalyptus* e *Corymbia* têm priorizado contemplar a produtividade, qualidade da madeira e do produto final, condições adaptativas e resistência a pragas e doenças (Valente, 2017). Massuque *et al.* (2022) relataram que o uso de novas espécies para uso energético amplia e diversifica a base genética no país e pode melhorar o desempenho energético e o balanço de massa de carbonização, além de reduzir as emissões de

gases de efeito estufa nas siderúrgicas nacionais. Segundo Froehlich e Moura (2014), Oliveira *et al.* (2023), Santos *et al.* (2016) e Soares *et al.* (2014) a qualidade do produto final depende da qualidade da madeira e estão associados a espécie, idade, características químicas e condições do processo de fabricação.

Em 2022, os plantios florestais destinados à produção de carvão vegetal representaram 11% da área total reflorestada e foram consumidas pela indústria siderúrgica 6,9 milhões de toneladas de carvão vegetal (IBA, 2023). Neste mesmo período, no estado de Minas Gerais, o consumo de carvão vegetal superou 14,5 milhões de metros cúbicos, representando o maior valor da série histórica dos últimos 10 anos (SINDIFER, 2023).

Neste contexto, faz-se necessário expansão das áreas reflorestadas para atendimento ao setor e que as madeiras oriundas desses plantios tenham qualidade satisfatória para melhor conversão em carvão vegetal. Logo, torna-se imprescindível conhecer as principais propriedades da madeira e do carvão vegetal que possam subsidiar tecnicamente os processos decisórios de escolha de materiais genéticos de *Eucalyptus* e *Corymbia* para atendimento a demanda das empresas siderúrgicas.

É emergencial incluir nos programas de melhoramento as análises de outros índices de qualidade da madeira que, alinhados ao desempenho de campo dos genótipos, promoverão maior conversão da madeira em carvão vegetal com redução dos custos de produção (Rodrigues *et al.*, 2008).

Como as questões associadas à silvicultura de materiais genéticos do gênero *Corymbia* estão de certa forma controladas, deve-se buscar a otimização da produção de carvão vegetal a partir dos novos cruzamentos genéticos (Loureiro *et al.*, 2021).

Já em relação aos híbridos tri-cross de *Eucalyptus*, verifica-se que as informações sobre a qualidade da madeira e do carvão vegetal são insuficientes em comparação com os híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* já utilizados comercialmente.

Desta forma, este trabalho visou a utilização de análise estatística multivariada para classificar materiais genéticos superiores de *Eucalyptus* e *Corymbia* por meio das principais propriedades químicas, físicas e anatômicas da madeira e das propriedades químicas, físicas e rendimento gravimétrico do carvão vegetal.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi a utilização de análise estatística multivariada na classificação de materiais genéticos superiores de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. para produção de energia por meio das principais propriedades da madeira e do carvão vegetal.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar a densidade básica, relação cerne/alburno e siringil/guaiacil, índice de cristalinidade da celulose, composição química elementar, estrutural e imediata, poder calorífico superior e dimensões anatômicas das fibras e elementos de vaso das madeiras de diferentes genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia*;
- Obter a densidade aparente, poder calorífico superior, composição química imediata, friabilidade e o rendimento gravimétrico do carvão vegetal em função dos genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia*;
- Descrever a variabilidade dos materiais genéticos nas propriedades da madeira e do carvão vegetal por meio de estatística descritiva;
- Utilizar a análises de componentes principais e de agrupamento para classificação de materiais genéticos mais apropriados para produção de carvão vegetal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da localização do teste clonal e materiais genéticos

Para a realização do trabalho foram utilizados 16 materiais genéticos, sendo colhidas três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6x1,5 m, provenientes de plantios situados na cidade de Itamarandiba/MG (latitude 17° 44' 45" S; longitude 42° 45' 11" W e altitude 1.000m), totalizando 48 unidades amostrais.

A região de instalação do experimento tem topografia plana (chapada) e vegetação nativa do bioma Cerrado. O solo é do tipo latossolo vermelho distrófico típico e vermelho amarelo distrófico típico, com textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturado. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.166 mm e a temperatura média de 21°C. O clima pela classificação de Köppen é classificado como sendo tropical de altitude – Cwa – temperado úmido com inverno seco e verão quente (Henriques *et al.*, 2017).

O teste clonal foi instalado em parcelas de 8 linhas com 8 plantas para cada material genético. Os diâmetros à altura do peito (DAP's) das árvores selecionadas variaram entre 14,2 a 22,8 cm, com valor médio de 18,3 cm. As alturas comerciais (Hc's) variaram entre 17,7 a 25,3 m, com valor médio de 22,11 m.

Utilizou-se o método de *Smallian* para obtenção dos volumes individuais das árvores. O volume total de madeira produzido por hectare foi calculado pela multiplicação do volume individual das árvores pelo número de árvores por hectare.

O valor do Incremento médio anual (IMA), com e sem casca, foi obtido a partir da relação entre os respectivos volumes de madeira por hectare ($m^3 ha^{-1}$) e a idade (anos).

Na Tabela 1 é apresentada a descrição das combinações genéticas que foram utilizadas assim como informações dendrométricas relacionadas a volumetria.

Tabela 1 - Descrição dos genótipos de *Corymbia* e *Eucalyptus* utilizados na pesquisa.

| Clones | Materiais genéticos | % casca (**) | IMA s/casca (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) | IMA c/casca (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|--------|---|--------------|--|--|
| 1 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 13,9 | 26,2 | 30,5 |
| 2 | <i>Eucalyptus cloeziana</i> | 23,4 | 37,9 | 49,6 |
| 3 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 16,5 | 43,2 | 51,7 |
| 4 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 12,9 | 51,2 | 58,8 |
| 5 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 14,4 | 26,5 | 30,9 |
| 6 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. (*) | 10,5 | 41,2 | 46,1 |
| 7 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. (*) | 9,7 | 48,7 | 54,0 |
| 8 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. (*) | 10,6 | 55,6 | 62,2 |
| 9 | <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 30,6 | 34,0 |
| 10 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) | 10,8 | 41,0 | 45,9 |
| 11 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,3 | 46,9 | 51,8 |
| 12 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 8,0 | 48,4 | 52,6 |
| 13 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 55,5 | 59,5 |
| 14 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 7,7 | 46,9 | 50,8 |
| 15 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 41,8 | 46,4 |
| 16 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus pellita</i> | 11,1 | 56,7 | 63,8 |

(*) Híbrido espontâneo de *Eucalyptus* spp.; (**) Valor médio ponderado pelo volume das árvores.

3.2. Preparo das amostras de madeira

Para a caracterização da madeira foram retirados discos com espessura aproximada de 7 cm, nas posições da base (posição 0), DAP (diâmetro a altura do peito), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial.

Antes da subdivisão dos discos foram traçadas duas retas perpendiculares passando sobre a medula, para a medição das regiões correspondentes ao cerne e alburno. Posteriormente, cada disco foi subdividido em 4 partes, considerando a medula como referência central. Utilizou-se duas cunhas opostas de cada posição no sentido base topo da árvore para obter amostras da região do cerne e alburno que foram utilizadas para a caracterização anatômica.

Na sequência, essas cunhas foram utilizadas para formação de amostra composta na forma de serragem após processamento em moinho tipo Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 2001). A amostra composta obtida por árvore foi utilizada para as análises químicas elementar, estrutural e imediata, poder calorífico superior, relação siringil/guaiacil, índice de cristalinidade da celulose e principais componentes inorgânicos da madeira. As duas cunhas opostas restantes foram utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira. Os procedimentos realizados para obtenção dos discos e preparo das amostras foram sumarizados na Figura 1.

Figura 1 - Seleção dos materiais genéticos no talhão experimental, retirada dos discos no sentido base topo da árvore (altura comercial), obtenção de cunhas opostas e amostra composta de serragem de madeira.



Fonte: Elaboração própria

3.3. Propriedades da madeira

A densidade básica da madeira foi obtida conforme ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003), com valores médios calculados por meio da média aritmética das densidades obtidas das cunhas opostas e da ponderação pelos valores dos volumes das seções ao longo do tronco, conforme descrito por Vital (1984) e apresentado na equação 1.

$$DB = \frac{\sum_{i,j=1}^n \frac{(DB_i + DB_j)}{2} \times v_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

Onde: DB: Densidade básica da madeira (kg m^{-3}); DB_i : Densidade básica do disco i ; Densidade básica do disco j ; v_i : volume da seção i pela fórmula de *Smallian* (m^3); V_i : volume total (m^3).

O poder calorífico superior da madeira foi determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300 (ABNT NBR 8633, 1984).

A composição química elementar da madeira foi realizada em duplicatas, em um equipamento da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube CHNS-O, tendo subtraído dos valores médios obtidos a fração inorgânica contida na madeira, por meio do teor de cinzas (Paula *et al.*, 2011). O oxigênio foi quantificado pelo somatório do C, N, H, S decrescido de 100.

O teor de extrativos totais foi determinado de acordo com TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), em duplicatas, substituindo o etanol/benzeno por etanol/tolueno. A lignina solúvel e insolúvel foi determinada de acordo com as normas Tappi UM 250 e Tappi T222 om-98 (1998), respectivamente. O teor de lignina total foi obtido somando-se os teores de lignina insolúvel e lignina solúvel. O teor de cinzas foi determinado conforme a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), adaptando o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura de $750\text{ }^\circ\text{C}$ por $600\text{ }^\circ\text{C}$. O teor de holoceluloses foi calculado subtraindo-se de 100 os teores de lignina total, extrativos e teor de cinzas.

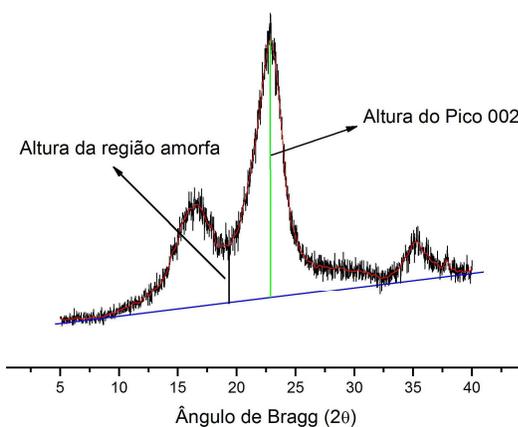
A relação siringil/guaiacil foi obtida segundo a metodologia proposta por Lin e Dence (1992), utilizando-se amostras compostas em duplicatas de serragem de madeira livre de extrativos. Na oxidação alcalina para a degradação da lignina utilizou-se nitrobenzeno, com posterior análise de cromatografia líquida.

A composição química imediata da madeira foi obtida seguindo o procedimento preconizado na norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

As análises dos teores dos minerais da madeira foram feitas em amostras compostas, classificadas em peneiras sobrepostas 40-60 mesh, a partir das seis posições longitudinais (uma árvore por material genético). Os teores dos minerais foram determinados pelo método Kjeldahl (N), digestão nitricoperclórica na proporção 4:1 e espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (K, Ca, Mg, S, P, Fe, Mn, Cu, Zn e B).

A técnica utilizada para a determinação do índice de cristalinidade (IC) foi a difração de raio-X (Baumhardt Neto, 2003). Foram realizadas à temperatura ambiente em um sistema de difração D8-Discover (Bruker) e varredura θ - 2θ de 10 a 40 graus, com passo de 0.05 graus por segundo. Para o cálculo do IC adotou-se o método de Segal *et al.* (1959), por meio da relação entre os picos de intensidade máxima ($2\theta = 26,15^\circ$) e mínima ($2\theta = 20,91^\circ$) de difração, após correção da linha base. Na Figura 2 é possível observar a linha base e as posições onde foram realizadas as leituras para obtenção dos parâmetros. Foi utilizado o software Origin 8.0 (ORIGINLAB, 2007) para confecção das curvas e identificação dos picos.

Figura 2 - Perfil da curva de difração de raio-X.



Fonte: Elaboração própria (ORIGINLAB, 2007)

O índice de cristalinidade (IC) foi calculado por meio da equação 2:

$$IC = \left(\frac{I_{002} - I_{AM}}{I_{002}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde, I_{002} é a altura do pico 002; I_{AM} é a altura da região amorfa.

A relação cerne/alburno foi obtida de acordo com a metodologia proposta por Evangelista (2007). Para tanto, em cada disco foram traçadas duas retas perpendiculares passando sobre a medula e com auxílio de uma lupa foi identificado a transição/limite do

alburno para o cerne. A distância das bordas até o início do cerne foi medida com a régua nas duas extremidades da reta.

Em relação às medições de cerne/alburno nos discos de híbridos de *Corymbia*, destacou-se a menor nitidez (menor contraste de cores) da região de transição do cerne para o alburno e maiores variações ou irregularidades nas circunferências.

Para obter o diâmetro do cerne foi utilizado a régua, fazendo-se uma medida de um lado e posteriormente outra medida do outro lado. A relação C/A foi calculada pela equação 3:

$$C/A = \frac{Dc^2}{D^2 - Dc^2} \quad (3)$$

Onde, Dc: Diâmetro do cerne (cm); D: Diâmetro do disco sem casca (cm).

Obs: Os valores médios da relação C/A para cada árvore é obtida a partir da média ponderada da relação C/A dos discos de madeira de cada árvore, utilizando o volume das toras entre dois discos consecutivos como fator de ponderação.

Para a morfologia das fibras e vasos, retirou-se de cada disco uma amostra da região do cerne e outra do alburno para maceração e cortes histológicos. As fibras individualizadas foram obtidas a partir dos fragmentos dissociados com utilização de solução aquecida na proporção 1:1 de peróxido de hidrogênio e ácido acético por 48 horas (Dadswell, 1972). Foram mensuradas trinta fibras por amostra para avaliação do comprimento, largura da fibra e diâmetro do lume. A espessura da parede das fibras foi determinada de forma indireta, pela relação entre a largura da fibra e diâmetro do lume. A fração parede das fibras foi determinada de acordo com a equação 4:

$$FP = \frac{2 \times EP}{LF} \times 100 \quad (4)$$

As amostras das regiões do cerne e alburno com dimensões 2x2x2 cm foram imersas em água quente por 48 horas e, posteriormente, efetuou-se cortes histológicos com 16 µm de espessura no plano transversal em micrótomo de deslize horizontal. Os cortes foram clarificados, corados e colocados sobre lâmina em solução de glicerina e água, na proporção de 1:1. Trinta vasos foram mensurados em cada lâmina confeccionada para obtenção da frequência por milímetro quadrado e diâmetro tangencial. Para a realização de todas as medições utilizou-se microscópio ótico com câmera acoplada com auxílio do software Axio-Vision.

3.4. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal

A carbonização da madeira foi realizada a partir de amostras compostas representativas de cada material genético. Utilizou-se aproximadamente entre 200 a 300 gramas de madeira, absolutamente secos, que foram inseridos em reator metálico cilíndrico (30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro) e, na sequência, levado ao forno elétrico (tipo mufla), adaptado com sistema de condensação tubular de gases resfriado à água. O tempo de carbonização foi de aproximadamente 7,5 horas, com uma taxa de aquecimento média de 1,67 °C.min⁻¹ até a temperatura final de 450 °C.

O rendimento gravimétrico foi determinado segundo a equação 5:

$$RG(\%) = \left(\frac{M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad (5)$$

Em que: M_i = Massa de madeira seca e M_f = Massa seca de carvão vegetal.

A composição química imediata do carvão foi obtida de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (1986), em que foram determinados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca.

A densidade relativa aparente foi determinada por meio da imersão em mercúrio, utilizando o método hidrostático, conforme Vital (1984).

O poder calorífico superior foi determinado utilizando-se bomba calorimétrica adiabática IKA300, segundo metodologia descrita pela ABNT NBR 8633 (1984).

A resistência do carvão vegetal foi obtida a partir da determinação da sua friabilidade, utilizando-se friabilômetro eletrônico (MA-791). Foram utilizadas amostras de 20 gramas de carvão, com granulometria compreendida entre 19 e 25 mm. A rotação do equipamento foi de 35,5 RPM e o tempo de execução do ensaio foi de 14 minutos. O carvão foi classificado em peneira de 9,5 mm, pesando-se a fração retida acima desta granulometria (Oliveira *et al.*, 1982). O teor de finos foi calculado pela equação 6:

$$\text{Finos}(\%) = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad (6)$$

Em que: M_i = massa inicial da amostra e M_f = massa do carvão retido na peneira de 9,5mm

3.5. Incremento em massa seca (IMS)

O incremento em massa seca, expresso em $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, foi determinado utilizando-se os valores do IMA e da densidade básica da madeira (DB), de acordo com a equação 7.

$$IMS = IMA \times DB \quad (7)$$

Onde: IMS: Incremento em massa seca ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); IMA: Incremento médio anual ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); DB: Densidade básica da madeira ($kg\ m^{-3}$).

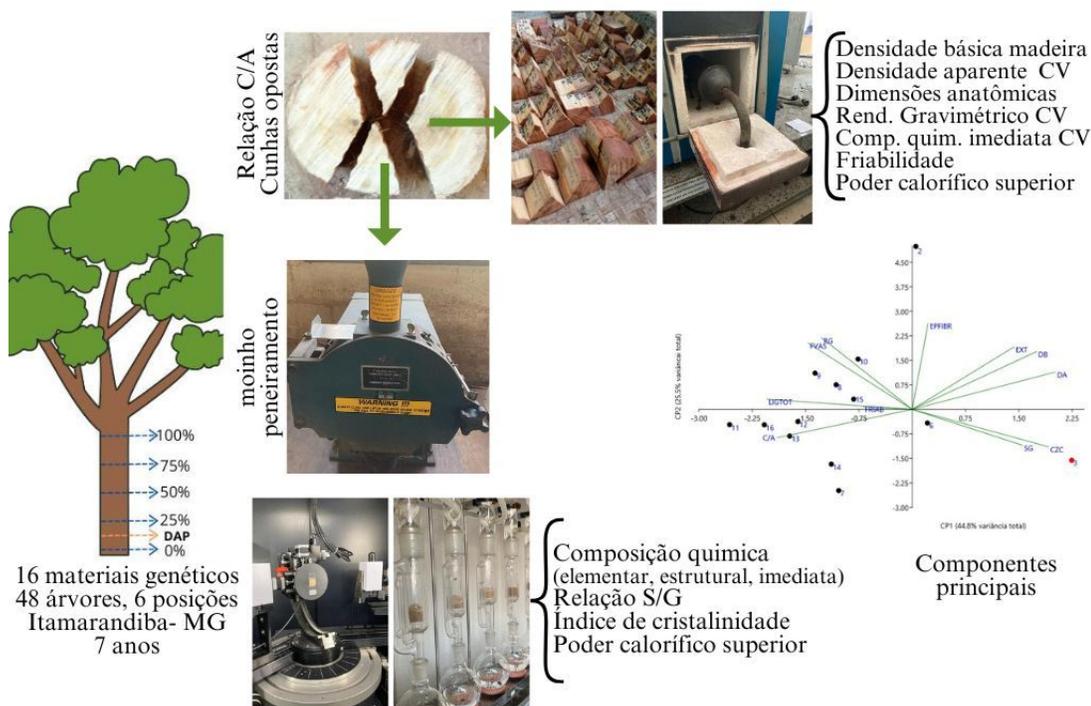
3.6. Incremento médio anual em carvão (IMA_{cv})

O incremento médio anual, em carvão vegetal, foi obtido a partir da massa seca de madeira, por hectare, do rendimento gravimétrico e do percentual de finos gerados, utilizando-se a equação 8:

$$IMA_{cv} = IMS \times \left(\frac{RG}{100} \right) \times \left(\frac{100 - F}{100} \right) \quad (8)$$

Em que: IMA_{cv}: Incremento médio anual em carvão vegetal ($t\ carvão\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); IMS: incremento médio anual em massa seca ($t\ madeira\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); RG: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); F: Friabilidade (%).

Resumo gráfico



3.7. Análise estatística

Para avaliação dos resultados experimentais foi considerado o delineamento inteiramente casualizado com dezesseis tratamentos (materiais genéticos) e três repetições (árvores), totalizando 48 unidades amostrais.

A análise descritiva foi utilizada como estudo preliminar, visando obter as medidas de dispersão e posição.

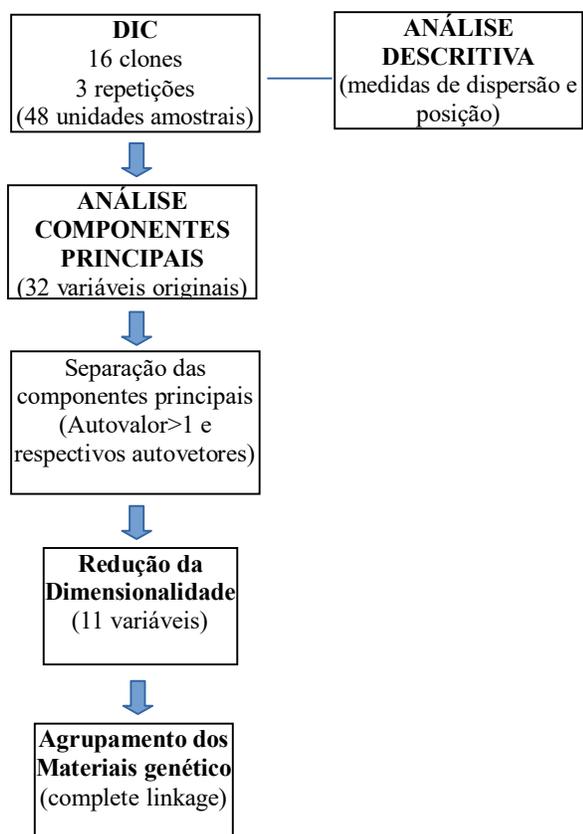
Em função do número de variáveis, utilizou-se a análise multivariada de componentes principais (PCA) após a normalização dos dados apresentados em diferentes unidades. Obteve-se, desta forma, os principais componentes resultantes de combinação linear que capturaram o máximo de informações com a maior variância explicada. Para a realização das análises, utilizou-se os softwares estatísticos *R* versão 4.1.0 (R Core Team, 2021), *Past* versão 4.03 e *Statistica* versão 7.

Na realização da ACP, a seleção das propriedades mais importantes para explicar a variação do conjunto de dados foi realizada conforme procedimento recomendado por Jolliffe (2002), retirando-se sempre apenas uma propriedade de maior autovetor na componente de menor autovalor, com posterior reinício do processo.

Após a redução da dimensionalidade efetuou-se a organização dos materiais genéticos em grupos homogêneos por meio da análise de agrupamentos hierárquicos aglomerativos. Para melhor visualização dos grupos formados, os agrupamentos foram representados graficamente por *dendrograma*, utilizando-se o método *Complete Linkage*.

A Figura 3 ilustra o resumo das etapas para identificação de similaridade ou dissimilaridade entre os materiais genéticos de acordo com as variáveis selecionadas na ACP.

Figura 3 - Fluxograma das principais etapas para agrupamento dos materiais genéticos (ACP e Agrupamento hierárquico aglomerativo)



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas de posição e dispersão das propriedades da madeira e carvão vegetal fornecidas pela análise descritiva, apesar de não possibilitarem a seleção em grupos ou indicação de melhor desempenho, permitiram visualizar a variação geral dos resultados dentro das propriedades analisadas considerando todos os materiais genéticos avaliados.

A análise do coeficiente de variação baseou-se na classificação de Warrick e Nielsen (1980): < 12% (baixos); >12% e <60% (médios) e >60% (altos). A maioria das propriedades teve baixo coeficiente de variação, conforme verificado na Tabela 2. Em relação às propriedades que tiveram coeficiente de variação médio, algumas comumente apresentam esse tipo de comportamento conforme verificado em outros trabalhos, como teor de cinzas e nitrogênio, friabilidade e relação cerne/alburno (Loureiro *et al.*, 2021).

Tabela 2 - Valores médios e variação das propriedades da madeira e carvão vegetal dos dezesseis clones

| Madeira | Média^(*) | Mínimo | Máximo | Amplitude | Variação (%) |
|--|----------------------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|
| Densidade básica (kg m ⁻³) | 533 (62,2) (11,67) | 437 | 637 | 200 | 45,7 |
| Incremento médio anual (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 49,3 (10,2) (20,77) | 30,5 | 63,8 | 33,3 | 109,2 |
| Relação cerne/alburno | 0,63 (0,32) (51,59) | 0,09 | 1,34 | 1,25 | 1389 |
| Relação S/G | 2,73 (0,29) (10,93) | 2,37 | 3,57 | 1,2 | 50,6 |
| Índice de Cristalinidade (%) | 72,5 (6,36) (8,77) | 57,69 | 98,49 | 40,8 | 70,7 |
| Carbono (%) | 49,1 (0,43) (0,87) | 48,5 | 49,9 | 1,4 | 2,9 |
| Hidrogênio (%) | 5,9 (0,16) (2,66) | 5,4 | 6,1 | 0,7 | 13 |
| Oxigênio (%) | 44,6 (0,44) (0,98) | 43,8 | 45,5 | 1,7 | 3,9 |
| Nitrogênio (%) | 0,07 (0,02) (28,6) | 0,04 | 0,1 | 0,06 | 150 |
| Carbono fixo (%) | 14,44 (0,86) (5,99) | 12,08 | 16,41 | 4,33 | 35,8 |
| Materiais voláteis (%) | 85,22 (0,85) (1) | 83,21 | 87,38 | 4,17 | 5,0 |
| Cinzas (%) | 0,34 (0,11) (32,57) | 0,2 | 0,6 | 0,4 | 200 |
| Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹) | 4675 (76,9) (1,64) | 4550 | 4782 | 232 | 5,1 |
| Lignina total (%) | 29,59 (1,97) (6,67) | 25,07 | 32,57 | 7,5 | 29,9 |

| | | | | | |
|---|----------------------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|
| Extrativos totais (%) | 5,41 (1,79) (33,13) | 1,67 | 9,49 | 7,82 | 468 |
| Holoceluloses (%) | 64,99 (2,15) (3,31) | 61,06 | 69,35 | 8,29 | 13,6 |
| Espessura da parede da fibra (μm) | 4,73 (0,25) (5,34) | 4,2 | 5,4 | 1,2 | 28,6 |
| Fração parede da fibra (%) | 50,2 (1,79) (3,57) | 45,1 | 55,4 | 10,3 | 22,8 |
| Diâmetro de vasos (μm) | 119,37 (5,42) (4,54) | 110,3 | 132,1 | 21,8 | 19,8 |
| Frequência de vasos (vasos mm^{-2}) | 10,39 (0,85) (8,18) | 8,9 | 12,1 | 3,2 | 35,9 |
| Carvão vegetal | Média^(*) | Mínimo | Máximo | Amplitude | Variação (%) |
| Rendimento gravimétrico (%) | 34,52 (0,86) (2,5) | 32,58 | 36,55 | 3,97 | 12,2 |
| IMAcv ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) | 8,2 (1,69) (20,61) | 4,84 | 12,27 | 7,43 | 153,5 |
| Poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) | 7044,2 (333,5) (4,71) | 6420,2 | 7814,8 | 1394,6 | 21,7 |
| Densidade aparente (kg m^{-3}) | 343,39 (58,87) (17,1) | 222,6 | 455,6 | 233 | 104,7 |
| Carbono fixo (%) | 76,1 (1,16) (1,52) | 73,8 | 78,7 | 4,9 | 6,6 |
| Materiais voláteis (%) | 22,98 (1,27) (5,54) | 20 | 25,8 | 5,8 | 29 |
| Cinzas (%) | 0,97 (0,35) (36,8) | 0,4 | 1,8 | 1,4 | 350 |
| Friabilidade (%) | 8,2 (2,03) (24,69) | 4,5 | 15,9 | 11,4 | 253,3 |

(*) Os valores entre parênteses representam, respectivamente, o desvio padrão e o coeficiente de variação (%).

A análise de correlações envolvendo um elevado número de propriedades pode tornar a interpretação dos resultados mais complexa, conforme exemplificado no APÊNDICE A.

Para a redução da massa de dados com menor perda possível de informação é recomendado a utilização da análise de componentes principais (ACP). Este procedimento transforma linearmente um conjunto original de variáveis correlacionadas entre si em um conjunto menor de variáveis não correlacionadas, contendo a maior parte da informação do conjunto original (Hongyu; Sandanielo; Oliveira, 2015).

Para redução da dimensionalidade, utilizou-se o procedimento proposto por Jolliffe (2002) onde foram retiradas da análise, de forma gradativa e com reinício do processo, as variáveis que tiveram maior autovetor na componente principal de menor autovalor.

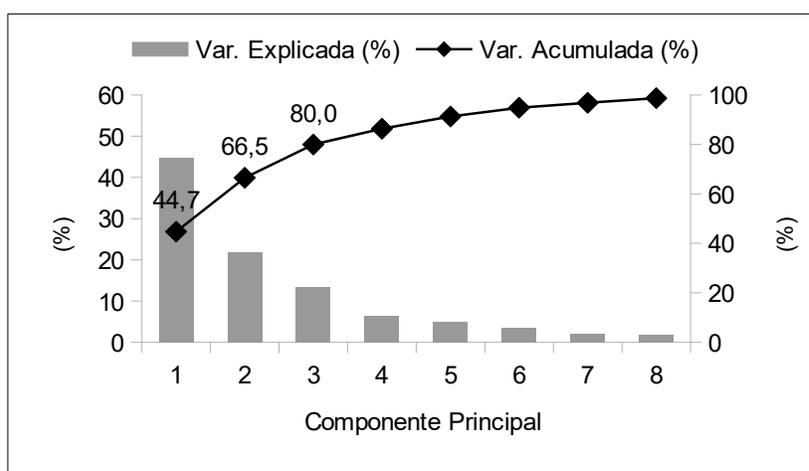
As propriedades da madeira não selecionadas foram incremento médio anual; índice de cristalinidade; poder calorífico superior; os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e holoceluloses; espessura da parede das

fibras e diâmetro dos vasos. As propriedades do carvão vegetal não selecionadas foram: incremento médio anual em carvão vegetal, poder calorífico superior, materiais voláteis.

Para a madeira, as variáveis remanescentes foram a densidade básica, teores de lignina total e extrativos, relações siringil/guaiacil e cerne/alburno, fração parede das fibras e frequência de vasos. Para o carvão vegetal, as variáveis mantidas foram rendimento gravimétrico, densidade aparente, friabilidade e teor de cinzas.

De acordo com a ACP, verificou-se que os componentes 1 e 2, conjuntamente, explicaram 66,5% da variância total do conjunto de dados, evidenciando, desta forma, que a maior parte das informações que explicam o conjunto total de dados estão relacionados a esses dois componentes principais. Na Figura 4 observa-se a contribuição de cada componente principal para explicar a variância total dos dados e a variância acumulada à medida que se acrescentou a contribuição da componente principal subsequente.

Figura 4 - Variância explicada e acumulada para o total de componentes principais.



Desta forma, para elencar os componentes principais que seriam utilizadas neste estudo, foram selecionados aqueles que tiveram valores próprios maiores que 1, conforme apresentado na Tabela 3, tendo como referência o critério de Kaiser que seleciona os componentes principais que explicam a maior parte da variação dos dados (Kaiser, 1958; Savegnago *et al.*, 2011).

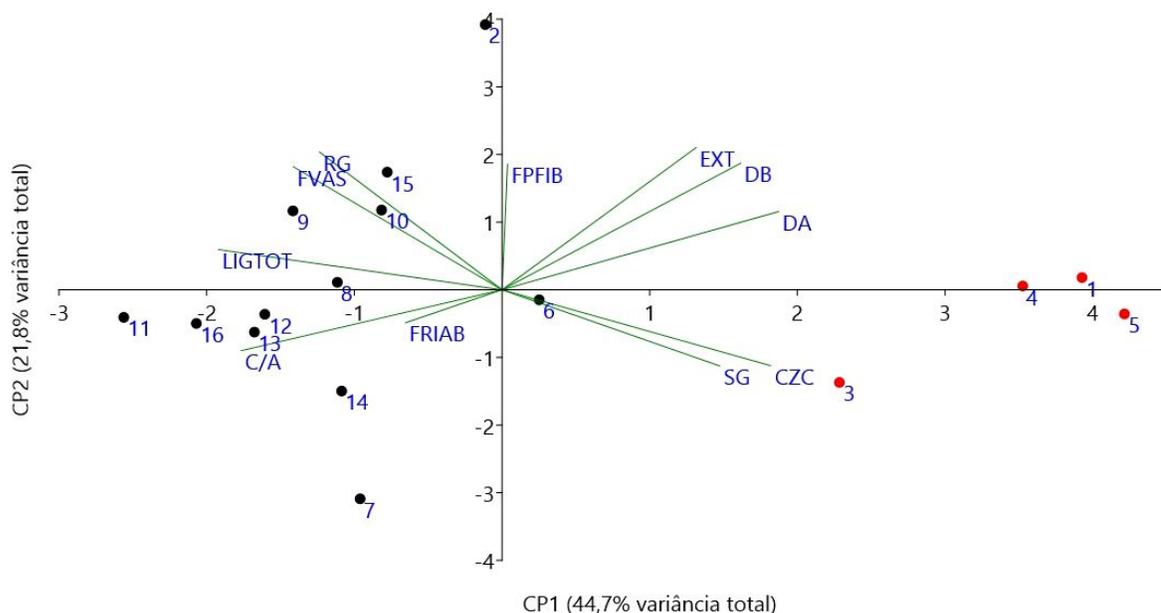
Tabela 3 - Autovetores e autovalores das propriedades da madeira e do carvão vegetal para as componentes principais selecionadas

| Propriedades | Componentes principais | | |
|-------------------------------|------------------------|--------|--------|
| | CP1 | CP2 | CP3 |
| Rendimento gravimétrico em CV | -0.314 | 0.409 | 0.065 |
| Lignina total | -0.748 | 0.038 | -0.106 |
| Relação S/G | 0.439 | -0.129 | 0.002 |
| Densidade aparente do CV | 0.712 | 0.132 | 0.060 |
| Densidade básica da madeira | 0.533 | 0.342 | 0.045 |
| Friabilidade | -0.091 | -0.025 | 0.718 |
| Relação C/A | -0.641 | -0.077 | -0.002 |
| Extrativos | 0.356 | 0.432 | 0.001 |
| Fração parede das fibras | 0.001 | 0.357 | -0.384 |
| Frequência de vasos | -0.408 | 0.329 | 0.020 |
| Cinzas do carvão vegetal | 0.678 | -0.116 | -0.075 |
| Autovalores | 4,92 | 2,39 | 1,48 |

A componente principal 1 apresenta as propriedades com os maiores autovetores positivos relacionados a densidade aparente e teor de cinzas do carvão vegetal, densidade básica da madeira e relação S/G e maiores autovetores negativos relacionados ao teor de lignina total, relação cerne/alburno, frequência de vasos e rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Os autovetores da componente principal 2 tiveram os valores mais elevados e positivos relacionados ao teor de extrativos, rendimento gravimétrico em carvão vegetal, densidade básica da madeira e fração parede das fibras ao passo que os maiores autovetores negativos correspondem ao teor de cinzas do carvão vegetal e relação S/G da madeira.

A representação gráfica biplot CP1xCP2 (Figura 5) permite visualizar a distribuição dos dezesseis materiais genéticos avaliados em relação aos vetores das propriedades selecionadas na ACP.

Figura 5 - Gráfico de dispersão dos materiais genéticos e ordenação dos autovetores para as duas primeiras componentes principais para as propriedades da madeira e carvão vegetal.



Legenda: C/A: Relação cerne/alburno; DB: Densidade básica da madeira (g cm^{-3}); FVAS: Frequência de vasos (vasos mm^{-2}); EXT: Extrativos totais (%); RG: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); DA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg m^{-3}); FRIAB: Friabilidade do carvão vegetal (%); SG: Relação Siringil/Guaiacil; LIGTOT: Lignina total (%); FPFIB: Fração parede das fibras (%); CZC: Cinzas do carvão (%). Em vermelho = híbridos de *Corymbia*

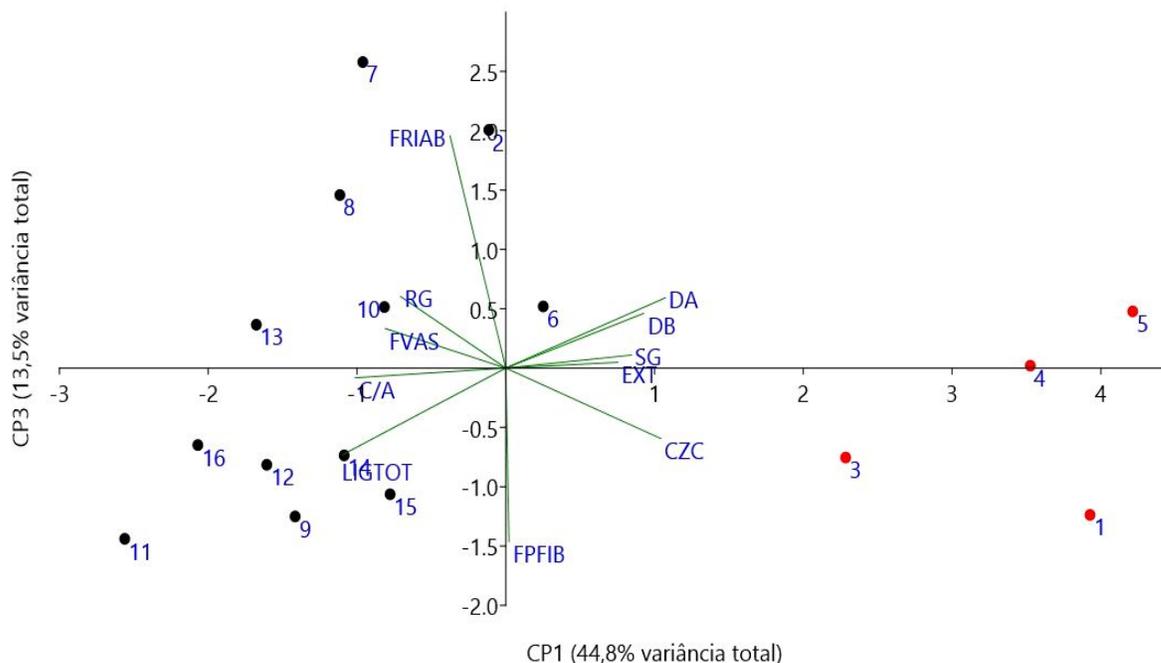
As correlações positivas identificadas na CP1 podem ser visualizadas na formação dos ângulos agudos entre os autovetores. Nesta componente, nitidamente destacaram-se a separação dos quatro híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* em relação aos materiais genéticos de *Eucalyptus*. Os maiores autovetores negativos desta componente estão associados aos híbridos de *Eucalyptus*. Observou-se a maior influência do teor de lignina total e relação C/A para os clones 11, 12, 13 e 16.

Analisando a componente principal 2, observou-se maior contribuição positiva do teor de extrativos da madeira e rendimento gravimétrico em carvão vegetal para o clone 2 (*E. cloeziana*), que se destacou em relação aos demais materiais genéticos estudados.

No gráfico biplot CP1xCP3 (Figura 6), observou-se na ordenação dos autovetores que a componente 3 encontra-se altamente correlacionada positivamente com friabilidade do carvão vegetal, com destaque à influência da mesma para os clones 7 e 8 (híbridos *E. urophylla* x *Eucalyptus* spp.) e para o clone 2 (*E. cloeziana*).

Em média, a friabilidade, ou seja, a geração de finos desses três materiais genéticos foi de 11%, superior aos demais que tiveram valor médio de 7,5% para esta propriedade.

Figura 6 - Gráfico de dispersão dos materiais genéticos e ordenação dos autovetores para a CP1 e CP3 para as propriedades da madeira e carvão vegetal.



Legenda: C/A: Relação cerne/alburno; DB: Densidade básica da madeira (g cm⁻³); FVAS: Frequência de vasos (vasos mm⁻²); EXT: Extrativos totais (%); RG: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); DA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg m⁻³); FRIAB: Friabilidade do carvão vegetal (%); SG: Relação Siringil/Guaiacil; LIGTOT: Lignina total (%); FPFIB: Fração parede das fibras (%); CZC: Cinzas do carvão (%). Em vermelho = híbridos de *Corymbia*

Com base na ordenação dos autovetores no gráfico biplot das componentes CP1xCP2, que explicaram conjuntamente a maior variância dos dados, foi possível analisar as principais relações existentes entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal. Essas relações foram descritas como diretas (ângulo formado entre os vetores próximo a 0°) ou indiretas (ângulo formado entre os vetores próxima a 180°).

Ao considerarmos as relações diretas existentes entre os autovetores, destacou-se:

-Rendimento gravimétrico do carvão vegetal, teor de lignina total e relação S/G.

A lignina é uma molécula aromática composta de unidades de fenilpropano, não tem estrutura uniforme e é altamente ramificada. A composição elementar para folhosas é constituída de 59-60% de C, 6-8% de hidrogênio e 33-34% de oxigênio. Os principais grupos

funcionais da estrutura da lignina são: metoxilas (-OCH₃), hidroxilas (-OH), carbonilas (R-CO-R), carboxílicos (-COOH), éteres (-COO-R) e insaturações (-C=C-) (Wastowski, 2018).

De acordo com Sjöström (1993) e Wang *et al.* (2017) as ligações básicas da lignina podem ser divididas em ligações mais fracas tipo éter (60-70%), ligações mais fortes tipo carbono-carbono (30-40%) e ligações éster (baixo teor, predominância em plantas herbáceas).

Maiores teores de lignina conferem às madeiras maior resistência a degradação térmica quando comparadas ao perfil instável e pouco resistente das holoceluloses, que resultam em maiores teores de gases condensáveis e não condensáveis nos processos de carbonização (Gouvea *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016; Soares *et al.* 2014; Vale; Dias; Santana, 2010).

De acordo com Santos *et al.* (2012) e Araujo *et al.* (2016) o teor e o tipo de lignina são parâmetros importantes na conversão da madeira em carvão vegetal. Segundo os autores, espera-se que quanto maior a proporção de lignina total e menor a relação siringil/guaiacil, maior será a conversão em carvão vegetal em função da maior resistência à degradação térmica. Massuque *et al.* (2021) reiteraram que apesar do teor de lignina total ser um importante parâmetro de qualidade para carbonização, deve-se considerar o tipo de lignina presente na madeira.

Segundo Wang *et al.* (2017) ligninas com alto teor de grupos metoxila produzem menos carvão durante o processo de pirólise. Gouvea *et al.* (2015) destacam a diferença existente entre a estrutura do tipo siringil e guaiacil, no carbono cinco do anel aromático. Na posição cinco da estrutura siringila encontra-se ligada uma metoxila, ao passo que na guaiacila a esta posição encontra-se livre. Desta forma, a substituição aromática é favorecida e conseqüentemente, ocorre a formação de uma lignina mais condensada e termicamente mais estável.

Os resultados obtidos na ACP, especificamente na CP1, evidenciaram que o teor de lignina total e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal tiveram a maior influência para classificação de materiais genéticos de *Eucalyptus* quando comparado aos híbridos de *Corymbia*. Verificou-se, também, que para os híbridos de *Eucalyptus*, os valores obtidos para a relação S/G contribuíram para rendimento em carvão vegetal, ou seja, os materiais genéticos com menores valores de relação S/G tiveram maior rendimento em carvão vegetal. Neste sentido, os trabalhos de Gouvea *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2016) avaliaram diferentes parâmetros de qualidade da madeira para produção de carvão vegetal e concluíram que a relação S/G da lignina teve maior relação funcional com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, corroborando com os resultados obtidos para o gênero *Eucalyptus*.

-Rendimento gravimétrico do carvão vegetal e Relação Cerne/Alburno.

A interpretação da influência da relação C/A no rendimento gravimétrico em carvão demonstrou a necessidade de observância das diferenças encontradas na madeira dos clones de *Corymbia*. Nesse gênero verificou-se valores de relação C/A, em média, inferiores aos obtidos para os materiais genéticos de *Eucalyptus*. Ainda em relação aos híbridos de *Corymbia*, uma característica importante observada nos estudos anatômicos foi a menor ocorrência de tiloses, conforme observado na Figura 7.

Figura 7. Fotomicrografia da seção transversal da madeira de *C. citriodora x C. torelliana*.



Fonte: Elaboração própria

Rocha (2022) ao avaliar a secagem de híbridos de *C. torelliana* e *C. citriodora* em comparação com *E. urophylla* obteve maior área de vasos no alburno dos híbridos de *Corymbia*, raios mais finos e frequentes, maior quantidade de cavidades desobstruídas e menores impedimentos físicos, favorecendo a eliminação da água em menor tempo.

Adicionalmente, na análise da relação RG x relação C/A há de se considerar, também, os valores médios inferiores de lignina total para os híbridos de *Corymbia* na comparação com os teores obtidos para os materiais genéticos de *Eucalyptus*, o que influenciou negativamente no rendimento gravimétrico. A ordenação dos autovetores na CP1 indicou a maior influência do teor de lignina para os clones de *Eucalyptus*, ratificando a relevância dessa propriedade na obtenção de maiores rendimentos em carvão vegetal. O material genético 2 (*Eucalyptus cloeziana*), teve maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e baixa relação C/A, destacando-se dos demais híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

A relação C/A mais baixa é adequada para o processo de secagem da madeira, pois contribui para maior velocidade de perda de água em função da maior permeabilidade do alburno. Essa característica também é importante para a redução da duração da etapa inicial da carbonização (Pereira *et al.*, 2013a).

Durante o aquecimento da madeira no processo de carbonização, a pressão de vapor de formada interiormente enfraquece ou fragmenta o carvão vegetal resultante. Desta forma, menores proporções de cerne na madeira tendem a diminuir os problemas de friabilidade do carvão vegetal (Assis *et al.*, 2016).

-Densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal.

A correlação positiva entre estas propriedades foi relatada por diversos autores (Botrel *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2013a; Reis *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2016). Verificou-se que estas propriedades contribuíram diretamente para o agrupamento dos híbridos de *Corymbia*. Segundo Vale *et al.* (2010), Froehlich e Moura (2014), Couto *et al.* (2022) a maior densidade do carvão vegetal tem reflexo positivo na redução nos custos com maior massa de madeira enforada nos fornos, armazenamento, transporte, aumento da resistência mecânica e melhor aproveitamento do volume útil nos altos-fornos siderúrgicos.

Ainda em relação a eficiência produtiva, Pereira *et al.* (2013b) e Santos *et al.* (2012) ressaltaram que para obter melhores resultados nos processos de produção e qualidade do carvão vegetal por meio da seleção de clones é imprescindível compreender o comportamento da madeira durante a pirólise sob a ótica da degradação térmica. Figueroa e Moraes (2009) afirmam que as taxas de carbonização das madeiras variam conforme a massa específica, além do teor de umidade, espécie, dimensões das peças e intensidade do fluxo do calor. Segundo Ferreira (2013) a redução dos valores de densidade resultante do processo de carbonização da madeira é resultado da degradação térmica dos seus constituintes químicos.

Protásio *et al.* (2021) observaram que a densidade básica da madeira explicou 72% da variação da densidade aparente do carvão vegetal de *Eucalyptus*. Os autores, ao avaliarem materiais genéticos de *E. urophylla*, *E. urophylla* (híbrido), *E. camaldulensis* (híbrido) e *E. grandis* (híbrido) aos 84 meses de idade obtiveram densidade aparente de 390 kg m⁻³, resultado superior à média obtida neste trabalho para esse gênero.

Ao estudarem a decomposição térmica da madeira de híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* para produção de carvão vegetal, com densidade básica da madeira variando de 506 a 597 kg m⁻³, Loureiro *et al.* (2019) observaram maiores perdas de massa (55,8 a 60,2%) na faixa de temperatura de 250 a 380 °C, seguidas da faixa de 380 a 600 °C (9,8 a 14,2% de perda de massa). O maior percentual de perda, segundo os autores, foi proporcional ao teor de holoceluloses dessas madeiras (64%) e foi observado que as maiores massas residuais decorrem de maiores teores de extrativos, cinzas e menor percentual de holoceluloses.

-Rendimento gravimétrico do carvão vegetal e Frequência de vasos.

A quantidade de vasos existentes por milímetro quadrado teve relação direta positiva com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, conforme visualizado na disposição dos autovetores na CP2. Apesar de não estar selecionada entre as variáveis da ACP, o diâmetro tangencial dos vasos indicou tendência de redução com o aumento da frequência dos mesmos. Esse comportamento também foi observado por outros autores (Evangelista, 2007; Lima *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2016; Fialho, 2018).

-Densidade básica da madeira e fração parede das fibras.

Na CP 2 verificou-se a correlação positiva entre variáveis densidade básica da madeira e fração parede das fibras. Segundo Oliveira e Silva (2003) a densidade básica da madeira depende, além do tamanho e frequência de vasos, da espessura e fração parede das fibras. Damasio *et al.* (2013) afirmaram que há tendência de menor quantidade de espaços vazios na madeira à medida que aumenta a fração parede das fibras e, que madeiras ricas em fibras com maior percentual de fração parede são recomendadas para queima direta ou produção de carvão vegetal. Neste sentido, Couto *et al.* (2022) relataram que para obtenção de carvão vegetal de maior densidade e, conseqüentemente, mais cadeias de carbono por unidade de volume, deve-se utilizar madeiras com fibras com menor diâmetro do lúmen, maior espessura da parede e conseqüentemente maior fração da parede.

-Friabilidade e Relação Cerne/Alburno.

Os clones 11, 12, 13, 14 e 16 apresentaram comportamento similar e foram influenciados diretamente, além do teor de lignina, pela relação C/A e friabilidade do carvão vegetal.

Maiores valores de relação C/A dificultam a saída dos gases. Desta forma, mais células são rompidas, produzindo um carvão vegetal mais friável e com maior teor de finos (Pereira *et al.*, 2013a).

O desempenho mecânico do carvão vegetal é uma das propriedades mais importantes dentre os parâmetros monitorados no controle de qualidade no alto-forno da siderúrgica. As camadas de carvão vegetal devem suportar a carga de minério sem colapsar, evitando-se a geração de finos, diminuição da permeabilidade da carga e produtividade (Assis *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2021).

-Densidade básica da madeira/densidade aparente do carvão vegetal e teor de extrativos.

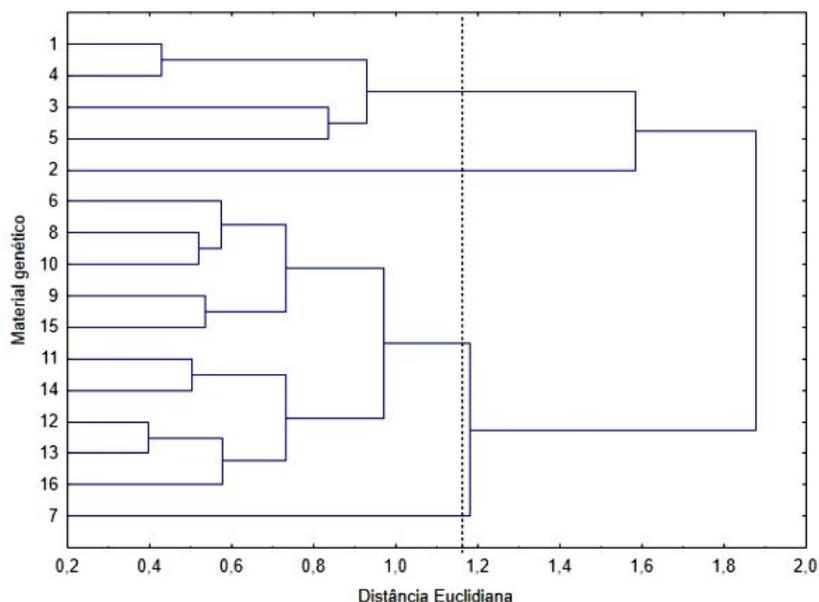
Os extrativos exercem papel importante na utilização da madeira pois influenciam as suas propriedades físicas (Frederico, 2009). Para Assis *et al.* (2016) a densidade básica da madeira é afetada positivamente pelo teor de extrativos, o que reflete indiretamente nas propriedades mecânicas da madeira. Na CP1 é possível verificar que os híbridos de *Corymbia* tiveram maior influência da densidade básica da madeira, densidade aparente do carvão vegetal, teores de extrativos e cinzas quando comparado aos clones de *Eucalyptus*.

Além destas relações apresentadas, observou-se as relações indiretas existentes e que são relevantes, principalmente, para os híbridos de *Corymbia*. Na CP1 a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal encontram-se inversamente associadas ao teor de lignina. Dessa forma, a maior densidade da madeira e do carvão vegetal provenientes desses materiais genéticos podem ser explicados pelo maior teor de extrativos e pela menor frequência de vasos.

O menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal dos híbridos de *Corymbia* pode ser explicado, além dos baixos teores de lignina, pelo fato de apresentarem maiores valores de relação S/G. A relação S/G é fundamental na seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus* para produzir carvão vegetal. Neste sentido, é necessário selecionar materiais genéticos com menores relações S/G destinados à carbonização, aumentando a eficiência da conversão de madeira em carvão vegetal (Araujo *et al.*, 2016; Protásio *et al.*, 2013; Santos, 2010; Soares *et al.*, 2014).

Para a definição dos materiais genéticos que são dissimilares, de acordo com as propriedades definidas na ACP, utilizou-se a análise de agrupamentos hierárquicos aglomerativos. Inicia-se com n agrupamentos, um para cada observação, finalizando com um único grupo contendo todas as n observações. Neste agrupamento ótimo, os indivíduos dentro de cada grupo são semelhantes, mas os grupos são diferentes entre si (Fialho, 2018; Rencher, 2002). Na Figura 8 é evidenciado a formação dos grupos de materiais genéticos e sua localização no dendrograma. Utilizou-se a linha Fenon para a segmentação dos agrupamentos, que foi traçada no dendrograma em função da distância euclidiana (Martins *et al.*, 2015).

Figura 8 - Agrupamento dos materiais genéticos em função dos valores das propriedades selecionadas da madeira e carvão vegetal com uso da distância euclidiana (método *complete linkage*).



Observou-se a formação de quatro grupos dissimilares considerando-se as principais variáveis selecionadas na ACP. Em suma, obteve-se um grupo formado pelos quatro híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana*, um grupo formado somente pelo *E. cloeziana*, um grupo mais numeroso formado por 10 híbridos de *Eucalyptus* e um grupo formado pelo material genético número 7 (*E. urophylla* X *Eucalyptus* spp.).

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal dos materiais genéticos distribuídos nos 4 grupos pré-estabelecidos na análise de agrupamento.

Tabela 4 - Valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para os grupos formados na análise de agrupamento.

| Grupo | MG | RG | DB | DA | LIG | S/G | C/A | FRIAB | EXT | FPFIB | FVAS | CZC |
|-------|------------------------------------|-------|-------|--------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|
| I | 1;4;3;5 | 33,71 | 0,591 | 404,7 | 27,0 | 3,06 | 0,23 | 7,1 | 6,76 | 50,3 | 9,5 | 1,44 |
| II | 2 | 35,89 | 0,637 | 414,4 | 29,7 | 2,42 | 0,33 | 9,2 | 8,79 | 49,8 | 12 | 0,53 |
| III | 6;8;10;9; 15;11;14; 12;13;16 | 34,78 | 0,504 | 314,25 | 30,7 | 2,61 | 0,8 | 8,2 | 4,83 | 50,6 | 10,6 | 0,83 |
| IV | 7 | 33,8 | 0,486 | 318,4 | 28,4 | 2,9 | 0,94 | 12,2 | 2,51 | 46,4 | 9,8 | 0,7 |

Legenda: MG: Material Genético; RG: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); DB: Densidade básica da madeira (g.cm^{-3}); DA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg m^{-3}); LIG: Lignina total (%); SG: Relação Siringil/Guaiacil; C/A: Relação cerne/alburno; FRIAB: Friabilidade do carvão vegetal (%); EXT: Extrativos totais (%); FPFIB: Fração parede das fibras (%); FVAS: Frequência de vasos (vasos mm^{-2}); CZC: Cinzas do carvão (%).

O grupo I, formado pelos híbridos de *Corymbia*, teve valores desejáveis para as propriedades densidade básica da madeira, densidade aparente do carvão vegetal, relação cerne/alburno e friabilidade. Em contrapartida, os baixos valores de lignina total e elevada relação S/G contribuíram para obtenção de menores rendimentos gravimétricos. Em comparação com os materiais genéticos de outros grupos, há de se destacar os elevados teores de cinzas no carvão vegetal dos híbridos de *Corymbia*, superiores a 1,3%.

Este fato pode limitar a utilização desses clones em aplicações como produção de ferroligas e silício metálico em função dos problemas operacionais nos altos-fornos.

Normalmente, o teor de componentes minerais na madeira é baixo e constituído principalmente por óxidos de cálcio, magnésio, fósforo, silício, potássio, dentre outros. A presença em dosagens elevadas de cálcio, fósforo e enxofre são prejudiciais ou até limitantes para determinados usos industriais (Trugilho; Lima; Mendes, 1996).

Há elevada correlação entre o teor de cinzas da madeira e do carvão vegetal, com a consequente presença da fração mineral como resíduo após a carbonização. Neste sentido, elevados teores de fósforo, por exemplo, presentes no carvão vegetal, podem ser incorporadas na composição das ligas metálicas, resultando em materiais quebradiços e propensos a formação de trincas e fissuras (Vital *et al.*, 1986; Vital *et al.*, 1989).

A análise dos componentes inorgânicos da madeira evidenciou maiores valores médios obtidos para os híbridos de *Corymbia*, com destaque para os macronutrientes K, Ca,

Mg e para o micronutriente Mn (APÊNDICE B). Estes resultados são, respectivamente, 30, 140, 107 e 380% superiores aos valores médios obtidos para os híbridos de *Eucalyptus*. Já os teores de fósforo verificados para os híbridos de *Corymbia* foram 25% inferiores aos observados para *Eucalyptus*, indicando que seu maior percentual de cinzas na madeira não resultou em maior presença deste componente indesejável ao processo.

Em relação aos macronutrientes, quanto menor a relação K/Ca, maior será o ponto de fusão das cinzas (Leite *et al.*, 2015). Apesar dos maiores percentuais dos componentes inorgânicos mencionados para os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana*, os híbridos de *Eucalyptus*, tiveram, em média, relação K/Ca 82% superior.

Com base na análise dos componentes inorgânicos da madeira, supõe-se que os elevados teores destes componentes minerais obtidos para os híbridos de *Corymbia* não configuram restrição ao uso do carvão vegetal produzido a partir desses materiais, em processos de fabricação de ligas metálicas especiais. Conforme descrito anteriormente, os teores de fósforo encontrados na madeira dos híbridos de *Corymbia*, são inferiores aos observados para os híbridos de *Eucalyptus*. Ressalta-se o fato que nas avaliações realizadas não foram feitas análises de componentes inorgânicos na casca, que podem fornecer informações complementares sobre a presença desses componentes minerais e suas implicações para os fabricantes de ligas metálicas.

O grupo II, de acordo com as propriedades selecionadas, destacou-se por apresentar diversos valores desejáveis para produção de carvão vegetal, tais como RG, DB, DA, relações S/G e C/A, teores de extrativos e lignina total na madeira, frequência de vasos e cinzas no carvão vegetal. Apesar de bom desempenho em inúmeras propriedades, Reis *et al.* (2017) alertam para o problema da elevada friabilidade que resulta em baixa granulometria, criando problemas técnicos nos altos-fornos, principalmente por impedir o livre fluxo ascendente dos gases gerados no processo, causando acúmulo em seu interior e microexplosões que podem danificar o equipamento.

Ainda em relação a materiais genéticos de *E. cloeziana*, diversos autores relatam dificuldades que restringem a utilização dessa espécie em plantios comerciais. Tais empecilhos estão relacionados à baixa germinação de sementes e principalmente na propagação vegetativa clonal por meio de enraizamento de estacas (Alfenas *et al.*, 2009; Figueiredo, 2017; Fukuda, 2012; Oliveira; Dias; Almeida, 2015). Segundo Reis *et al.* (2017) essa espécie pertence ao Subgênero *Idiogenes* que é considerado monoespecífico, ou seja, não se cruza com nenhuma outra espécie de *Eucalyptus*.

Os híbridos pertencentes ao grupo III, destacaram-se positivamente, em média, pelos valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal, principalmente os materiais genéticos 10 e 15 que tiveram valores médios superiores a 35%. Este resultado pode ser explicado pelos maiores teores de lignina obtidos e menor relação S/G.

O grupo IV, que possui como único representante o material genético 7, híbrido de *E. urophylla* X *Eucalyptus* spp., teve valores médios mais discrepantes das propriedades em relação aos demais *Eucalyptus* situados no grupo III. Um destaque negativo refere-se à friabilidade do carvão vegetal, que teve valor médio superior aos demais.

Com os resultados obtidos das propriedades da madeira e do carvão vegetal, foi possível estimar as massas de carbono fixo por hectare/ano e de carvão vegetal/forno.

O material genético 4, híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana*, teve desempenho superior em relação aos demais híbridos de *Corymbia* e *Eucalyptus*. Obteve-se, para este híbrido, maior massa seca de carvão vegetal e massa de carvão vegetal sem finos por hectare.

Além disso, com base nos indicadores obtidos, este material genético produziu massa de carbono fixo 72% superior em relação à média dos demais híbridos de *Corymbia* e 33% superior em relação à média observada para os híbridos de *Eucalyptus*.

Na figura 9 é apresentado um resumo destas principais informações, considerando-se todos os materiais genéticos, que possibilitaram obter os indicadores de produção por hectare e para os fornos de carbonização.

Figura 9 - Valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para os dezesseis materiais genéticos.

| PROPRIEDADES | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | MADEIRA | | | | | | | | | | | | | | | |
| Densidade básica (kg m ⁻³) | 613 | 637 | 526 | 626 | 598 | 552 | 486 | 510 | 550 | 538 | 437 | 486 | 488 | 437 | 548 | 490 |
| IMA s/c (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 26,2 | 38,0 | 43,2 | 51,2 | 26,5 | 41,2 | 48,7 | 55,6 | 30,6 | 41,0 | 47,0 | 48,4 | 55,5 | 46,9 | 41,8 | 56,7 |
| Lignina total (%) | 27,1 | 29,7 | 28,5 | 25,7 | 26,6 | 29,5 | 28,4 | 29,5 | 31,9 | 29,7 | 32,1 | 29,9 | 30,9 | 31,0 | 32,1 | 30,6 |
| Extrativos totais (%) | 7,5 | 8,8 | 4,6 | 7,8 | 7,1 | 5,5 | 2,5 | 4,8 | 4,3 | 5,3 | 5,0 | 3,1 | 4,5 | 4,3 | 6,1 | 5,5 |
| Holocelulose (%) | 65,4 | 61,5 | 66,9 | 66,5 | 66,3 | 65,1 | 69,0 | 65,7 | 63,8 | 65,0 | 62,9 | 67,0 | 64,6 | 64,7 | 61,7 | 63,8 |
| Relação Cerne/Alburno | 0,30 | 0,33 | 0,11 | 0,27 | 0,23 | 0,66 | 0,94 | 0,60 | 0,59 | 0,62 | 0,79 | 1,02 | 0,87 | 0,70 | 0,70 | 1,32 |
| Relação S/G | 2,98 | 2,42 | 3,05 | 2,65 | 3,57 | 2,56 | 2,94 | 2,61 | 2,38 | 2,69 | 2,52 | 2,66 | 2,64 | 2,81 | 2,88 | 2,37 |
| Cinzas (%) | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |
| Massa seca de madeira (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 16070 | 24163 | 22699 | 32047 | 15831 | 22724 | 23667 | 28397 | 16844 | 22036 | 20525 | 23512 | 27067 | 20497 | 22903 | 27784 |
| | CARVÃO VEGETAL | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rendimento em Carvão vegetal (%) | 33,3 | 35,9 | 33,5 | 33,4 | 34,6 | 34,3 | 33,8 | 35,2 | 34,8 | 35,1 | 34,5 | 34,9 | 34,9 | 34,0 | 35,1 | 34,9 |
| Densidade aparente (kg m ⁻³) | 429 | 414 | 360 | 391 | 439 | 377 | 318 | 321 | 314 | 353 | 234 | 322 | 302 | 298 | 350 | 270 |
| Massa seca Carvão vegetal (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 5350 | 8673 | 7603 | 10717 | 5480 | 7794 | 8010 | 10001 | 5868 | 7730 | 7078 | 8210 | 9457 | 6963 | 8044 | 9694 |
| Massa CV sem finos (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 5042 | 7878 | 7033 | 9866 | 5091 | 7160 | 7032 | 8811 | 5440 | 7050 | 6609 | 7636 | 8634 | 6427 | 7406 | 8963 |
| Carbono fixo (%) | 76,2 | 75,8 | 75,9 | 75,9 | 76,4 | 77,8 | 75,1 | 74,6 | 76,3 | 76,3 | 75,5 | 76,7 | 76,7 | 76,8 | 76,0 | 74,9 |
| Materiais voláteis (%) | 22,5 | 23,7 | 22,6 | 22,8 | 22,0 | 21,3 | 24,1 | 24,6 | 22,9 | 22,9 | 23,7 | 22,4 | 22,5 | 22,2 | 23,3 | 24,2 |
| Cinzas (%) | 1,3 | 0,5 | 1,5 | 1,3 | 1,6 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 0,9 |
| Massa CV/forno (ton) (*) | 102,0 | 114,3 | 88,0 | 104,7 | 103,4 | 94,7 | 82,2 | 89,9 | 95,8 | 94,3 | 75,4 | 84,9 | 85,3 | 74,3 | 96,2 | 85,5 |
| Massa de carbono fixo (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) | 3844 | 5969 | 5338 | 7485 | 3888 | 5568 | 5281 | 6573 | 4153 | 5377 | 4992 | 5854 | 6623 | 4938 | 5629 | 6711 |

*RAC 700. Capacidade de enformamento (500m³).

5. CONCLUSÕES

A análise descritiva evidenciou que, de forma geral, as propriedades da madeira com maiores variações foram a densidade básica, relação cerne/alburno, teores de extrativos e cinzas. Em relação ao carvão vegetal, as maiores diferenças foram observadas na densidade aparente, teor de finos e cinzas.

A utilização da análise de componentes principais e de agrupamento hierárquico aglomerativo mostrou eficiência na redução do número de propriedades a considerar na escolha dos materiais genéticos e na identificação de similaridade entre os mesmos.

Os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* tiveram comportamento homogêneo, formando um grupo distinto em relação aos demais materiais genéticos. Os maiores teores de cinzas obtidos para este gênero devem ser considerados em situações onde sejam um critério relevante no processo de produção.

O material genético 2 (*E. cloeziana*) teve excelente desempenho nas propriedades selecionadas, com destaque ao maior rendimento gravimétrico entre todos os materiais genéticos avaliados, elevados valores de densidade básica da madeira, densidade aparente do carvão vegetal e baixo teor de cinzas. Porém, este material mostrou-se mais friável, o que pode comprometer sua utilização na indústria, principalmente dificultar o fluxo ascendente de gases no alto-forno em função da baixa granulometria do carvão vegetal.

Adicionalmente, destaca-se que este material genético apresenta restrições silviculturais como a propagação vegetativa clonal, que dificultam a maior utilização em plantios comerciais.

Os materiais genéticos 10 e 15, híbridos tri-cross de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) e (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*, respectivamente, também se mostraram indicados para produção de carvão vegetal, destacando-se em rendimento gravimétrico, teores de lignina e densidade aparente do carvão vegetal.

Dentre os materiais genéticos situados no Grupo I, o material genético 4 teve, ainda, maior massa de carbono fixo e massa seca de carvão vegetal por hectare/ano. Desta forma, é o mais recomendado para produção de carvão vegetal de acordo com os parâmetros estabelecidos neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. Viçosa: UFV, 500 p. 2009.
- ARAUJO, A. C. C.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BRAGA, P. P. C.; LIMA, R. V.; PROTÁSIO, T. P. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 405-414, jun. 2016
- ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLES, A.; TRUGILHO, P. F. Fatores que afetam a mecânica da madeira carbonizada: revisão de literatura. **Ciência e Tecnologia da Madeira**, v. 50, n. 3, pág. 519-536, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8112: Carvão vegetal: análise imediata**. Rio de Janeiro, 1986 8p.
- BAUMHARDT NETO, R. Raios X. In: CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. (Ed.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo, SP: Artliber, 2003. p. 41–60.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 31, p. 391-398, 2007.
- COUTO, A. M.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ALMEIDA, D. P. Influência de variáveis físico-anatômicas da madeira nas propriedades físico-mecânicas do carvão vegetal. **Journal of Forestry Research**, p.1-8, 2022.
- COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, p. 37-46, 2014.
- DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt wood. **CSIRO Forest Products Laboratory**, Melbourne, n.66, p.1-28, 1972.
- DAMASIO, R. A. P.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOSO, M. T.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L. M. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 75, p. 261-267, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Balanco Energético Nacional**. In: Energética Ed. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, MME. Ano base 2021. 67p. 2022.

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril.** 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

FERREIRA, A. T. B. **Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de *Eucalyptus sp.* e de *Corymbia sp.*** 2013. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.

FIALHO, L. F. **Seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* para a produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada.** Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

FIGUEIREDO, A. J. R. **Enraizamento in vitro de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2017.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente construído**, v. 9, p. 157-174, 2009.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 13-32, 2014.

FUKUDA, W. S. **Propagação in vitro de *Jacaranda ulei* Bureau & K.Schum.** (Bignoniaceae). 125 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal.** 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GOUVEA, A. F. G.; TRUGILHO, P.F.; ASSIS, C.O.; ASSIS, M.R.; COLODETTE, J.L.; GOMES, C.M. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, 2015.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C. B.; SEBBENN, A. M.; FILHO, M. T.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 105-113, 2017.

HONGYU, K. SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA, G. J. J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v.1, n.5, 2015, 8p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2023.** Disponível em: iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf. Acesso em: 23 nov. 2023.

INSTITUTO AÇO DO BRASIL (IAB). **Relatório de Sustentabilidade.** Rio de Janeiro, 2021.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis**. Ed. 2. New York: Springer Verlag, 2002. 487 p.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. 2015. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 251-261, 2015.

LIMA, I. L.; GARCIA, R.; LONGUI, E. L.; FLORSHEIM, S. M. B. Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 61-68, mar. 2011.

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

LOUREIRO, B. A.; VIEIRA, T. A. S.; COSTA, L. J.; SILVA, A. B.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. 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.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 214-232, 2021.

MARTINS, M. F.; BELTRAME, R.; DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; SANTOS, G. A. Colorimetria como ferramenta de agrupamento de madeira de clones de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 443-449, 2015.

MASSUQUE, J.; ASSIS, M. R.; LOUREIRO, B. A. MATAVEL, C. E.; TRUGILHO, P. F. Influência da lignina na carbonização da madeira e nas propriedades do carvão vegetal de espécies nativas da floresta de Miombo. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, pág. 527-535, 2021.

MASSUQUE, J.; SANCHEZ, J. Y. S. C.; LOUREIRO, B. A.; SETTER, C. Avaliação do Potencial de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. para Bioenergia no Brasil. **BioEnergy Research**, p. 1-12, 2022.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal – aspectos técnicos. In: **CETEC. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte**. P.59-72 (SPT-008), 1982.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v.27, n.3, 381-385, 2003.

OLIVEIRA, L. S.; DIAS, P. C.; ALMEIDA, M. Avaliação genética do enraizamento de miniestacas de uma procedência de *Eucalyptus cloeziana*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 391-397, 2015.

OLIVEIRA, L. P.; CARNEIRO, A. C. O.; PERES, L. C.; DEMUNER, I. F.; FERREIRA, S. O.; JORGE, F. J. Qualidade da madeira e do carvão vegetal na seleção de clones de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia torelliana* X *Corymbia citriodora* para a siderurgia. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4722, 2023.

ORIGINLAB. Origin Pro 8 SRO. OriginLab Corporation. Northampton, MA, EUA, 2007.

PAULA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Revista Cerne**, v.17, n.2, p.237-246. 2011.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013a.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, p. 567-576, 2013b.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 545-557, 2016.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-45, 2021.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Floresta e Ambiente**, v. 19, p. 497-505, 2012.

REIS, C. F.; ASSIS, T. F.; MELO, L. A.; SANTOS, A. M. *Eucalyptus cloeziana*: estado da arte de pesquisas no Brasil. **Embrapa Florestas**. Documentos (INFOTECA-E), 2017.

RENCHER, A. C. Métodos de Análise Multivariada. Wiley series in probability and mathematical statistics. **John Wiley & Sons**, Inc. Publication. 2002.

ROCHA, S. M. G. **Qualidade da madeira de clones híbridos de *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* para produção de carvão vegetal siderúrgico**. 87 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2022.

RODRIGUES, E. A. C.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; SANTOS, A. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v. 14, n. 2, p. 147-152, 2008.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v.18, n.1, 143-151, 2012.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. **Influência das propriedades químicas e da relação** siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 657-669, 2016.

SAVEGNAGO, R. P.; CAETANO, S. L.; RAMOS, S. B.; NASCIMENTO, G. B.; SCHMIDT, G. S.; LEDUR, M. C.; MUNARI, D. P. Estimates of genetic parameters, and cluster and principal components analyses of breeding values related to egg production traits in a White Leghorn population. **Poultry Science**, 90, p.2174-2188. 2011.

SEGAL, L.; CREELY, J. J.; MARTIN, A. E.; CONRAD, C. M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, [s. l.], v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.

SINDIFER. **Anuário estatístico 2023**. Ano Base: 2022. Disponível em: <http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and application**. London: Academic Press, 1993. 293 p.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, p. 543-549, 2014.

SOARES, J. D.; PAULA, M. O.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, L. J.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Parâmetros para determinar a resistência mecânica do carvão vegetal em uma prensa hidráulica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 4, p. 1-6, 2021.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T222 om-98**. Standard. Acid-insoluble lignin in wood and pulp, 1998.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T257 cm-85**: sampling and preparing wood for analysis. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI UM 250**: Acid soluble lignina in wood and pulp. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. 2011.

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

VALE, A. T.; DIAS, S. I.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VALENTE, B. M. **Avaliação de clones híbridos de *Corymbia* para crescimento, qualidade da madeira e carvão vegetal na região do Rio Doce**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1986.

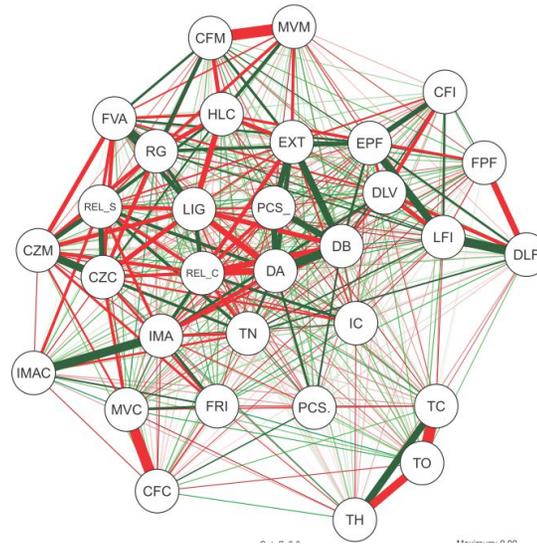
VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M.; VALENTE, O. F. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, v. 41, n. 42, p. 44-9, 1989.

WANG, S.; DAI, G.; YANG, H.; LUO, Z. Mecanismo de pirólise de biomassa lignocelulósica: uma revisão do estado da arte. **Progress in Energy and Combustion Science**. p.33-86, 2017.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: **HILLEL, D. (Ed). Applications of soil physics** New York: Academic, 1980. Cap.2, p.319-344.

WASTOWSKI, A. D. **Química da madeira**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2018. 567p.

APÊNDICE A – Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal para os 16 materiais genéticos.



Legenda: RG: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); LIG: Lignina total (%); REL SG: Relação Siringil/Guaiacil; DA: Densidade aparente do carvão vegetal (kg m^{-3}); DB: Densidade básica da madeira (g cm^{-3}); IC: Índice de Cristalinidade (%); PCS.C: Poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal kg^{-1}); FRIAB: Friabilidade do carvão vegetal (%); IMACV: Incremento médio anual em carvão vegetal ($\text{t carvão ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); IMA: Incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); REL CA: Relação cerne/alburno; CFM: Carbono fixo da madeira (%); MVM: Materiais voláteis da madeira (%); CZM: Cinzas da madeira (%); PCS M: Poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}); EXT: Extrativos totais (%); HLC: Teor de holoceluloses da madeira (%); CFC: Carbono fixo do carvão vegetal (%); MVC: Materiais voláteis do carvão vegetal (%); CZC: Cinzas do carvão (%); TC: Teor de carbono (%); TH: Teor de hidrogênio (%); TO: Teor de oxigênio (%); TN: Teor de nitrogênio (%); CFIB: Comprimento das fibras (mm); LFIB: Largura das fibras (μm); DLFIB: Diâmetro do Lume das fibras (μm); EPFIB: Espessura da parede das fibras (μm); FPFIB: Fração parede das fibras (%); DLVAS: Diâmetro dos vasos (μm); FVAS: Frequência de vasos (vasos mm^{-2}).

APÊNDICE B - Valores médios da análise dos nutrientes da madeira obtidos para os dezesseis materiais genéticos.

| Material Genético | N | P | K | Ca | Mg | S | Mn | B |
|----------------------------|-------------|-----------|-------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg |
| 1 | 1400 | 60 | 1440 | 1300 | 400 | 100 | 35 | 5 |
| 2 | 2100 | 60 | 920 | 170 | 110 | 90 | 2 | 4 |
| 3 | 1400 | 80 | 1650 | 780 | 380 | 120 | 31 | 4 |
| 4 | 980 | 50 | 1440 | 630 | 260 | 80 | 9 | 3 |
| 5 | 1680 | 90 | 1490 | 980 | 350 | 140 | 20 | 3 |
| 6 | 1260 | 100 | 1230 | 430 | 120 | 90 | 5 | 3 |
| 7 | 980 | 60 | 1040 | 310 | 200 | 80 | 12 | 5 |
| 8 | 1260 | 90 | 1450 | 510 | 160 | 90 | 5 | 4 |
| 9 | 1260 | 80 | 1160 | 480 | 150 | 100 | 3 | 3 |
| 10 | 1680 | 90 | 1020 | 460 | 160 | 140 | 9 | 2 |
| 11 | 1120 | 130 | 1390 | 560 | 180 | 100 | 5 | 3 |
| 12 | 980 | 70 | 1140 | 340 | 180 | 90 | 5 | 2 |
| 13 | 1540 | 120 | 1220 | 320 | 190 | 120 | 3 | 3 |
| 14 | 1400 | 130 | 1230 | 330 | 240 | 110 | 4 | 4 |
| 15 | 1680 | 130 | 930 | 290 | 190 | 100 | 3 | 4 |
| 16 | 1400 | 50 | 1140 | 410 | 140 | 90 | 3 | 2 |
| Média | 1383 | 87 | 1243 | 519 | 213 | 103 | 9 | 3 |
| σ | 306 | 28 | 215 | 289 | 90 | 19 | 10 | 1 |
| CV | 22,1 | 32,8 | 17,3 | 55,8 | 42,3 | 18,3 | 107,8 | 26,2 |

Obs: Não detectado: Fe, Cu, Zn.

CAPÍTULO III – BALANÇO DE CARBONO NO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS DE *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp. EM FORNOS RETANGULARES

RESUMO

A utilização de carvão vegetal na siderurgia como biorredutor em detrimento dos combustíveis derivados de fontes fósseis traz vantagens competitivas ao Brasil, principalmente pelas discussões recentes ocorridas em 2022 na Conferência das Partes (COP 27), sobre as tratativas de descarbonização da economia. A quantificação de emissões de gases do efeito estufa (GEE) no processo de carbonização da madeira é uma prática em franca expansão nas médias e grandes empresas siderúrgicas. Contudo, ainda são incipientes nas pequenas produções em fornos de alvenaria, caracterizadas pela ausência de controle da qualidade da matéria-prima e controle de processo, principalmente no que se refere à temperatura dos fornos. Este estudo teve como objetivo principal obter os balanços de carbonos a partir do cenário da carbonização de diferentes materiais genéticos em fornos retangulares de produção de carvão vegetal, com o auxílio do sistema *Charcoal System*. Para a obtenção das informações dendrométricas, propriedades físicas e químicas da madeira, rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal foram utilizadas três árvores de 16 materiais genéticos, híbridos de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp., provenientes de talhão experimental localizado na cidade de Itamarandiba-MG. A análise de agrupamento indicou a existência de 4 grupos dissimilares em relação aos padrões de emissões dos GEE. Nas simulações realizadas, todos os materiais genéticos tiveram níveis de emissões negativos nos balanços de CO₂e. Entretanto, os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* pertencentes ao grupo I tiveram resultado geral superior no conjunto da análise dos balanços de CO₂e, com balanço negativo de emissões anuais próximos a 264 mil toneladas de CO₂e. Em especial, o material genético 4 (*C. citriodora* x *C. torelliana*) teve, além das vantagens citadas, maior produtividade volumétrica e em biomassa por hectare, destacando-se dentre os demais para as condições adotadas nas simulações. Desta forma, a utilização do sistema *Charcoal System* e a análise de agrupamento evidenciaram que, mesmo em condições padronizadas tais como talhão de origem, espaçamento de plantio, tratamentos silviculturais, idade de colheita, teores de umidade da madeira e variáveis de processo, os materiais genéticos utilizados diferiram nos principais indicadores de emissões de GEE, com destaque para os balanços de carbonos obtidos para os híbridos pertencentes ao gênero *Corymbia*.

Palavras-chave: Descarbonização; Mercado de CO₂; Fontes renováveis.

ABSTRACT

The employment of charcoal as a bio-reducer in lieu of fossil fuel-derived resources offers Brazil significant competitive advantages. This is particularly relevant in light of the discussions on economic decarbonization held at the 2022 Conference of the Parties (COP 27). The practice of quantifying greenhouse gas (GHG) emissions during wood carbonization is rapidly expanding among medium and large steel enterprises. Yet, in smaller operations utilizing brick kilns, this practice remains nascent, marked by an absence of raw material quality and process control, especially in terms of kiln temperature management. The main objective of this study was to derive carbon balances from the carbonization processes of different genetic materials in rectangular charcoal kilns, utilizing the Charcoal System. To gather dendrometric data, as well as physical and chemical properties of wood, gravimetric yield, and properties of charcoal, three trees comprising 16 genetic materials were examined. These included hybrids of *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp., sourced from an experimental area in the municipality of Itamarandiba-MG. Cluster analysis revealed four dissimilar groups based on GHG emission standards. Simulation results demonstrated that all genetic materials exhibited negative emission levels in CO₂e balances. The *C. citriodora* x *C. torelliana* hybrids from group I displayed better overall outcomes in CO₂e balance analyses, achieving an annual negative emission balance approximating 264 thousand tons of CO₂e. Specifically, genetic material 4 (*C. citriodora* x *C. torelliana*) not only shared these benefits but also showcased superior volumetric and biomass productivity per hectare, distinguishing itself under the simulation conditions. Therefore, the application of the Charcoal System and cluster analysis elucidated that, despite uniform conditions such as plot of origin, planting density, silvicultural treatments, harvest timing, wood moisture levels, and procedural variables, the genetic materials exhibited variance in the main GHG emission indicators, particularly in the carbon balances of *Corymbia* genus hybrids.

Keywords: Decarbonization; CO₂ market; Renewable sources.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de produção de aço é uma das mais intensivas em energia e carbono, principalmente derivada de fontes fósseis, contribuindo com 5 a 7% das emissões globais de CO₂ (Suopajarvi *et al.*, 2017).

A utilização de carvão vegetal na indústria se deve, entre outras vantagens, pelo baixo teor de enxofre, alta proporção de carbono, baixo teor e reatividade dos componentes inorgânicos, estabilidade dos poros com elevada área superficial e bom desempenho nos processos de redução do minério de ferro (Seboka, 2009).

Destaca-se, também, o rápido ciclo do carbono utilizando-se madeira (5-10 anos) em comparação com o carvão mineral (~100 milhões de anos). No entanto, expressam os desafios em relação a disponibilidade e transporte da biomassa (Norgate; Langberg, 2009). Apesar de não ser acessível e a preço competitivo em todo o mundo, a biomassa constitui uma excelente alternativa para a descarbonização da indústria siderúrgica (Suopajarvi *et al.*, 2018).

No Brasil, o processo de carbonização realizado por pequenos e médios produtores ocorre, majoritariamente, em fornos rudimentares caracterizados pelo baixo rendimento e ausência de controle de emissões atmosféricas, resultando em impactos econômicos, sociais e ambientais (Cardoso *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2018). Por outro lado, as grandes empresas utilizam, na sua maioria, fornos retangulares. Estes fornos possuem controle de temperatura por pirometria ou em tempo real por sistemas supervisórios. Além desses controles, algumas empresas possuem sistemas de queima de gases de pirólise e/ou recuperação dos gases condensáveis.

Além disso, ao considerarmos de forma ampla as diferentes empresas do setor de árvores cultivadas, mais de 70% realizam inventário para mensurar emissões e remoções de carbono, com posicionamentos públicos sobre temas ESG (governança ambiental, social e corporativa) (IBA, 2022).

Logo, há de se destacar as tecnologias existentes e em desenvolvimento para recuperação dos subprodutos e combustão dos gases da carbonização, relatados por diversos autores (Cardoso *et al.*, 2010; CGEE, 2015; Hossain; Davies, 2013; Oliveira *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2017; Schettini *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Estes estudos evidenciam benefícios diretos como a eficiência superior a 98% na eliminação de GEE e recuperação de coprodutos para diferentes indústrias, tais como alimentícia, medicinal e defensivos agrícolas, além da alternativa de cogeração de energia térmica e elétrica.

Tanzer e Ramírez (2019) enfatizam que as tecnologias de emissão negativa (NETs) em larga escala necessitam de definições claras e consistentes para a implementação de políticas mais assertivas de incentivos, regulamentos e contabilidade. Ressaltam, ainda, a importância da aferição das emissões de GEEs em todas as etapas envolvidas no processo de produção e de utilização do carvão vegetal, sob pena de obter resultados imprecisos que não contribuem

na redução efetiva da concentração do CO₂ e outros gases que impactam diretamente no aquecimento global.

A quantificação das emissões e respectivas ações de mitigação na produção de carvão vegetal estão em consonância com as metas brasileiras, revistas em 2020, de redução de 37% das emissões de GEE até 2025 e de 43% de redução até 2030, tendo como referência os níveis de 2005 (MAPA, 2021). Neste sentido, o conhecimento do resultado global das emissões durante o processo de carbonização da madeira torna-se relevante ao considerar todas as questões ambientais relacionadas (Duboc *et al.*, 2007; Sparrevik *et al.*, 2015).

No estado de Minas Gerais, a deliberação normativa COPAM 227/2018 preconiza a adoção de medidas mínimas nas unidades de produção de carvão vegetal para reduzir as emissões atmosféricas. Dentre elas estão os controles de umidade e impurezas na madeira, controle de temperatura dos fornos, rendimento gravimétrico em carvão vegetal, integridade estrutural dos fornos, limpeza de pisos e desobstrução de controladores de ar antes do enforamento, além do estudo de dispersão das emissões atmosféricas (MINAS GERAIS, 2018).

Em relação aos materiais genéticos, as diferenças na composição química, física e morfológica da madeira são variáveis entre e dentro das espécies, o que leva à geração de produtos distintos (Jesus; Silva, 2020). Sonter *et al.* (2015) alertam que o sucesso da redução das emissões de CO₂ pelas siderúrgicas está associado à expansão do uso de madeira de florestas plantadas em detrimento da utilização da floresta nativa que, nesta última opção, poderia implicar em efeitos práticos negativos no balanço de emissões.

Desta forma, no processo de carbonização da madeira, é indispensável o conhecimento do balanço das emissões dos principais GEE associados às características da madeira, ou seja, proveniente de diferentes materiais genéticos para identificação dos potenciais de emissão a um mesmo teor de umidade, considerando-se o cenário de produções em fornos retangulares com controle de temperatura.

Schettini *et al.* (2022) afirmam que um balanço de carbono que evidencie remoções superiores às emissões indica a sustentabilidade na cadeia produtiva e configuram estratégia de marketing na comercialização de produto carbono neutro.

A obtenção dos balanços de carbono no processo de carbonização, associados aos principais indicadores de produção dos fornos, consistem em premissas que podem contribuir para escolhas assertivas de novos materiais genéticos para produção de carvão vegetal com menor impacto de emissões atmosféricas, em consonância com as pactuações ambientais recentemente estabelecidas.

Neste contexto, o sistema *Charcoal System* possibilita quantificar as emissões e remoções dos gases do efeito estufa, a partir das informações fornecidas pelo usuário, tais como à floresta, madeira, fornos e carvão vegetal (Silva *et al.*, 2024).

A partir da geração dos balanços de emissões pelo sistema, as empresas produtoras de carvão vegetal terão um importante indicador para a escolha de genótipos mais eficientes na mitigação dos GEE, colaborando, dessa forma, com o cumprimento das metas de descarbonização estabelecidas para esta importante etapa do processo produtivo.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi obter por meio do sistema *Charcoal System* os balanços de carbono da produção de carvão vegetal proveniente de diferentes materiais genéticos.

Os objetivos específicos foram:

- Obter a composição química elementar e densidade básica das madeiras em função dos materiais genéticos;
- Determinar o rendimento gravimétrico, composição química imediata, densidade a granel e friabilidade do carvão vegetal de materiais genéticos de *Corymbia* e *Eucalyptus*;
- Estimar os principais indicadores de produtividade dos fornos retangulares modelo RAC700 de produção de carvão vegetal;
- Utilizar a análise de agrupamento para classificação de materiais genéticos de acordo com os níveis de emissão de CH₄, CO₂ e balanços dos GEE.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da localização do teste clonal e materiais genéticos

Para a realização do trabalho foram utilizados 16 materiais genéticos, sendo colhidas três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6,0x1,5m, provenientes de plantios situados na cidade de Itamarandiba/MG (latitude 17° 44' 45" S; longitude 42° 45' 11" W e altitude 1.000m), totalizando 48 unidades amostrais.

A região de instalação do experimento tem topografia plana (chapada) e vegetação nativa do bioma Cerrado. O solo é do tipo latossolo vermelho distrófico típico e vermelho amarelo distrófico típico, com textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturado. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.166 mm e a temperatura média de 21°C. O

clima pela classificação de Köppen é classificado como sendo tropical de altitude – Cwa – temperado úmido com inverno seco e verão quente (Henriques *et al.*, 2017).

O teste clonal foi instalado em parcelas de 8 linhas com 8 plantas para cada material genético. Os diâmetros à altura do peito (DAP's) das árvores selecionadas variaram entre 14,2 a 22,8 cm, com valor médio de 18,3 cm. As alturas comerciais (Hc's) variaram entre 17,7 a 25,3 m, com valor médio de 22,1 m.

O volume individual das árvores foi determinado pelo método de *Smallian*, multiplicando-se as médias dos valores das áreas seccionais obtidas nas extremidades de cada seção e o comprimento das mesmas, com posterior somatório do volume das seções. O volume total de madeira produzido por hectare foi calculado pela multiplicação do volume individual das árvores pelo número de árvores por hectare. O Incremento Médio anual foi obtido pela relação entre o volume de madeira por hectare ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) e a idade (anos).

Na Tabela 1 é apresentada a descrição das combinações genéticas que foram utilizadas, assim como informações dendrométricas relacionadas a volumetria, obtidas a partir das informações da cubagem rigorosa.

Tabela 1 - Descrição dos genótipos de *Corymbia* e *Eucalyptus* utilizados na pesquisa

| Clones | Materiais genéticos | % casca (**) | IMA s/casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) | IMA c/casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) |
|--------|---|--------------|--|--|
| 1 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 13,9 | 26,2 | 30,5 |
| 2 | <i>Eucalyptus cloeziana</i> | 23,4 | 37,9 | 49,6 |
| 3 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 16,5 | 43,2 | 51,7 |
| 4 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 12,9 | 51,2 | 58,8 |
| 5 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 14,4 | 26,5 | 30,9 |
| 6 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. ^(*) | 10,5 | 41,2 | 46,1 |
| 7 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. ^(*) | 9,7 | 48,7 | 54,0 |
| 8 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. ^(*) | 10,6 | 55,6 | 62,2 |
| 9 | <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 30,6 | 34,0 |

| | | | | |
|----|---|------|------|------|
| 10 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) | 10,8 | 41,0 | 45,9 |
| 11 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,3 | 46,9 | 51,8 |
| 12 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 8,0 | 48,4 | 52,6 |
| 13 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 55,5 | 59,5 |
| 14 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 7,7 | 46,9 | 50,8 |
| 15 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> | 9,9 | 41,8 | 46,4 |
| 16 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus pellita</i> | 11,1 | 56,7 | 63,8 |

Fonte: Elaboração Própria. (*) Híbrido espontâneo de *Eucalyptus* spp.; (**) Valor médio ponderado pelo volume das árvores.

3.2. Sistema *Charcoal System*

O sistema *Charcoal System* foi desenvolvido para fornecer, gratuitamente, através da URL www.charcoalsystem.com.br, relatórios sobre balanço de carbono, emissões da siderurgia decorrentes da carbonização, aquisição da madeira e produção de carvão vegetal (Silva *et al.*, 2024).

De acordo com os autores, as etapas de preenchimento do sistema foram idealizadas para serem independentes (Cadastro, emissões do GEE, remoção de carbono, custo máximo viável da madeira, custo mínimo do carvão vegetal e viabilidade econômica do carvão vegetal). O usuário pode, desta forma, obter os balanços e outras informações desejadas preenchendo apenas as etapas relevantes para o mesmo. Caso o usuário não disponha de um valor para atribuir à determinada variável, o sistema sugerirá um valor de referência.

Para a realização das estimativas de emissões do GEE no sistema *Charcoal System*, forneceu-se as informações relevantes disponíveis da floresta, madeira, fornos e do carvão vegetal (Figura 1).

Figura 1 - Inputs referentes às informações demandadas da área do plantio experimental, dos fornos de carbonização, das propriedades da madeira e do carvão vegetal.



Fonte: Elaboração própria (a partir das informações demandadas pelo Sistema *Charcoal System*).

As equações 1 a 8 foram utilizadas pelo sistema para obtenção das principais variáveis e balanços de carbono relevantes para este estudo.

$$FE_{CH_4} = \frac{217,12 - (534,76 \times RG)}{1000} \quad (1)$$

$$E_{CH_4} = FE_{CH_4} \times P_{total} \times (1 - Q) \quad (2)$$

onde, FE_{CH_4} : fator de emissão de CH_4 para carbonização, em Mg CH_4 /Mg Carvão; E_{CH_4} : emissão de CH_4 pela carbonização, em Mg CH_4 /ano; RG: Rendimento gravimétrico, em %; P_{total} : Produção total de carvão vegetal, em Mg/ano; Q: percentual de queima de gases.

$$FE_{CO_2} = 114,165574 - (0,025565 \times TU) + (0,027518 \times TU^2) \quad (3)$$

$$E_{CO_2sc} = \frac{FE_{CO_2} \times M}{1000} \quad (4)$$

FE_{CO_2} : fator de emissão de CO_2 para carbonização, em Mg CO_2 /Mg Madeira; TU: teor de umidade da madeira enfornada, em %; M: total de madeira enfornada, em Mg/ano; E_{CO_2sc} : emissão de CO_2 pela carbonização sem combustão dos gases, em Mg CO_2 /ano.

$$E_{CO_2e} = (E_{CH_4} \times 27) + E_{CO_2} \quad (5)$$

E_{CO_2e} : emissão total de GEE pela carbonização, em Mg CO_2e /ano; E_{CH_4} : emissão de CH_4 pela carbonização, em Mg CH_4 /ano; 27: Potencial de Aquecimento Global do CH_4 ; E_{CO_2} : emissão de CO_2 pela carbonização sem combustão dos gases, em Mg CO_2 /ano.

$$R_{FP} = A_{FP} \times P \times 0,47 \times (44/12) \quad (6)$$

R_{FP} : remoção de carbono pelas florestas plantadas, em Mg CO_2 /ano; A_{FP} : área que deve ser colhida para atender à demanda anual de madeira, em ha/ano; P: produtividade média esperada, em Mg/ha;

Obs: utilizou-se o teor de carbono obtido para cada material genético; 44/12: fator de conversão de C para CO₂.

$$BC(\text{anual}) = E_T - R_T \quad (7)$$

BC: Balanço de carbono realizado no período de um ano, em Mg CO₂e/ano; E_T: Emissões totais, em Mg CO₂e/ano; R_T: Remoções totais, em Mg CO₂e/ano.

$$BC(\text{massa}) = \frac{BC(\text{anual})}{P_{\text{total}}} \quad (8)$$

BC: Balanço de carbono realizado em período de um ano, em Mg CO₂e/Mg Carvão; P_{total}: Produção total de carvão vegetal, em Mg/ano.

Ressalta-se que os balanços de emissões para as finalidades desta simulação foram baseados em plantios experimentais, logo não foram contabilizadas as remoções decorrentes de florestas nativas.

Por se tratar de simulação de emissões de GEE em materiais genéticos sem histórico de carbonizações disponíveis, algumas informações demandadas pelo sistema *Charcoal System* referentes à área de plantio experimental e fornos de carbonização foram disponibilizadas pela empresa fornecedora da matéria-prima (Tabela 2). Da mesma forma, estes valores foram mantidos fixos com o intuito de mensurar o efeito da matéria-prima no processo de carbonização.

Tabela 2 – Informações referentes aos fornos demandadas pelo sistema *Charcoal System*.

| Equipamento/Processo | |
|---|---|
| Forno de carbonização (Descrição) | Modelo RAC700. Formato retangular, dimensões 26,5x8,0x7,0m (CxLxH), com sistema supervisório de monitoramento da temperatura de carbonização. |
| Quantidade fornos (unidades) | 36 |
| Madeira enfiada/forno/ciclo (m ³) | 500 |
| Ciclo médio carbonização (dias) | 17 |
| Produtividade média (ciclos/mês) | 1,5 |
| Período de inatividade (dias) | 4 |

Fonte: Elaboração Própria.

3.3. Propriedades da madeira e do carvão vegetal

As análises realizadas e respectivas metodologias para obtenção dos resultados das propriedades da madeira e do carvão vegetal, necessárias para utilização no *Charcoal System*, foram sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Procedimentos para obtenção dos valores médios das propriedades da madeira e do carvão vegetal.

| Propriedades | Norma/Metodologia |
|---|---|
| Madeira | |
| Densidade básica | ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003); Vital (1984) |
| Composição química elementar | TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 2001) |
| Carvão Vegetal | |
| Rendimento gravimétrico em carvão vegetal | Santos <i>et al.</i> (2012) |
| Composição química imediata | ABNT NBR 8112 (1986) |
| Densidade relativa aparente | Vital (1984) |
| Friabilidade | Oliveira <i>et al.</i> (1982) |

Fonte: Elaboração própria

3.4. Análise estatística

Para avaliação dos resultados experimentais foi considerado o delineamento inteiramente casualizado, com dezesseis tratamentos (materiais genéticos) e três repetições (árvores), totalizando 48 unidades amostrais.

Após a obtenção dos resultados das emissões e remoções de CO₂, CH₄ e balanços de carbono da produção de carvão vegetal dos materiais genéticos, efetuou-se a organização dos mesmos em grupos homogêneos por meio da análise de agrupamentos hierárquicos aglomerativos, utilizando-se o software *Statistica 7.0*. Para melhor visualização dos grupos formados, os agrupamentos foram representados graficamente por meio de dendrograma, utilizando-se o método *Complete Linkage*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais informações necessárias para o cálculo dos fatores de emissão, emissões de GEE, remoções de CO₂ e balanço de carbono são sintetizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Síntese dos resultados referentes à madeira e carvão vegetal obtidos para os 16 materiais genéticos e demandados pelo sistema *Charcoal System*.

| Madeira | |
|--|---------------|
| Produção biomassa (ton/ha) | 129 a 258 |
| Teor de carbono (%) | 48,5 a 49,7 |
| Carbono (ton/ha) | 63 a 126 |
| Teor de umidade base seca (%) | 35 |
| Densidade básica (kg/m ³) | 437 a 636 |
| Carvão vegetal | |
| Produção por ciclo de carbonização (ton/forno) | 74 a 114 |
| Produção anual (toneladas) | 49077 a 75492 |
| Densidade a granel (kg/mdc) | 175 a 255 |
| Teor de carbono fixo (%) | 74,6 a 77,8 |
| Rendimento gravimétrico (%) | 33,3 a 35,9 |
| Finos UPC/forno (%) | 5,7 a 12,2 |
| Produção média atíços (%) | 3,5 |

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados das propriedades da madeira e do carvão vegetal evidenciaram, preliminarmente, que os materiais genéticos tiveram diferenças muito acentuadas em produção de biomassa, massa de carbono, densidade básica, densidade aparente, rendimento gravimétrico e teor de finos. Estas diferenças refletiram diretamente na produtividade em carvão vegetal pelos fornos, com variações superiores a 50% entre os materiais genéticos avaliados.

Vale ressaltar que, nas simulações realizadas, utilizou-se como referência o teor de 35% de umidade final da madeira (antes do processo de carbonização), respeitando-se o limite máximo de 40% estabelecido pela DN 227/2018 (MINAS GERAIS, 2018).

As diferenças obtidas entre os materiais genéticos avaliados em relação às emissões, remoções e respectivos balanços de CO₂e anuais e também em relação à massa total de carvão vegetal são representados nas Figuras 2, 3 e 4.

Figura 2 - Valores de emissões, remoções e balanços de CO₂e anuais para os dezesseis materiais genéticos (*Produções anuais de carvão vegetal variaram de 49 a 75 mil toneladas*).

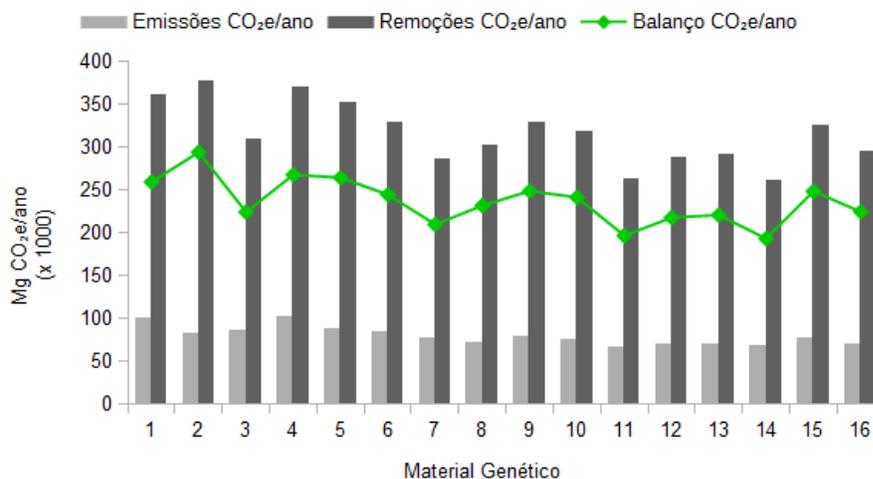


Figura 3 - Balanços de CO₂e anuais para os dezesseis materiais genéticos.

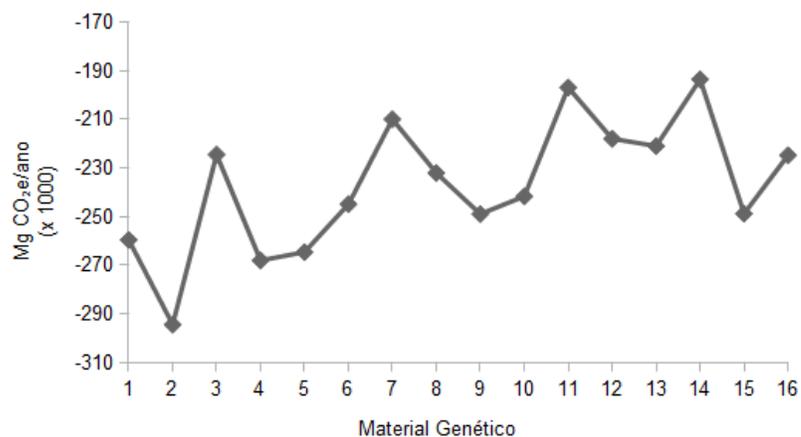
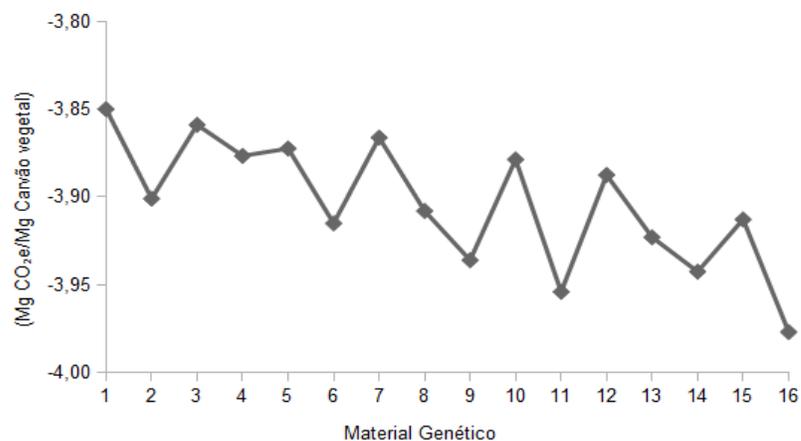


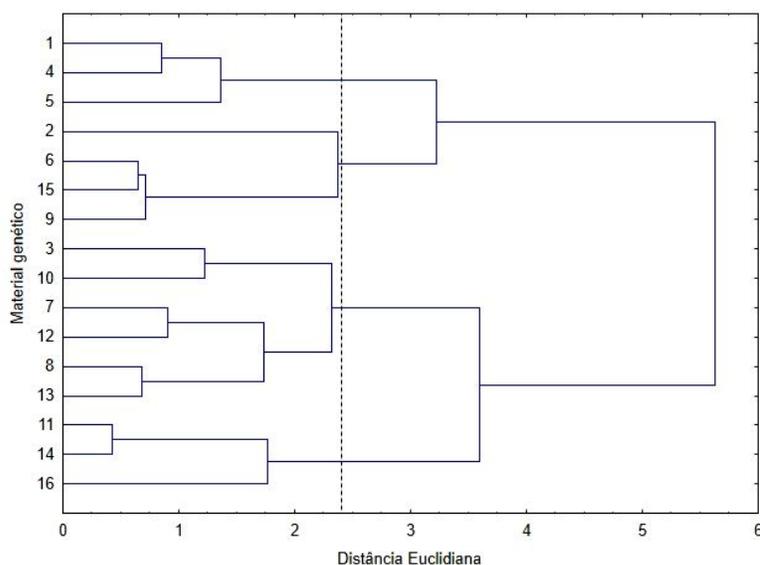
Figura 4 - Balanços de CO₂e em relação à massa de carvão vegetal produzida para os dezesseis materiais genéticos.



A partir da obtenção dos resultados por material genético dos fatores de emissão, emissões, remoções e balanços de carbono, os mesmos foram organizados em grupos similares, conforme dendrograma (Figura 5). Esta organização possibilitou a observância das diferenças nas emissões dos GEE sob a ótica de diferentes indicadores, evitando-se a interpretação isolada e por vezes inconclusivas em razão do número de materiais genéticos.

Neste sentido, a análise de agrupamento indicou a formação de 4 grupos distintos, com 3 a 6 materiais genéticos por grupo, segundo os diferentes padrões de emissões.

Figura 5 - Dendrograma (*Complete linkage*) e distância euclidiana obtido pelas médias padronizadas da emissão total (Mg CO₂e/ano), remoção total (Mg CO₂e/ano), balanço de carbono (Mg CO₂e/ano) e balanço de carbono (Mg CO₂e/Mg Carvão) para os 16 materiais genéticos.



Os grupos similares foram organizados em grupo I, formado unicamente pelos materiais genéticos de *Corymbia* (1, 4 e 5), grupo II (2, 6, 15 e 9), grupo III (3, 10, 7, 12, 8, 13) e grupo IV (11, 14 e 16). A Tabela 5 indica os valores médios dos fatores de emissão, emissões, remoções e balanços dos materiais genéticos de forma geral (16 materiais genéticos) obtidos pelo sistema *Charcoal System* para os respectivos grupos estabelecidos.

Tabela 5 - Valores médios para os indicadores de emissão/remoção e balanço de carbono para os materiais genéticos e respectivos grupos formados na análise de agrupamento.

| FATORES DE EMISSÃO, EMISSÃO/REMOÇÃO E BALANÇO DE CARBONO | | VALORES MÉDIOS | | | | |
|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------|----------|
| | | Geral (16 materiais genéticos) | Agrupamento (materiais genéticos) | | | |
| | | | I | II | III | IV |
| | | | 1,4,5 | 2,6,15, 9 | 3,10,7, 12,8,13 | 11,14,16 |
| Fator de emissão CH ₄ | (Mg CH ₄ /Mg Carvão) | 0,033 ^(*) (0,004) | 0,036 | 0,030 | 0,032 | 0,033 |
| Emissão anual CH ₄ | (Mg CH ₄ /ano) | 1970 (316) | 2490 | 1955 | 1855 | 1698 |
| Fator de emissão CO ₂ | (Mg CO ₂ /Mg Madeira) | 0,147 ^(**) | 0,147 | | | |
| Emissão anual CO ₂ | (Mg CO ₂ /ano) (x1000) | 25,8 (3) | 29,7 | 27,7 | 24,5 | 22 |
| Emissões totais | (Mg CO ₂ e/ano) (x1000) | 79 (10,9) | 96,9 | 80,5 | 74,6 | 67,9 |
| Remoções totais | (Mg CO ₂ e/ano) (x1000) | 316 (35,7) | 361 | 339,8 | 299,1 | 273 |
| Balanço de carbono | (Mg CO ₂ e/ano) (x1000) | (-)236,9 (27,2) | (-)264 | (-)259,3 | (-)224,5 | (-)205 |
| | (Mg CO ₂ e/Mg Carvão) | (-)3,90 (0,04) | (-)3,87 | (-)3,92 | (-)3,89 | (-)3,96 |

(*) Os valores entre parênteses representam o desvio padrão (**) Padronizado para madeira a 35% de umidade de acordo com DN 227/2018.

As diferenças observadas nos fatores de emissão do CH₄ decorreram das variações observadas nos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, que são considerados nos cálculos deste indicador. Neste contexto, de acordo com o CGEE (2015), se no Brasil fosse alterado o RG médio de 26% para 35% (via controles eficientes nos processos de produção dos fornos de alvenaria e novas tecnologias de produção) as emissões de metano alterariam de 78 kg CH₄/t.carvão (ou 0,078 Mg CH₄/Mg carvão) para 30 kg CH₄/t.carvão (ou 0,030 Mg CH₄/Mg carvão). Os resultados obtidos para os 16 materiais genéticos, com RG médio de 34,5%, corroboraram as informações do autor.

Deste modo, as emissões anuais de CH₄ variaram entre grupos, considerando-se, além das diferenças entre os fatores de emissão, a variação de produção de carvão vegetal obtida para cada grupo de materiais genéticos. A variação observada entre o grupo I (maiores emissões) e o grupo IV (menores emissões) foi de 46,6%.

Tazebew *et al.* (2023) ao avaliarem o impacto nas emissões de carbono de diferentes sistemas de produção de carvão em comparação com fornos tradicionais de terra na Etiópia e utilizando-se madeira de *E. camaldulensis* com idade entre 5 e 7 anos, obtiveram valores de 0,028 a 0,036 Mg CH₄/Mg carvão para os fornos melhorados e 0,052 Mg CH₄/Mg carvão para os fornos de terra.

Os fornos de carbonização respondem por aproximadamente 98% das emissões no ciclo de vida do carvão vegetal, com valores em torno de 2431 kg CO₂e/tonelada de carvão vegetal produzido (Silva, 2022).

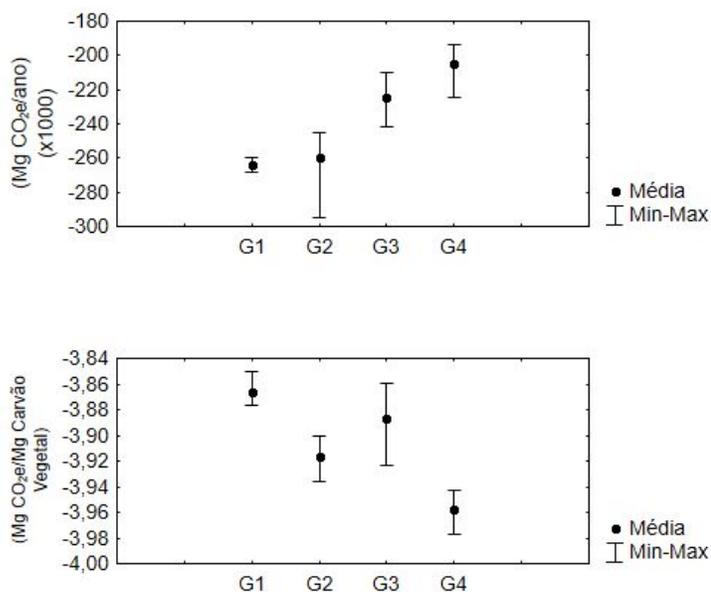
Em relação às emissões anuais de CO₂, ao analisarmos os resultados obtidos do Grupo I, observou-se que a média deste indicador para os materiais genéticos pertencentes a este grupo é 34,6% superior à média observada para os materiais genéticos que tiveram menores emissões (pertencentes ao grupo IV). Uma vez que os fatores de emissão de CO₂ foram constantes para todos os grupos, na condição de umidade padronizada da madeira, a possibilidade operacional de obtenção de maior massa de madeira enfiada, anualmente, resultou nestes valores mais elevados para este grupo formado por híbridos de *Corymbia*.

Na análise da emissão e remoção totais anuais de CO₂ observou-se que os materiais genéticos do grupo I apresentaram emissões totais médias de CO₂ 42,7% superiores, em contrapartida as respectivas remoções foram, em média, 32,3% superiores aos materiais genéticos pertencentes ao grupo IV. Os maiores valores de emissões para o grupo I decorreram das maiores emissões de CH₄ no processo de carbonização, considerando-se a maior produtividade nos fornos para os genótipos deste grupo. As maiores remoções decorreram da maior necessidade de área a ser colhida, principalmente considerando-se os baixos valores de IMA dos materiais genéticos 1 e 5.

Observou-se resultados negativos, ou seja, as remoções foram superiores às emissões, em todos os 4 grupos para ambos os balanços de carbono, expressos em Mg CO₂e anuais e também em relação a massa de carvão vegetal. Neste sentido, observou-se que, de forma geral, todos os grupos de materiais genéticos contribuíram para a redução das emissões dos GEE para as condições estabelecidas na simulação.

Na Figura 6 são apresentados os valores médios e os respectivos valores máximos e mínimos obtidos para cada grupo estabelecido.

Figura 6 - Valores médios dos balanços de carbono para os quatro grupos de materiais genéticos obtidos na análise de agrupamento.



Norgate *et al.* (2012) estimaram que o uso de carvão vegetal de *Eucalyptus* em rota integrada de produção de aço tem o potencial de redução dos efeitos dos GEE em 0,69-1,21 t CO₂e/t aço (31-57%), sem contabilizar a utilização de subprodutos e geração de eletricidade. Segundo os autores, a geração dos GEE corresponde a 1,56 t CO₂e/t carvão vegetal, destacando a vantagem de a biomassa sequestrar parte dos gases, zerando as emissões líquidas.

A despeito dos bons resultados gerais obtidos no balanço de carbono, na análise do balanço das emissões de CO₂e anuais observou-se maior coeficiente de variação em comparação com o balanço de emissões expressos em relação à massa de carvão vegetal.

Por exemplo, na comparação dos resultados obtidos do Grupo I em relação ao grupo IV, observou-se valor médio do balanço de CO₂e 28,8% superior para os híbridos de *Corymbia*, com uma diferença de 59 mil toneladas de CO₂e. Como visto, esta diferença ocorreu em função da necessidade de maior área plantada e maior biomassa por hectare para atendimento à demanda de madeira dos fornos, compensando, dessa forma, os menores incrementos médios anuais dos híbridos 1 e 5, o que resultou no aumento do valor das remoções anuais de CO₂e para este grupo.

Os indicadores de emissão, remoção e balanços de carbono evidenciaram que os híbridos de *Corymbia*, que compuseram o grupo I na análise de agrupamento, foram os mais indicados para os propósitos de redução das emissões dos GEE nas condições adotadas neste

estudo. Destacaram-se, principalmente, no balanço de CO₂e anual. Dentro deste grupo, o material genético 4, híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana*, teve quantidade de biomassa por hectare duas vezes maior que a média dos híbridos 1 e 5, sendo também superior aos valores obtidos para os demais híbridos avaliados, o que contribuiu para o melhor resultado deste grupo em relação aos demais.

O desenvolvimento de novos híbridos tem ocorrido de forma concomitante à possibilidade de combustão ou recuperação dos gases da carbonização em médias e grandes empresas. Em contrapartida, a realidade das pequenas produções é distinta, prevalecendo a carbonização tradicional da madeira sem controle ou mitigação de emissões.

Desta feita, de forma associada às recentes legislações e acordos ambientais para mitigação das emissões atmosféricas, a utilização de materiais genéticos que contribuam com balanços de emissões mais eficientes na siderurgia a carvão vegetal deve se somar às estratégias de desenvolvimento de equipamentos de queima e reaproveitamento dos gases da carbonização, considerando-se as diferentes escalas produtivas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciaram as diferenças existentes na emissão dos GEE na utilização de diferentes materiais genéticos na carbonização, sob as mesmas condições de processo e monitoramento em fornos retangulares;

As madeiras dos diferentes materiais genéticos tiveram valores muito distintos em produção de biomassa/ha, densidade básica da madeira, massa de carbono/ha e também em relação à densidade aparente, rendimento gravimétrico e teor de finos do carvão vegetal. Estas diferenças influenciaram diretamente nos valores obtidos para os balanços de CO₂e, possibilitando a identificação de grupos de híbridos mais eficientes para mitigação das emissões dos GEE;

Nas simulações, as variações observadas nas propriedades físicas e químicas das madeiras impactaram diretamente na produtividade dos fornos retangulares de carbonização, com diferenças superiores a 50% em relação à massa de carvão vegetal obtida em cada ciclo;

Todos os materiais genéticos tiveram níveis de emissões negativos nos balanços simulados. No entanto, os híbridos de *Corymbia* pertencentes ao grupo I tiveram resultado geral superior no conjunto da análise dos balanços, sendo os mais indicados para as condições previamente estipuladas;

O material genético 4, híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana* teve, além dos melhores resultados dos balanços de emissões identificados no Grupo I, maior massa de madeira por unidade de área, destacando-se em relação aos demais;

Os resultados ratificaram a importância da matéria-prima nos processos de carbonização em fornos retangulares com sistema de monitoramento da temperatura;

Em relação as produções em fornos artesanais sem controle da temperatura de carbonização, os híbridos de *C. citriodora* x *C. torelliana* (1, 4 e 5) podem ser uma alternativa viável na busca pela redução das emissões dos GEE, recomendando-se outros estudos que contemplem as peculiaridades envolvidas para esta escala de produção.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986 8p.

CARDOSO, M. T.; DAMASIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, v. 16, p. 115-124, 2010.

CGEE. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: Subsídios Para Revisão do Plano Siderurgia.**: Brasília, 2015. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF/a3cd6c7c-5b5b-450a-955b-2770e7d25f5c?version=1.3. Acesso em: 31 jul. 2023.

COSTA, J. M. F. N.; FREITAS, F. P.; CANAL, W. D.; MAGALHÃES, M. A.; CARVALHO, A. M. M. L.; CASTRO, R. V. O. Geração de créditos de carbono na queima de metano na carbonização. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 10, n. 1, 2018.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. S.; PALUDO, A. Panorama Atual da Produção de Carvão Vegetal no Brasil e no Cerrado. Documentos 197. **Embrapa Cerrados**, Planaltina-DF, 2007.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C. B.; SEBENN, A. M.; FILHO, M. T.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 105-113, 2017.

HOSSAIN, A. K.; DAVIES, P. A. Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 165-189, 2013.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2022**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2023.

JESUS, D. S.; SILVA, J. S. Variação radial de propriedades anatômicas e físicas da madeira de eucalipto. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 1, p. 26476, 2020.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 227, de 29 de agosto de 2018**. Estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=367024>. Acesso em: 15 ago. 2023.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária 2020-2030: Plano ABC+**. Brasília, DF: MAPA, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2023.

NORGATE, T.; HAQUE, N.; SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking. **ISIJ internacional**, v. 8, pág. 1472-1481, 2012.

NORGATE, T.; LANGBERG, D. Environmental and economic aspects of charcoal use in steelmaking. **ISIJ international**, v. 49, n. 4, p. 587-595, 2009.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMASIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, p. 557-566, 2013.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal – aspectos técnicos. In: **CETEC. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte**. P.59-72 (SPT-008), 1982.

PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592-600, 2017.

PEREIRA, E. G.; FAULLER, H.; MAGALHÃES, M.; GUIRARDI, B.; MARTINS, M. A. Potential use of wood pyrolysis coproducts: A review. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 41, n. 1, p. e13705, 2022.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v.18, n.1, 143-151, 2012.

SCHETTINI, B. L. S.; JACOVINE, L. A. G.; TORRES, C. M. M. E.; CARNEIRO, A. C. O.; VILLANOVA, P. H.; ROCHA, S. J. S. S.; RUFINO, M. P. M. X.; SILVA, L. B.; CASTRO, R. V. O. Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance?. **Industrial Crops and Products**, v. 187, p. 115330, 2022.

SEBOKA, Y. Bio-carbon opportunities in eastern & southern Africa. In: **Advantages & disadvantages of charcoal compared with fuelwood and other biomass energy sources**. New York, 10017, USA: PNUD, 2009. p.102-126.

SILVA, L. B.; CARNEIRO, A. C. O.; ALVES, E. B. B. M.; LANA, A. Q.; BARCELLOS, D. C.; JACOVINE, L. A. G. Charcoal system: Brazilian tool for low carbon charcoal activities. **Journal of Cleaner Production**, p. 141075, 2024.

SILVA, S. A. **Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Carvão Vegetal: Um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2022.

SONTER, L. J.; BARRETT, D. J.; MORAN, C. J.; SOARES FILHO, B. S. Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil's steel industry. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 4, p. 359-363, 2015.

SPARREVIK, M.; ADAM, C.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, J. G. Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved "retort" kilns. **Biomass and Bioenergy**, v. 72, p. 65-73, 2015.

SUOPAJARVI, H.; KEMPPAINEN, A.; HAAPAKANGAS, J.; FABRITIUS, P. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 709-734, 2017.

SUOPAJARVI, H.; UMEKI, K.; MOUSA, E.; HEDAYATI, A.; ROMAR, H.; KEMPPAINEN, A.; WANG, C.; PHOUNGLAMCHEIK, A.; TUOMIKOSKI, S.; NORBERG, N.; ANDEFORS, A.; OHMAN, M.; LASSI, U.; FABRITIUS, T. Use of biomass in integrated steelmaking—Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies. **Applied Energy**, v. 213, p. 384-407, 2018.

TANZER, S. E; RAMÍREZ, A. When are negative emissions negative emissions?. **Energy & Environmental Science**, v. 12, n. 4, p. 1210-1218, 2019.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T257 cm-85**: sampling and preparing wood for analysis. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. 2001.

TAZEBEW, E.; SATO, S.; ADDISU, S.; BEKELE, E.; ALEMU, A.; BELAY, B. Charcoal production systems from smallholder plantation implications on carbon emission and sustainable livelihood benefits in north western Ethiopia. Versão 1 (preprint), **Research Square**, 2023.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.

ZHANG, Y.; LIANG, Y.; LI, S.; YUAN, Y.; ZHANG, D.; WU, Y.; XIE, H.; BRINDHADEVI, K.; PUGAZHENDHI, A.; XIA, C. A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades. **Fuel**, v. 347, p. 128461, 2023.

CAPÍTULO IV - ÍNDICES DE QUALIDADE DAS FIBRAS DAS MADEIRAS DE *Corymbia* spp. E *Eucalyptus* spp. PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS GENÉTICOS DESTINADOS A PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA

RESUMO

A indicação de materiais genéticos para obtenção de polpa celulósica e produção de papel requer a comprovação da eficiência em relação ao desempenho silvicultural e de processamento na indústria. Para tanto, em relação à utilização da madeira propriamente dita, são realizadas de forma preliminar as análises químicas, físicas e anatômicas que, somadas aos testes de rendimento da polpação, branqueamento, resistência físico-mecânica dessas polpas, dentre outros, contribuirão nos processos decisórios de seleção desses materiais. Neste contexto, buscou-se neste trabalho selecionar materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. para produção de polpas celulósicas destinadas à produção de papel, por meio de análise de agrupamento, a partir das características morfológicas dos principais elementos anatômicos da madeira, rendimento depurado da polpa marrom e índices de qualidade das fibras (Índices de Runkel, enfeltramento, Mulsteph e coeficiente de flexibilidade). Foram avaliados 16 materiais genéticos, sendo colhidas três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6x1,5m, provenientes de plantios situados na cidade de Itamarandiba/MG. Foram retirados discos com espessura aproximada de 7 cm, dispostos longitudinalmente na árvore nas posições da base (posição 0), DAP (diâmetro a altura do peito), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Utilizou-se uma amostra da região do cerne e outra do alburno, em cada posição, para maceração em solução péroxido-acético e obtenção de cortes histológicos transversais em micrótomo. Para as medições das dimensões das fibras e vasos em microscópio ótico utilizou-se o software Axiovision 4.8. As informações sobre o rendimento depurado da polpação para estes materiais genéticos foram obtidas na literatura. Os índices de qualidade de fibras foram obtidos utilizando-se as principais relações entre as dimensões deste elemento anatômico. As correlações estabelecidas entre as dimensões das fibras e os respectivos índices de qualidade mostraram a importância da fração parede para os estudos de melhoramento genético com vistas a seleção de materiais genéticos para produção de diferentes tipos de papéis. Na análise de agrupamento foram obtidos três grupos distintos de materiais genéticos. Observou-se no grupo I a predominância de híbridos com fibras mais compridas e menos flexíveis (Índice de Runkel >1, fração parede >50% e Coeficiente de flexibilidade <50%), mais adequadas para a fabricação de papéis absorventes.

Em relação aos grupos II e III, os materiais genéticos tiveram representantes com maiores rendimentos depurados nas polpações (>52,0%), menores frações paredes (<50%) e outros índices de qualidade das fibras que indicaram a predominância de fibras mais flexíveis (Coeficiente de flexibilidade >50% e Índice de enfiamento >51%), mais adequadas principalmente para fabricação papéis resistentes ao rasgo e ao arrebentamento, destinados para embalagens e sacarias.

Palavras-chave: Índice de Runkel; Resistência mecânica da polpa celulósica; Flexibilidade das fibras.

ABSTRACT

The selection of genetic materials for cellulose pulp and paper production necessitates the demonstration of efficacy concerning silvicultural practices and industrial processing performance. Preliminary chemical, physical, and anatomical analyses of the wood are conducted for this purpose. Together with pulp yield tests, bleaching, and evaluations of the physical-mechanical resistance of these pulps, these analyses aid in the decision-making process for selecting suitable materials. In this light, the current study aimed to identify *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. genetic materials optimal for pulp production for papermaking. The selection was based on cluster analysis of the morphological traits of principal anatomical elements of wood, screened brown pulp yields, and fiber quality indices (Runkel ratio, felting potential, Mulsteph ratio, and flexibility coefficient). We evaluated 16 genetic materials, each represented by three trees of average diameter per treatment, aged 81 months with a 6x1.5 m planting spacing, from plantations in the municipality Itamarandiba/MG. Discs approximately 7 cm thick were extracted longitudinally from the trees at the base (position 0), DBH (diameter at breast height), and 25, 50, 75, and 100% of the commercial height. At each position, samples from both the heartwood and sapwood regions were macerated in a peroxide-acetic solution for the preparation of transverse histological sections using a microtome. Fiber and vessel dimensions were measured under an optical microscope using Axiovision 4.8 software. Literature sources provided screened pulp yield data for these genetic materials. Fiber quality indices were derived from the main dimensional ratios of this anatomical element. The established correlations between fiber dimensions and their quality indices demonstrated the importance of the wall fraction in genetic improvement studies aimed at selecting materials for producing different paper types.

Cluster analysis distinguished three groups of genetic materials. Group I was characterized by hybrids with longer and less flexible fibers (Runkel ratio >1 , wall fraction $>50\%$ and flexibility coefficient $<50\%$), deemed more suitable for producing absorbent paper. Conversely, groups II and III comprised materials with higher screened pulp yields ($>52,0\%$), lower wall fractions ($<50\%$), and fiber quality indices indicative of predominantly more flexible fibers (flexibility coefficient $>50\%$ e felting potential $>51\%$), better suited for producing paper for packaging and bag making.

Keywords: Runkel ratio; pulp mechanical strength; Fiber flexibility.

1. INTRODUÇÃO

No ano de 2022, o Brasil obteve produção recorde de polpa celulósica (25 milhões de toneladas) e também de papel (11 milhões de toneladas). Neste contexto, destacou-se a produção dos papéis para embalagem (6,1 milhões de toneladas), imprimir e escrever (2,2 milhões de toneladas), sanitários (1,4 milhão de toneladas) e papel cartão (0,7 milhão de toneladas) (IBA, 2023).

A obtenção da polpa celulósica para produção dos diferentes tipos de papéis consiste na individualização das fibras pela hidrólise e solubilização da lignina, que mantém as fibras fortemente ligadas umas às outras, sem degradar os carboidratos da madeira (celulose e hemiceluloses) (Colodette; Gomes, 2015; Wastowski, 2018).

A maior propensão ao estabelecimento das ligações interfibras, ocasionadas pela maior flexibilidade das mesmas, contribui para a maior resistência à tração do papel (Pego; Bianchi; Veiga, 2019). Esta característica é desejável, por exemplo, para os papéis de impressão e escrita. Em contrapartida, fibras menos flexíveis, formam uma rede fibrosa mais volumosa, mais propensas a fabricação dos papéis tissue. Segundo Milanez e Rost (2005) para associar maciez e volume específico, as fibras destinadas a esta classe de papéis devem ser rígidas, pouco flexíveis e terem baixa ligação interfibras e baixo colapsamento.

As fibras com maiores comprimentos médios, mais esbeltas, são indicadas para produção de papéis resistentes ao rasgo e arrebentamento, tais como os papéis para embalagens (Mendoza *et al.*, 2021; Pego; Bianchi; Veiga, 2019).

O alto rendimento na produção obtidos na indústria de polpa celulósica, associado a um menor custo, dependem da qualidade da madeira. Desta forma, um dos grandes desafios das indústrias do setor perpassa pela seleção de materiais genéticos adequados (Jardim *et al.*, 2017).

O processo de polpação Kraft é o mais adotado mundialmente pelas empresas na produção de polpa celulósica. O cozimento pode ser realizado de forma contínua, como exemplo, o processo Lo-solids, ou em batelada. Para o cozimento dos cavacos no digestor é utilizado o licor branco, composto por hidróxido de sódio (NaOH), sulfeto de sódio (Na₂S) e outros sais em menores quantidades. Neste processo, as variáveis relacionadas à madeira, tais como espécie, idade, uniformidade e dimensões do cavaco tem influência direta nas propriedades da polpa (Ahmetović *et al.* (2021); Colodette; Gomes, 2015; Wastowski, 2018).

Com vistas ao aumento da rentabilidade das empresas do setor, Kien *et al.* (2009) ressaltam a importância do rendimento da polpação no consumo de madeira por tonelada, em consonância com a produtividade volumétrica e densidade básica.

O uso das técnicas de melhoramento genético e melhores práticas de manejo fazem parte das estratégias para aumentar a produção madeireira em menor tempo. Isto posto, deve-se considerar os impactos de possíveis alterações morfológicas e químicas nas propriedades dos produtos derivados da madeira (Borukanlu *et al.*, 2021). Neste contexto, dentre as várias características que tornam a madeira altamente desejável para produzir polpa celulósica e papel destacam-se a composição anatômica e química (Kiaei; Tajik; Vaysi, 2014; Riki; Sotannde; Oluwadare, 2019). Como exemplo, destacam-se anatomicamente a importância do comprimento, espessura da parede, diâmetro do lume e largura das fibras e, quimicamente, o teor de lignina e relação S/G.

Há grande variabilidade das propriedades físicas, químicas e anatômicas das madeiras que refletem em variações de valor comercial. Deste modo, os estudos anatômicos dos elementos celulares que compõe o xilema da madeira fornecem os primeiros indicadores a avaliar para triagem de potenciais matérias-primas fibrosas para produzir papel (Carrillo *et al.*, 2018; Pirralho *et al.*, 2014). Neste sentido, de acordo com Ganesh e Rekha (2020), a adequação de fibras de determinada espécie para produzir papel pode ser estimada por meio de índices obtidos das relações existentes entre comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume desses elementos celulares.

Nisgoski *et al.* (2012) relataram que para fins papeleiros a maneira como as fibras se entrelaçam no processo de fabricação podem ser avaliadas utilizando-se as relações entre suas dimensões morfológicas. Como exemplo, os autores destacam os índices de Runkel e enfiamento, coeficiente de flexibilidade e fração parede.

Este trabalho avaliou as inter-relações das características morfológicas dos principais elementos anatômicos que compõe o lenho, a influência no rendimento da polpação e índices qualitativos das fibras para produção de papel.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi selecionar materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. para produção de polpa celulósica para papel, por meio de análise de

agrupamento, a partir das características morfológicas dos principais elementos anatômicos da madeira, rendimento depurado da polpa marrom e índices de qualidade das fibras.

Os objetivos específicos foram:

- Obter os principais índices de qualidade de fibras relevantes para seleção de madeiras para fabricação de polpa celulósica para papel;
- Correlacionar as dimensões das fibras com os principais índices qualitativos para produção polpa celulósica para papel;
- Correlacionar as dimensões das fibras e dos elementos de vaso com o rendimento depurado da polpa marrom no processo de polpação kraft.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do trabalho foram utilizados 16 materiais genéticos, sendo colhidas três árvores de diâmetro médio por tratamento, aos 81 meses de idade e espaçamento de plantio 6x1,5m, provenientes de plantios situados na cidade de Itamarandiba/MG (latitude 17° 44' 45" S; longitude 42° 45' 11" W e altitude 1.000m), totalizando 48 unidades amostrais.

A região de instalação do experimento tem topografia plana (chapada) e vegetação nativa do bioma Cerrado. O solo é do tipo latossolo vermelho distrófico típico e vermelho amarelo distrófico típico, com textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturado. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.166 mm e a temperatura média de 21°C. O clima pela classificação de Köppen é classificado como sendo tropical de altitude – Cwa – temperado úmido com inverno seco e verão quente (Henriques *et al.*, 2017).

O teste clonal foi instalado em parcelas de 8 linhas com 8 plantas para cada material genético. Os diâmetros à altura do peito (DAP's) das árvores selecionadas variaram entre 14,2 a 22,8 cm, com valor médio de 18,3 cm. As alturas comerciais (Hc's) variaram entre 17,7 a 25,3 m, com valor médio de 22,11 m. O incremento médio anual (sem casca) variou de 26,2 a 56,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹.

As combinações genéticas avaliadas de *Corymbia* spp. e *Eucalypts* spp. são relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos genótipos de *Corymbia* spp. e *Eucalyptus* spp.

| Materiais genéticos | | | |
|----------------------------|---|----|---|
| 1 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 9 | <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> |
| 2 | <i>Eucalyptus cloeziana</i> | 10 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) |
| 3 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 11 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> |
| 4 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 12 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> |
| 5 | <i>Corymbia citriodora</i> x <i>Corymbia torelliana</i> | 13 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> |
| 6 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. ^(*) | 14 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> |
| 7 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. ^(*) | 15 | (<i>Eucalyptus camaldulensis</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>) x <i>Eucalyptus urophylla</i> |
| 8 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp. ^(*) | 16 | <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus pellita</i> |

(*) Híbrido espontâneo de *Eucalyptus* spp.

3.1. Obtenção dos discos de madeira, preparo das amostras e medição dos elementos anatômicos

Para a caracterização da madeira foram retirados discos com espessura aproximada de 7 cm, dispostos longitudinalmente na árvore nas posições da base (posição 0), DAP (diâmetro a altura do peito), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial.

Para a morfologia das fibras e vasos, retirou-se de cada disco representativo da posição longitudinal na árvore, uma amostra da região do cerne e outra do alburno para maceração e cortes histológicos. A realização deste procedimento ocorreu em função da dificuldade de identificação da região de transição cerne/alburno para alguns materiais genéticos, utilizada como referência em alguns trabalhos.

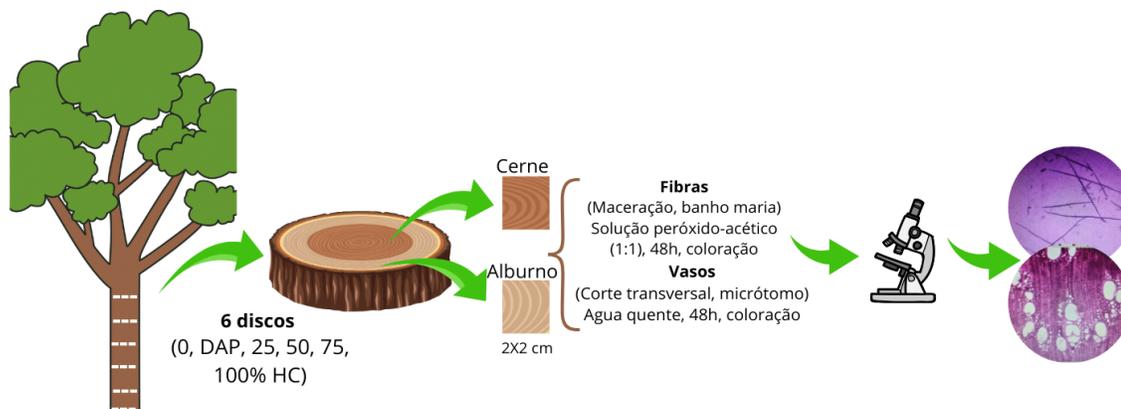
As fibras individualizadas foram obtidas a partir dos fragmentos dissociados com utilização de solução aquecida na proporção 1:1 de peróxido de hidrogênio e ácido acético por 48 horas (Dadswell, 1972).

Foram mensuradas trinta fibras por amostra para avaliação do comprimento, largura da fibra e diâmetro do lume. A espessura da parede das fibras foi determinada de forma indireta, pela relação entre a largura da fibra e diâmetro do lume.

As amostras das regiões do cerne e alburno com dimensões 2x2x2 cm foram imersas em água quente por 48 horas e, posteriormente, efetuou-se cortes histológicos com 16 µm de

espessura no plano transversal em micrótomo de deslize horizontal. A Figura 1 apresenta de forma resumida as etapas de obtenção dos discos de madeira no sentido longitudinal e das amostras para montagem de lâminas para mensuração dos elementos anatômicos.

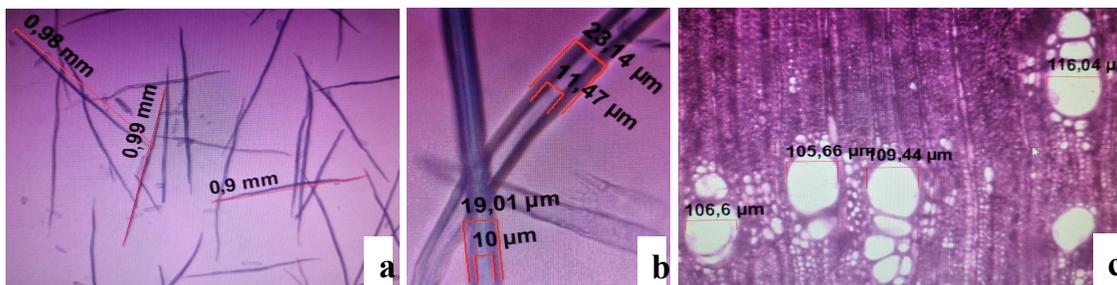
Figura 1 – Fluxograma simplificado para obtenção da suspensão de fibras e cortes histológicos transversais a partir dos 16 materiais genéticos.



Fonte: Elaboração própria

Os cortes foram clarificados, corados e colocados sobre lâmina em solução de glicerina e água, na proporção de 1:1. Trinta vasos foram mensurados em cada lâmina confeccionada para obtenção da frequência por milímetro quadrado e diâmetro tangencial. Para a realização de todas as medições utilizou-se microscópio ótico com câmera acoplada com auxílio do software Axiovision 4.8, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Representação da mensuração de comprimento, largura e diâmetro do lume das fibras e diâmetro tangencial dos elementos de vaso.



Fonte: Elaboração própria. Comprimento das fibras (5x); b) Diâmetro do lume e largura das fibras (20x); c) Diâmetro dos elementos de vaso (10x).

3.2. Rendimento depurado da polpa marrom no processo de polpação kraft

Para obtenção dos valores de rendimento depurado da polpa marrom, para os mesmos 16 materiais genéticos avaliados neste estudo, utilizou-se os resultados médios encontrados por Costa *et al.* (2022). A seguir, é descrita parte da metodologia utilizada pelos autores no trabalho.

Foi analisado uma alíquota de 400 gramas de cavacos de madeira seca por repetição, para todos os materiais genéticos, em cada polpação kraft modificada Lo-Solids, realizada digester MK (modelo 610-2), fator H de 1,031, número kappa de 19 ± 1 . A demanda de álcali efetivo (AE) variou de 15,4 a 18,9% e foram utilizadas como NaOH, em relação a massa seca de madeira, para atingir o número kappa mencionado. Foram utilizados 55% da carga de AE na impregnação dos cavacos. No cozimento, o licor de impregnação foi drenado com posterior injeção do licor branco, com 45% da carga total de AE. A temperatura final de 165°C foi mantida por 90 minutos, para relação licor/madeira de 4/1. O licor negro foi extraído por deslocamento. Posteriormente, efetuou-se a lavagem à 3% AE (90°C ; 60') com posterior extração e água quente (90°C ; 15') (Costa *et al.*, 2022, p.3).

3.3. Índices de qualidade de fibras

Os índices de qualidade de fibras foram obtidos utilizando-se as principais relações entre as dimensões deste elemento anatômico, conforme apresentado nas equações 1 a 5.

$$\text{Fração parede} = \frac{2 \cdot e}{D} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Índice de Runkel} = \frac{2 \cdot e}{d} \quad (2)$$

$$\text{Coeficiente Flexibilidade} = \frac{d}{D} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Índice de enfieltramento} = \frac{C}{D} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Índice de Mulsteph} = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \quad (5)$$

onde e: espessura da parede da fibra (μm); D: diâmetro da fibra (μm); d: diâmetro do lume da fibra (μm); C: comprimento da fibra (mm)

3.4. Análise estatística

Para avaliação dos resultados experimentais foi considerado o delineamento inteiramente casualizado, com dezesseis tratamentos (materiais genéticos) e três repetições (árvores), totalizando 48 unidades amostrais.

A análise descritiva foi utilizada como estudo preliminar, visando obter as medidas de dispersão e posição.

A matriz de correlações (*Pearson*) foi utilizada para identificação da associação das variáveis anatômicas com o rendimento depurado da polpa marrom e principalmente em relação índices de qualidade das fibras.

A partir das variáveis com correlações significativas para uma ou mais propriedades (rendimento da polpação ou índices de qualidade das fibras), utilizou-se a análise de agrupamento hierárquico aglomerativo para estabelecimento dos grupos homogêneos (método *Complete Linkage*).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise conjunta dos materiais genéticos avaliados permitiu observar que, no geral, os coeficientes de variação para as dimensões anatômicas e índices de qualidade das fibras podem ser considerados baixos (<12%) (Warrick; Nielsen, 1980).

Na Tabela 2 são descritos os valores médios das dimensões anatômicas e índices de qualidade de fibras obtidos para os materiais genéticos avaliados. Os valores gerais obtidos para os dezesseis materiais genéticos foram sumarizados no APÊNDICE A.

Tabela 2 - Valores médios e análise descritiva das dimensões anatômicas das fibras, elementos de vasos e índices de qualidade das fibras (16 materiais genéticos).

| Dimensões anatômicas e Índices relacionados | Média^(*) | Mínimo | Máximo | Amplitude |
|--|----------------------------|---------------|---------------|------------------|
| Comprimento de fibra (mm) | 0,98 (0,04) (4,50) | 0,86 | 1,09 | 0,23 |
| Largura da fibra (µm) | 18,85 (0,96) (5,07) | 16,6 | 21,3 | 4,7 |
| Diâmetro do lume da fibra (µm) | 9,4 (0,6) (6,9) | 7,7 | 10,8 | 3,1 |
| Espessura da parede da fibra (µm) | 4,73 (0,25) (5,34) | 4,2 | 5,4 | 1,2 |
| Fração parede da fibra (%) | 50,2 (1,8) (3,6) | 45,1 | 55,4 | 10,3 |
| Diâmetro do lume dos vasos (µm) | 119,37 (5,42) (4,54) | 110,3 | 132,1 | 21,8 |
| Frequência de vasos (vasos mm ⁻²) | 10,39 (0,85) (8,18) | 8,9 | 12,1 | 3,2 |
| Rendimento depurado (%) (**) | 52,1 (1,3) (2,5) | 49,7 | 54,1 | 4,4 |
| Índice de Runkel | 1,01 (0,07) (6,9) | 0,82 | 1,19 | 0,37 |
| Coefficiente de flexibilidade (%) | 49,6 (1,8) (3,7) | 43,9 | 54,9 | 11,0 |
| Índice de enfeltramento | 51,8 (2,7) (5,3) | 45,6 | 57,5 | 11,9 |
| Índice de Mulsteph | 0,75 (0,02) (2,4) | 0,7 | 0,81 | 0,1 |

(*) Os valores entre parênteses representam, respectivamente, o desvio padrão e o coeficiente de variação (%); (**) (Costa *et al.*, 2022).

Os valores da mensuração das dimensões dos elementos celulares, fibras e elementos de vaso, situam-se dentro dos intervalos derivados de resultados de diversos autores. Para híbridos dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp., em idades similares aos materiais genéticos utilizados neste estudo, estes trabalhos indicam variação dimensional de 0,88 a 1,15 mm, 14,4 a 23,9 µm, 6,4 a 12,8 µm e 3,4 a 6,5 µm, respectivamente, para o comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras. Para os elementos de vaso, a variação situou-se entre 92,9 a 129,6 µm e 7,9 a 13,5 (unid/mm²), respectivamente, para o diâmetro tangencial e número de vasos por milímetro quadrado (Couto *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2021; Evangelista *et al.*, 2010; Gouvea *et al.*, 2012; Melo *et al.*, 2016; Sette Jr. *et al.*, 2012).

O rendimento depurado para estes materiais genéticos, obtidos por Costa *et al.* (2022), apesar do baixo coeficiente de variação, têm destacada amplitude, principalmente sob a perspectiva dos grandes volumes médios de produção obtidos nas indústrias de polpa celulósica.

Para *Eucalyptus*, observando-se as variáveis de processo, como exemplo, o número kappa desejado, o cozimento kraft obtém rendimentos variando de 45 a 57% (Foelkel, 2013). Jardim *et al.* (2017) ao avaliarem 19 amostras de clones de eucalipto em idade de corte comercial obtiveram, para o número kappa 20, rendimentos depurados variando de 50,4 a 55,5%. Trugilho *et al.* (2005), ao avaliarem o desempenho de 15 híbridos naturais de *Eucalyptus* aos 5,8 anos de idade obtiveram, para o número kappa 18, rendimentos depurados variando de 43,4 a 52,1%. Ribeiro; Colodette; Vaz Júnior (2018) ao avaliarem o efeito do álcali residual e número kappa no rendimento da polpação de híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* aos sete anos de idade, obtiveram, a um kappa 18 ± 1 , rendimento depurado de 52,7 e 53,7%, respectivamente, para alto e baixo teores de álcali efetivo residual.

Brawner *et al.* (2012) ao avaliarem o rendimento da polpação kraft para *C. citriodora* em três ensaios de progênie realizados na Austrália, aos seis anos de idade, obtiveram valores situados entre 53,8 a 55,9%. Segura e Junior (2016) ao compararem o rendimento depurado de *C. citriodora* aos 8 anos de idade em relação ao híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, a um número kappa 18 e 18,5, respectivamente, obtiveram, para ambos, valores próximos a 54%. Apesar do resultado semelhante, os autores destacaram as vantagens do uso do gênero *Corymbia*, considerando-se, principalmente, o menor consumo específico de madeira e carga de álcali.

As dimensões das fibras obtidas para os diferentes materiais genéticos, analisadas de forma isolada, dificultam a interpretação quanto a propensão para fabricação de diferentes tipos de papéis. Para Nisgoski *et al.* (2012) a indicação de madeiras para fins papéis, dependem das características morfológicas das fibras e da maneira como ocorre o entrelaçamento das mesmas. Neste sentido, Guimarães Junior; Novak; Botaro (2010) relataram que as relações entre as dimensões das fibras, expressas matematicamente, refletem propriedades importantes para fins papéis, tais como o potencial de ligação interfibras, aglomeração em conjunto e percentual de microfibrilas.

O Índice de Runkel (IR) e coeficiente de flexibilidade (CF) pressupõem, além da flexibilidade, a propensão a realizar ligações interfibras (Boschetti *et al.*, 2015). Desta forma, quanto maior o IR, menos apta será a madeira para fabricação de papéis que necessitam de maior resistência e quanto maior o CF maior será o achatamento das fibras, aumentando a

resistência à tração e ao arrebentamento (Burger; Richter, 1991; Guimarães Junior; Novak; Botaro, 2010; Paulino; Lima, 2018; Pego; Bianchi; Veiga, 2019).

Os valores médios obtidos para o Índice de Runkel indicam que existem materiais genéticos aptos para a fabricação de papel de acordo com diferentes classificações, normalmente indicando como parâmetro desejável os valores inferiores a 1 (Barrichelo; Brito, 1976; Burger; Richter, 1991; Dadswell; Wardrop, 1959).

Em relação ao coeficiente de flexibilidade, alguns materiais genéticos tiveram valores médios dentro de limites recomendados para fins papeteiros, que classificam como elásticas as fibras que apresentam coeficiente de flexibilidade entre 50 e 75% (Bektas; Tutus; Eroglu, 1999).

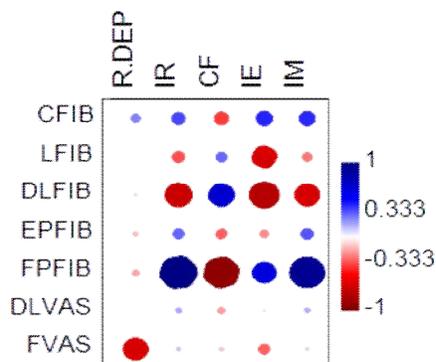
O índice de enfiamento (IE) também está relacionado à flexibilidade das fibras e tem relação direta com a resistência ao rasgo em papéis, ou seja, quanto maior o índice, mais resistente será o papel (Mendoza *et al.*, 2021; Miranda; Castelo, 2012). Para o IE, a maior parte dos materiais genéticos avaliados apresentou valor superior a 50. A partir desse patamar o material fibroso pode ser considerado desejável para produção de papel, como aqueles destinados para embalagens (sacarias) (Rusch; Ceolin; Hillig, 2019).

O índice de Mulsteph (IM) tem relação com a propensão da fibra a sofrer colapso, pois estabelece a relação existente entre a área relativa da parede celular sobre toda a fibra (Pego; Bianchi; Veiga, 2019). Desta forma, quanto maior o índice, menor a propensão ao colapso das fibras. Os valores médios obtidos para IM encontram-se na classe III (>0,6) nos critérios de seleção de matéria prima para destinada a polpa celulósica e para papel na Indonésia (Sitilonga, 1972, *apud* Hartono *et al.*, 2022). Esta classificação apresentada pelo autor é distribuída em três classes, em ordem decrescente de tendência ao colapso. Dessa forma, de acordo com este critério, todos os materiais genéticos deste estudo têm fibras que não são facilmente colapsadas. Dentre os índices avaliados, o IM foi o que teve menor variação entre os materiais genéticos.

As correlações obtidas entre as dimensões anatômicas, rendimento depurado e índices de qualidade das fibras são representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação e matriz de correlação obtidos para as dimensões anatômicas dos elementos celulares (fibras e vasos), rendimento depurado da polpa marrom e índices de qualidade das fibras.

| | R.DEP | IR | CF | IE | IM |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| CFIB | 0,247 | 0,361 | -0,382 | 0,429 | 0,421 |
| LFIB | 0,010 | -0,340 | 0,297 | -0,650* | -0,270 |
| DLFIB | 0,076 | -0,704* | 0,681* | -0,778* | -0,655* |
| EPFIB | -0,135 | 0,300 | -0,313 | -0,229 | 0,332 |
| FPFIB | -0,184 | 0,976* | -0,930* | 0,622* | 0,919* |
| DLVAS | 0,019 | - | - | - | - |
| FVAS | -0,649* | - | - | - | - |



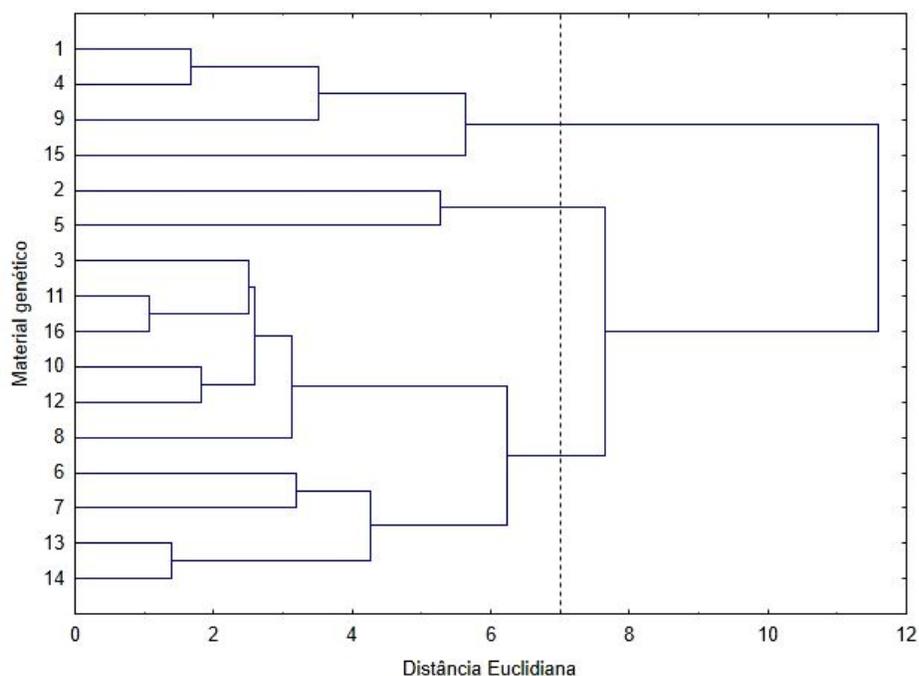
Legenda: CFIB: comprimento das fibras (mm); LFIB: largura das fibras (μm); DLFIB: diâmetro do lume das fibras; EPFIB: espessura da parede das fibras; FPFIB: Fração parede das fibras; DLVAS: diâmetro do lume dos vasos; FVAS: frequência de vasos; R. DEP: rendimento depurado da polpação; IR: índice de Runkel; CF: coeficiente de flexibilidade; IE: índice de enfiamento; IM: índice de Mulsteph. *Correlação significativa (5% de probabilidade).

As correlações significativas observadas entre a fração parede e os demais índices de qualidade das fibras ratificaram a influência da parede celular na flexibilidade e propensão ao colapso. Fibras com paredes celulares menos delgadas, com menor propensão a colapsar, indicam maior aptidão para produção de papéis classificados como tissue. De acordo com Gomes *et al.* (2015) a capacidade de absorver água é uma característica essencial para esses papéis. Além disso, os autores destacaram a importância do bulk (volume específico aparente), comprovando que fibras mais rígidas e menos refinadas têm maior dificuldade de acomodação da rede fibrosa.

Em relação às correlações entre as dimensões dos elementos celulares e o rendimento depurado da polpa marrom, não foram observadas correlações significativas. Porém, ao considerar a frequência dos elementos de vaso e o rendimento da polpa, obteve-se a correlação negativa significativa. A presença de maior número de vasos com menor diâmetro do lume pode ter dificultado a impregnação dos cavacos com o licor de cozimento, reduzindo o rendimento da polpação. Destaca-se o fato dos híbridos de *Corymbia* apresentarem, em média, menor número de elementos de vasos por área em comparação com os materiais genéticos de *Eucalyptus*. Outro destaque refere-se ao clone 2 (*E. Cloeziana*), que teve a média da frequência de vasos superior a todos os materiais genéticos avaliados, com o menor rendimento depurado.

A partir dos resultados obtidos das dimensões dos elementos celulares e índices de qualidade correlatos, com a contribuição dos valores de rendimento depurado descritos por Costa *et al.* (2022), os materiais genéticos foram agrupados de acordo com a similaridade. Os grupos formados na análise de agrupamento hierárquico aglomerativo (*Complete linkage*) são observados na Figura 3.

Figura 3 - Dendrograma para os dezesseis materiais genéticos de acordo com os valores médios das dimensões dos elementos celulares, rendimento depurado e índices de qualidade das fibras.



Obteve-se a formação de três grupos homogêneos de acordo com as características selecionadas que são relevantes para a obtenção de polpa celulósica e produção de papel. O grupo I foi formado pelos materiais genéticos 1, 4, 9 e 15, contemplando dois híbridos de *Corymbia* e dois híbridos de *Eucalyptus*. O grupo II foi formado pelos clones 2 e 5, mais especificamente por um material genético de *Corymbia* e outro de *Eucalyptus*. Em relação ao grupo III, o mais abrangente entre os três grupos formados, concentraram-se os clones 3, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14 e 16, com a presença de materiais genéticos de *Corymbia*, todos os híbridos espontâneos de *E. urophylla* e a maioria dos híbridos *tricross*, além do híbrido *E. urophylla x E. pellita*.

Na Tabela 4 são descritos os valores médios para o rendimento depurado da polpa marrom e índices de qualidade das fibras das madeiras em cada grupo de materiais genéticos.

Os valores de rendimento depurado, quando organizados em três grupos, apresentaram valores médios similares, dificultando uma indicação mais assertiva, a princípio, dos melhores materiais genéticos sob a ótica deste indicador. Desta forma, a interpretação das inter-relações entre as dimensões anatômicas das fibras, expressas em diferentes índices, são indicadas na seleção dos materiais com melhor desempenho.

Tabela 4-Valores médios para as dimensões anatômicas, rendimentos e índices de qualidade das fibras.

| Dimensões anatômicas e Índices relacionados | GRUPOS | | |
|---|----------|------|---------------------------|
| | I | II | III |
| | 1,4,9,15 | 2,5 | 3,6,7,8,10,11,12,13,14,16 |
| Rendimento depurado (%) | 52,5 | 51,9 | 52,0 |
| Fração parede das fibras (%) | 52,1 | 49,4 | 49,6 |
| Índice de Runkel | 1,09 | 0,98 | 0,99 |
| Coeficiente de flexibilidade (%) | 48,1 | 50,6 | 50,0 |
| Índice de enfeltramento | 55,0 | 47,4 | 51,4 |
| Índice de Mulsteph | 0,77 | 0,74 | 0,75 |

Em relação aos índices de qualidade das fibras, baseando-se nos critérios de classificação mencionados anteriormente, observou-se que os materiais genéticos pertencentes ao grupo I apresentaram, em média, valores superiores de fração parede e de todos os índices de qualidade das fibras, com exceção do coeficiente de flexibilidade. Ademais, todos os materiais genéticos deste grupo têm $IR > 1$ e $CF < 50$, indicando que as fibras tendem a ter menos colapso, menor intensidade de ligações interfibras e a formação de papéis menos resistentes à tração e arrebentamento. Todavia, são índices que podem qualificar essas polpas celulósicas para obtenção de papéis do tipo *tissue*. O maior índice de enfeltramento indicou que, em média, os materiais genéticos deste grupo apresentam fibras esbeltas, ou seja, mais compridas e menos largas.

Os materiais genéticos do grupo II têm valores médios desejáveis para a fabricação de papéis mais resistentes à tração e ao arrebentamento, destinados a produção de embalagens e sacarias, com destaque à menor fração parede, IR e IM e maior CF. Em relação às dimensões das fibras, observou-se que estes clones tiveram, em média, fibras 10% mais largas e diâmetro dos lumes 13% superiores em relação aos demais materiais genéticos avaliados. A presença de fibras com maior largura resultou no menor índice de enfeltramento obtido em comparação com os demais grupos.

Apesar de agrupados, foi verificado no trabalho de Costa *et al.* (2022) que o material genético de *C. torelliana* x *C. citriodora* teve 54,1% de rendimento depurado, desempenho 8,6% superior ao *E. cloeziana*, destacando-se de forma geral neste grupo.

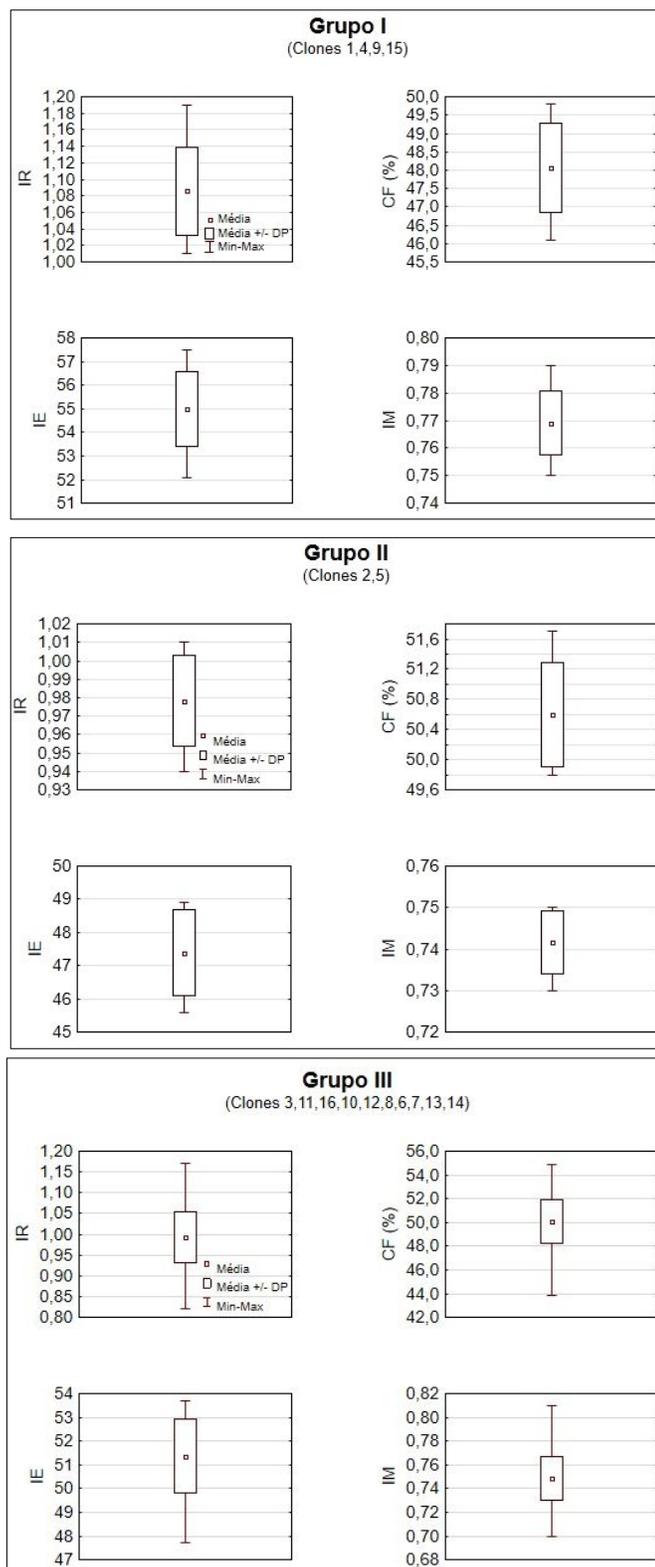
A análise dos resultados dos materiais genéticos pertencentes ao grupo III mostra que os mesmos têm, em média, características que os qualificam para a fabricação de papéis resistentes à tração, arrebentamento e ao rasgo.

Estes materiais genéticos reúnem características desejáveis para certos tipos de papéis, tais como fibras com menor fração parede e adequada flexibilidade, de acordo com os índices de Runkel, enfiamento e coeficiente de flexibilidade. Deste modo, há indicação de materiais genéticos com potencial de produção de papel principalmente destinados à sacarias.

Todavia, por se tratar de um grupo muito numeroso e com grande amplitude entre os resultados obtidos, observou-se, também, materiais genéticos com fibras com características morfológicas desejáveis para produção de papéis para impressão em escrita, por exemplo, os híbridos 6 e 7 (híbridos espontâneos de *E. urophylla*).

A Figura 4 apresenta as variações médias e os valores mínimos e máximos para cada índice de qualidade das fibras, nos três grupos obtidos.

Figura 4 - Valores médios dos Índices de Runkel, Enfeltramento, Mulsteph e Coeficiente de flexibilidade para cada grupo de materiais genéticos estabelecido na análise de agrupamento.



Os resultados obtidos decorrentes da mensuração das dimensões dos elementos anatômicos e, por consequência, dos índices de qualidade das fibras, mostraram-se eficientes na seleção preliminar dos materiais genéticos. A fração parede das fibras, por exemplo, à exceção do rendimento da polpa, apresentou correlação significativa com todos os índices qualitativos obtidos, ratificando sua importância nos estudos de melhoramento genético para os propósitos avaliados.

5. CONCLUSÕES

A classificação em grupos de materiais genéticos por meio da análise de agrupamento hierárquico demonstrou ser uma ferramenta eficaz para compreensão da variabilidade anatômica dos mesmos. Neste sentido, favoreceu a interpretação conjunta dos resultados dos índices qualitativos das fibras na predição da adequação das polpas celulósicas para fabricação de diferentes tipos de papéis.

Os materiais genéticos 1 e 4, pertencentes ao gênero *Corymbia*, o material genético 9, híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* e o material genético 15, híbrido tri-cross, pertencentes ao grupo I, tiveram maior fração parede, índice de Runkel e menor coeficiente de flexibilidade das fibras. Estas características qualificam estes materiais para produção de papéis *tissue* em função, dentre outras razões, pela menor propensão ao estabelecimento de ligações interfibras.

Em relação aos grupos II e III, houve predominância de materiais genéticos com fibras mais flexíveis, que favorecem a formação de rede fibrosa mais adensada, principalmente em função da menor fração parede e maior coeficiente de flexibilidade. Dessa forma, estes materiais genéticos têm maior propensão para produção de papéis destinados à embalagens e sacarias.

As correlações estabelecidas entre as dimensões das fibras e os respectivos índices de qualidade mostraram a importância da fração parede para os estudos de melhoramento genético com vistas a seleção de materiais genéticos para produção de diferentes papéis.

À exceção da frequência de elementos de vasos por área, as dimensões anatômicas não tiveram correlações significativas relacionadas ao rendimento depurado da polpação.

Sugere-se que a partir dos grupos de materiais genéticos estabelecidos neste estudo, outros trabalhos sejam realizados para avaliação de propriedades físico-mecânicas relevantes para o processo de fabricação e qualidade de papéis destinados à impressão e escrita, *tissue*, embalagens e sacarias.

REFERÊNCIAS

- AHMETOVIĆ, E.; KRAVANJA, Z.; IBRIĆ, N.; GROSSMANN, I. E.; SAVULESCU, L. E. State of the art methods for combined water and energy systems optimisation in Kraft pulp mills. **Optimization and Engineering**, p. 1-22, 2021.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel**. Série Divulgação PRODEPEF, Brasília, n. 13, p. 1-145, 1976.
- BEKTAS, I.; TUTUS, A.; EROGLU, H. A study of the suitability of *Calabrian pine* (*Pinus brutia* Ten.) for pulp and paper manufacture. **Turkish journal of Agriculture and Forestry**, 23: 589-599, 1999.
- BORUKANLU, M. R.; ZADEH, O. H.; MORADPOUR, P.; KHEDIVE, E. Effects of growth rate of eastern poplar trees on the chemical and morphological characteristics of wood fibers. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 6, p. 1479-1494, 2021.
- BOSCHETTI, W. T. N.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; DUDECKI, L. Características anatômicas para produção de celulose do lenho de reação de árvores inclinadas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 459-467, 2015.
- BRAWNER, J. T.; MEDER, R.; DIETERS, M.; LEE, D. J. Selection of *Corymbia citriodora* for pulp productivity. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 74, n. 2, p. 121-131, 2012.
- BURGER, M. L.; RITCHER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 151p.
- CARRILLO, I.; VIDAL, C.; ELISSETCHE, J.; MENDONÇA, R. T. Wood anatomical and chemical properties related to the pulpability of *Eucalyptus globulus*: a review. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 80, n. 1, p. 1-8, 2018.
- COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. **Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015.
- COSTA, M. M. C.; NOGUEIRA, T. A. P. C.; BITTENCOURT, R. C.; SILVA, W. H. M.; SILVA, L. S.; ALMEIDA, R. F.; SANTOS, G. A.; PENA, C. A. A. Assessment of industrial performance for market pulp production between *Eucalypt* and *Corymbia* hybrids clones. **Revista Árvore**, v. 46, 2022.
- COUTO, A. M.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ALMEIDA, D. P. Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical-mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, v. 34, n. 2, p. 531-538, 2023.
- CRUZ, T. M.; FARIA, R. S.; DUARTE, P. J.; MASCARENHAS, A. R. P.; BORGES, C. C.; MENDES, L. M.; CRUZ, C. R. Propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio no nordeste do Brasil. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 7, n. 2, p. 203-211, 2021.

DADSWELL, H. E.; WARDROP, A. B. Growing trees with wood properties desirable for paper manufacture. **Appita**, v. 12, n. H. 4, p. 129-129, 1959.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt wood. **CSIRO Forest Products Laboratory**, Melbourne, n.66, p.1-28, 1972.

EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; DELLA LUCIA, R. M.; LOBO, L. M.; SOUZA, M. O. A. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* ST Blake no sentido radial e longitudinal. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 1, n. 2, p.1-19, 2010.

FOELKEL, C. Aspectos práticos e conceituais sobre a fabricação de celulose de mercado do tipo kraft branqueada a partir de madeira de eucalipto. **Eucalyptus Online Book and Newsletter**, 2013.

GANESH, B. N.; REKHA, B. Arquitetura de fibras celulósicas intrínsecas e seu efeito nas propriedades mecânicas de compósitos híbridos. **Arquivos de Engenharia Civil e Mecânica**, 20: 1-12. 2020.

GOMES, V. J.; JUNIOR, D. L.; COLODETTE, J. L.; RIBEIRO, R. A.; BRAUN, H. Influência do conteúdo de xilanas na branqueabilidade, propriedades higroscópicas, físico-mecânicas e óptica de polpas branqueadas de eucalipto. **Química Nova**, v. 38, p. 221-226, 2015.

GOUVEA, A. F. G.; GOMES, C. M.; MATOS, L. M.; SOUZA, T. A.; KUMABE, F. J.; BENITES, P. K. R. M. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose kraft. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 3, n. 2, p. 102-115, 2012.

GUIMARÃES JUNIOR, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 11, n. 7, p. 442-456, 2010.

HARTONO, R.; FARIZKY, F.; SUTIAWAN, J.; SUMARDI, I.; SUHESTI, E. Fiber quality of betung bamboo (*dendrocalamus asper*) from forest area with special purpose (fasp) Pondok Buluh, Simalungun, North Sumatera. In: **IOP conference series: earth and environmental science**. IOP publishing, p. 012085, 2022.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C. B.; SEBBENN, A. M.; FILHO, M. T.; MORAES, M. L. T.; MORI, E.S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 105-113, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2023**. Disponível em: iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf. Acesso em: 23 nov. 2023.

JARDIM, J. M.; GOMES, F. J. B.; COLODETTE, J. L.; BRAHIM, B. P. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **Revista O papel**, v. 78, n. 11, p. 122-129, 2017.

KIAEI, M.; TAJIK, M.; VAYSI, R. Chemical and biometrical properties of plum wood and its application in pulp and paper production. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 16, n. 3, p. 313-322, 2014.

KIEN, N. D.; QUANG, T. H.; JANSSON, G. HARWOOD, C.; CLAPHAM, D.; ARNOLD, S. V. Teor de celulose como característica de seleção no melhoramento para produção de polpa kraft em *Eucalyptus urophylla*. **Annals of Forest Science**, v. 66, n. 7, pág. 1-8, 2009.

MELO, L. E. L.; DA SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; NASCIMENTO, D. F. R. Influência do material genético e posição radial na estrutura anatômica e densidade básica das madeiras de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 611-621, 2016.

MENDOZA, Z. M. S. H.; OLIVEIRA, J. K.; BORGES, P. H. M.; MORAIS, P. H. M. Índices de qualidade das fibras de *Tectona grandis* Linn. F. em função da sua massa específica básica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 55535-55553, 2021.

MILANEZ, A. F.; ROST, E. M. Antena Tecnológica: Tissue Paper. **Relatório técnico**, 2005. Disponível em: https://www.academia.edu/27474834/Tissue_Paper_Revis%C3%A3o_tecnol%C3%B3gica. Acesso em: 13 mar. 2024.

MIRANDA, M. C; CASTELO, P. A. R. Avaliações anatômicas das fibras da madeira de *Parkia gigantocarpa* Ducke. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 3, n. 2, 2012.

NISGOSKI, S.; MUNIZ, G. I. B.; TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; VENSON, I. Wood anatomical characteristics and paper resistance index of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake from experimental plant. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 203-211, 2012.

PAULINO, P. S.; LIMA, I. L. Densidade básica e dimensões celulares da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla*, aos oito anos de idade. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 9, n. 1, 2018.

PEGO, M. F.; BIANCHI, M. L.; VEIGA, T. R. L. A. Avaliação das propriedades do bagaço de cana e bambu para produção de celulose e papel. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, 2019.

PIRRALHO, M.; FLORES, D.; SOUSA, V.B.; QUILHO, T.; KNAPIC, S.; PEREIRA, H. Evaluation on paper making potential of nine *Eucalyptus* species based on wood anatomical features. **Industrial Crops and Products**, v. 54, p. 327-334, 2014.

RIBEIRO, R. A.; COLODETTE, J. L.; VAZ JÚNIOR, S. Effect of residual effective alkali on *eucalyptus* kraft pulp yield and chemistry. **CERNE**, v. 24, n. 4, p. 408-419, 2018.

RIKI, J. T. B.; SOTANNDE, O. A.; OLUWADARE, A. O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production: A review. **Journal of Research in forestry, wildlife and environment**, v. 11, n. 3, p. 358-368, 2019.

RUSCH, F.; CEOLIN, G. B.; HILLIG, E. Morphology, density and dimensions of bamboo fibers: a bibliographical compilation. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e55007, 2019.

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

SETTE JR, C. R.; OLIVEIRA, I. R.; FILHO, M. T.; YAMAJY, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 36, p. 1183-1190, 2012.

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; GOMIDE, J. L.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MORI, F. A.; GOMES, D. F. F. Clones de *Eucalyptus* versus a produção de polpa celulósica. **Ciência Florestal**, v. 15, p. 145-155, 2005.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: **HILLEL, D., ed. Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980.

WASTOWSKI, A. D. **Química da madeira**. Interciência, 2018. 567p.

APÊNDICE A - Valores individuais de rendimento depurado e índice de qualidade das fibras obtidos para os dezesseis materiais genéticos.

| MATERIAL GENÉTICO | RENDIMENTO DEPURADO DA POLPAÇÃO ^(*) E ÍNDICE DE QUALIDADE DAS FIBRAS | | | | | |
|-------------------|---|--------|------|--------|------|------|
| | RD (%) | FP (%) | IR | CF (%) | IE | IM |
| 1 | 52,5 | 51,6 | 1,06 | 48,8 | 54,8 | 0,76 |
| 2 | 49,8 | 49,8 | 0,99 | 50,2 | 47,1 | 0,75 |
| 3 | 51,6 | 50,2 | 1,05 | 48,2 | 50,9 | 0,77 |
| 4 | 53,5 | 50,6 | 1,02 | 49,4 | 54,3 | 0,76 |
| 5 | 54,1 | 49,0 | 0,96 | 51,0 | 47,6 | 0,74 |
| 6 | 52,7 | 48,8 | 0,95 | 51,4 | 53,0 | 0,74 |
| 7 | 53,6 | 46,4 | 0,90 | 51,9 | 51,3 | 0,73 |
| 8 | 53,8 | 50,7 | 1,03 | 49,4 | 51,4 | 0,76 |
| 9 | 53,2 | 52,6 | 1,11 | 47,2 | 55,1 | 0,78 |
| 10 | 51,1 | 50,8 | 1,04 | 48,8 | 51,9 | 0,76 |
| 11 | 51,1 | 50,1 | 1,01 | 49,9 | 51,9 | 0,75 |
| 12 | 52,5 | 51,0 | 1,04 | 48,8 | 52,2 | 0,76 |
| 13 | 50,9 | 48,8 | 0,95 | 51,2 | 49,8 | 0,74 |
| 14 | 51,9 | 49,4 | 0,98 | 50,5 | 49,5 | 0,74 |
| 15 | 50,8 | 53,7 | 1,15 | 46,9 | 55,9 | 0,78 |
| 16 | 51,1 | 49,7 | 0,99 | 50,3 | 51,8 | 0,75 |

RD: rendimento depurado da polpação ^(*)(Costa *et al.*, 2022); FP: Fração parede das fibras; IR: índice de Runkel; CF: coeficiente de flexibilidade; IE: índice de enfieltramento; IM: índice de Mulsteph.

CONCLUSÕES GERAIS

Os estudos realizados por meio das análises químicas, físicas e anatômicas das madeiras dos dezesseis materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. evidenciaram que houve diferenças significativas entre os gêneros para todas as finalidades avaliadas, com formação de grupos distintos. Essas diferenças foram identificadas, por exemplo, nas análises de agrupamento dos materiais genéticos, sejam para produção de energia, carvão vegetal, obtenção de polpa celulósica para fabricação de papéis, assim como nos balanços das emissões dos gases do efeito estufa.

Na avaliação da influência das principais variáveis investigadas para produção de carvão vegetal, por meio da utilização da ACP, as madeiras de *Eucalyptus* tiveram, em média, maiores teores de lignina total, relação C/A, rendimento gravimétrico em carvão vegetal, porém, com carvões mais friáveis. Os híbridos de *Corymbia*, destacaram-se, por terem, em média, madeiras mais densas, maiores teores de extrativos e cinzas, carvões com maior densidade aparente e a granel, sendo menos friáveis.

Os materiais genéticos de *C. citriodora* x *C. torelliana*, especificamente os clones 1, 4 e 5, destacaram-se pela eficiência na conversão de lenha em calor e eletricidade e também nos balanços de emissões dos GEE. Individualmente, o clone 4 teve resultado geral superior aos demais dado que destacou-se, principalmente, na produção de carvão vegetal, com maior massa de carvão vegetal por forno e massa de carbono fixo por hectare.

Dentre os materiais genéticos de *Eucalyptus*, para fins de geração térmica/elétrica e produção de carvão vegetal, destacou-se o clone 2 (*E. cloeziana*). Os híbridos tri-cross, clones 10 e 15, destacaram-se por apresentar maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, lignina total e densidade aparente do carvão vegetal.

Os materiais genéticos de *Corymbia* e *Eucalyptus* tiveram indicação para produção de polpa celulósica para diferentes tipos de papéis e foram distribuídos nos três grupos estabelecidos na análise de agrupamento, baseados nas relações entre as variáveis morfológicas das fibras. Houve indicação de materiais genéticos mais propensos para produção de polpas celulósicas destinadas à fabricação de papéis onde é requisitado maior bulk, maciez e absorção, como nos papéis tissue (clones 1, 4, 9 e 15) e os demais com indicação para produção de papéis mais resistentes à tração, arrebentamento e rasgo, principalmente àqueles destinados para embalagens e sacarias.

De acordo com as finalidades propostas para os quatro Capítulos (produção de energia térmica e elétrica, carvão vegetal, balanço de emissões dos GEE, obtenção de polpa celulósica

para produção de papéis), três dentre os quatro clones avaliados pertencentes ao gênero *Corymbia* spp. tiveram resultado geral superior, considerando-se todos os dezesseis materiais genéticos estudados.

Além das propriedades avaliadas neste estudo, são sugeridas avaliações que considerem o desempenho reprodutivo dos materiais genéticos no viveiro, plantios em localidades com diferentes condições de solo/clima, avaliação da resistência aos principais fatores bióticos e abióticos que prejudicam o crescimento das árvores, incidência de kinos na madeira, tortuosidade dos troncos e propensão ao desprendimento da casca.