

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Incremento da idade da árvore na qualidade da madeira de clones superiores de *eucalyptus* e híbrido de *corymbia* para produção de carvão vegetal

Sherellyn Daphnee Alves Moretti
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

SHERELLYN DAPHNEE ALVES MORETTI

Incremento da idade da árvore na qualidade da madeira de clones superiores de *eucalyptus* e híbrido de *corymbia* para produção de carvão vegetal

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

Orientadora: Angelica de C. O. Carneiro

Coorientadora: Ana M. M. Ladeira
Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

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

T

M845i
2023
Moretti, Sherellyn Daphnee Alves, 1994-
Incremento da idade da árvore na qualidade da madeira de clones superiores de *Eucalyptus* e híbrido de *Corymbia* para produção de carvão vegetal / Sherellyn Daphnee Alves Moretti. – Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (73 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2023.

Referências bibliográficas: f. 64-73.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.245>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Melhoramento genético. 2. Eucalipto - Colheita. 3. Carvão vegetal. I. Carneiro, Angélica de Cássia Oliveira, 1974-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.916541

SHERELLYN DAPHNEE ALVES MORETTI

Incremento da idade da árvore na qualidade da madeira de clones superiores de *eucalyptus* e híbrido de *corymbia* para produção de carvão vegetal

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

APROVADA: 19 de julho de 2023.

Assentimento:

Sherellyn Daphnee Alves Moretti
Autora

Angelica de Cassia Oliveira Carneiro
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 26/05/2025 às 08:32:58 e pela orientadora em 26/05/2025 às 13:41:34. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **GKKV.JBAD.MV30** e clique no botão 'Validar documento'.

Ao meu pai, Wilton Donizetti Moretti (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À minha orientadora, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, obrigada por todo apoio, confiança e oportunidade de realizar este trabalho. Agradeço também pela paciência.

À minha coorientadora, Ana Márcia M. Ladeira Carvalho, pelo apoio e auxílio nesta pesquisa, principalmente, na realização das análises químicas feitas no Laboratório de Celulose e Papel (LCP).

Aos técnicos, estagiários e colegas do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), em especial a Fernanda, Lawrence, Edna, Bárbara e Wagner.

Aos técnicos e estágios do Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) pela ajuda nas análises anatômicas, principalmente a Leila Lopes.

Aos colegas da pós-graduação, Bruna e Frances, obrigada por todo o apoio e amizade de vocês.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) pelo comprometimento com a ciência e o conhecimento transmitido.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, especialmente ao Alexandre.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa Aperam pelo fornecimento do material e apoio financeiro ao projeto, e a Lilian Alves pela parceria.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite e pelas contribuições.

À minha família, minha mãe e irmão, Mayara e Giuseppe por todo apoio e amor.

Obrigada.

“Não tenho certeza de nada, mas a visão das estrelas me faz sonhar.”
- Vincent Van Gogh

RESUMO

MORETTI, Sherellyn Daphnee Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Incremento da idade da árvore na qualidade da madeira de clones superiores de *eucalyptus* e híbrido de *corymbia* para produção de carvão vegetal.** Orientadora: Angelica de Cassia Oliveira Carneiro. Coorientadora: Ana Marcia Macedo Ladeira Carvalho.

Os *tri-cross* são cruzamentos entre três diferentes espécies de eucaliptos e podem proporcionar maior crescimento e produtividade do que clones simples, essa característica aliada as inovações implantadas em povoamentos florestais juntamente com o uso de rotações mais curtas auxiliam na obtenção de matéria prima para siderurgia em quantidade e qualidade para atender o setor energético do país. O gênero de *Corymbia* também tem sido apontado como uma excelente opção para atender esta demanda, devido suas propriedades físicas e químicas, como densidade básica e teor de extrativos. No entanto, as informações sobre o *tri-cross* e o *Corymbia* ainda são incipientes quando comparadas aos híbridos de *Eucalyptus* utilizados comercialmente. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da idade técnica da colheita de árvores de genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade da madeira, visando a produção de carvão vegetal para abastecimento da indústria de ferro gusa e ligas metálicas. Foram utilizados cinco genótipos em três idades, cinco, seis e sete anos, e de cada árvore foram retirados seis discos de 5 cm de espessura, correspondentes a 0%, DAP (diâmetro à altura do peito), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. Da madeira, determinou-se a relação cerne/alburno, as propriedades anatômicas, densidade básica e propriedades químicas. Realizou-se também, carbonizações em mufla, visando a caracterização dos carvões vegetais, a partir da densidade relativa aparente, análise química imediata, friabilidade e poder calorífico superior. De acordo com os resultados, a idade influenciou no aumento da densidade básica da madeira, relação cerne/alburno e teor de material volátil, enquanto reduziu os teores de cinzas da madeira e carvão vegetal. O clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* poderia ter sua idade de corte reduzida para cinco anos visto que atingiu o recomendado pela indústria siderúrgica de densidade básica acima de 500 kg m^{-3} e a partir dos seis anos o clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* (*tri-cross*) também poderia ser recomendado. O clone *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* atingiu densidade básica recomendada para produção de carvão vegetal na idade de sete anos. Pode-se concluir que o clone com maior potencial para produção de carvão vegetal voltado para indústrias siderúrgicas é o *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* com sete anos de idade por apresentar maior densidade básica

e maior densidade aparente de carvão vegetal.

Palavras-chave: Ciclo de corte; Pirólise; Relação S/G; Cristalinidade; melhoramento genético

ABSTRACT

MORETTI, Sherellyn Daphnee Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Increment of tree age on wood quality of superior *eucalyptus* clones and *corymbia* hybrid for charcoal production.** Adviser: Angelica de Cassia Oliveira Carneiro. Co-adviser: Ana Marcia Macedo Ladeira Carvalho.

Tri-crosses are crosses between three different species of eucalyptus and can provide greater growth and productivity than single clones. This characteristic, combined with innovations implemented in forest stands and the use of shorter rotations, helps to obtain raw material for the steel industry in quantity and quality to meet the needs of the country's energy sector. The *Corymbia* genus has also been identified as an excellent option to meet this demand, due to its physical and chemical properties, such as basic density and extractive content. However, information on tri-crosses and *Corymbia* is still incipient when compared to commercially used *Eucalyptus* hybrids. The objective of this study was to evaluate the effect of the technical age of harvesting trees of *Eucalyptus* and *Corymbia* genotypes on wood quality, aiming at the production of charcoal to supply the pig iron and metal alloy industries. Five genotypes were used at three ages, five, six and seven years, and six 5 cm thick discs were removed from each tree, corresponding to 0%, DBH (diameter at breast height), 25%, 50%, 75% and 100% of the commercial height of the trunk. The heartwood/sapwood ratio, anatomical properties, basic density and chemical properties were determined from the wood. Carbonization in a muffle furnace was also carried out to characterize the charcoals, based on apparent relative density, immediate chemical analysis, friability and superior calorific value. According to the results, age influenced the increase in the basic density of the wood, heartwood/sapwood ratio and volatile material content, while reducing the ash and charcoal contents of the wood. The *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* clone could have its cutting age reduced to five years since it reached the recommended basic density by the steel industry of over 500 kg m⁻³ and from six years onwards the *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* clone could also be recommended. The *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* clone reached the recommended basic density for charcoal production at age seven. It can be concluded that the clone with the greatest potential for charcoal production for the steel industry is the seven-year-old *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* because it has a higher basic density and higher apparent density of charcoal.

Keywords: Cutting cycle; Pyrolysis; S/G ratio; Crystallinity; Genetic

improvement

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. OBJETIVO | 14 |
| 2.1. Objetivo geral | 14 |
| 2.2. Objetivos específicos | 14 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1. Produção de carvão vegetal | 15 |
| 3.2. Taxa de crescimento | 16 |
| 3.3. Idade de corte das árvores | 19 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 4.1. Preparo de Amostras..... | 23 |
| 4.2. Propriedades da madeira..... | 24 |
| 4.3. Propriedades Anatômicas da Madeira | 24 |
| 4.3.1. Relação cerne/alburno (C/A)..... | 24 |
| 4.3.2. Análise morfológica de fibras e poros..... | 25 |
| 4.4. Propriedades Químicas da Madeira | 26 |
| 4.4.1. Composição química elementar | 26 |
| 4.4.2. Composição química estrutural | 26 |
| 4.4.3. Relação siringil/guaiacil (S/G) | 27 |
| 4.4.4. Cristalinidade da celulose..... | 27 |
| 4.5. Carbonização da Madeira | 28 |
| 4.7 Estimativa da massa de carvão vegetal | 28 |
| 4.6. Propriedades do carvão vegetal | 29 |
| 4.7. Análise estatística | 29 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |
| 5.1. Efeito da idade de colheita nas propriedades da madeira e do carvão vegetal..... | 31 |
| 5.1.1. Análise de componentes principais | 31 |
| 5.1.2. Propriedades anatômicas da madeira..... | 33 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.1.3. | Densidade básica da madeira..... | 37 |
| 5.1.4. | Poder calorífico superior | 38 |
| 5.1.5. | Relação cerne/alburno (C/A)..... | 40 |
| 5.1.6. | Composição química elementar | 41 |
| 5.1.7. | Composição química estrutural | 45 |
| 5.1.8. | Relação siringil/guaiacil (S/G) | 50 |
| 5.1.9. | Índice de cristalinidade da celulose | 51 |
| 5.1.10. | Rendimento gravimétrico em carvão vegetal | 53 |
| 5.1.11. | Estimativa da massa de carvão vegetal..... | 61 |
| 5.1.12. | Densidade aparente do carvão vegetal..... | 54 |
| 5.1.13. | Teor de finos do carvão vegetal..... | 55 |
| 5.1.14. | Poder calorífico superior do carvão vegetal | 57 |
| 5.1.15. | Teor de cinzas do carvão vegetal..... | 58 |
| 5.1.1. | Carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal..... | 60 |
| 6. | CONCLUSÕES..... | 63 |
| 7. | Referencias bibliográficas..... | 64 |

1. INTRODUÇÃO

Os plantios florestais utilizados para suprir a demanda de biomassa energética, são conceituados como florestas energéticas. Estes plantios utilizam inovações e avanços no melhoramento genético florestal para conseguirem matéria prima em quantidade e qualidade para atender o setor energético, principalmente fazendo uso de rotações mais curtas (MOSIEJ et al., 2012; PRATIWI et al., 2024) .

As espécies do gênero *Eucalyptus* são destaques entre as diversas opções para se obter biomassa florestal. Isto se deve aos ganhos obtidos pelo melhoramento genético dessas espécies ao longo dos anos, além das tecnologias de implantação e condução dos povoamentos (MOLINARI et al., 2023).

Vale salientar que a utilização de clones superiores de *Eucalyptus*, como os tri-cross “*three-way-cross*”, pode proporcionar melhores resultados em florestas energéticas, já que são formados pelo cruzamento entre três diferentes espécies de eucaliptos, o que proporciona maior heterose, ou seja, maior crescimento, resistência e produtividade do que os clones de cruzamentos simples. Essa característica é favorável para produção de madeira e carvão vegetal de alta qualidade. Estes clones têm sido frequentemente avaliados pois podem melhorar significativamente a eficiência e a qualidade da produção do carvão vegetal e contribuir para práticas mais sustentáveis (SANTOS et al., 2013a).

Mais recentemente o gênero de *Corymbia* também tem sido apontado como uma excelente matéria prima para produção de carvão vegetal, considerando suas propriedades físicas e químicas, como densidade básica, teor de extrativos e concentração de lignina (LOPES et al., 2023).

As madeiras destes gêneros são utilizadas para fins energéticos, na forma de lenha e cavaco, ou transformada em carvão vegetal. No Brasil, o carvão vegetal é utilizado principalmente no uso industrial e residencial, sendo que, aproximadamente 83% da sua produção é destinada às indústrias siderúrgicas, usados para fornecer carbono para as reações de redução, energia na forma de calor, sustentar a carga de minério de ferro e permitir a percolação gasosa do leito (EPE, 2022; PROTÁSIO et al., 2021b; SILVA; ATAÍDE, 2019). Apesar da escala de utilização, as informações sobre a qualidade da madeira e carvão vegetal dos tri-cross e clones de *Corymbia* ainda são insuficientes quando comparadas com os híbridos de *Eucalyptus* utilizados comercialmente.

A seleção destes clones para produção de carvão vegetal é comumente realizada a partir dos valores dendrométricos e não assegura a seleção de genótipos com características tecnológicas desejadas para a siderurgia, portanto, além das características de crescimento a

qualidade da madeira também deve ser estudada, a fim de identificar espécies com propriedades adequadas para a cogeração de energia (LOPES et al., 2017; MASSUQUE et al., 2022). É importante ressaltar que a qualidade da madeira, ou seja, as propriedades físico e químicas da madeira vão influenciar diretamente no rendimento, conversão e qualidade energética, assim como a idade do material (LOPES et al., 2023).

A densidade básica da madeira, por exemplo, influencia na quantidade de energia armazenada por unidade de volume, portanto o ideal é selecionar madeiras com alta densidade básica. Assim como, os extrativos do tipo fenólico influenciam no poder calorífico superior e rendimento gravimétrico do carvão vegetal (CARNEIRO et al., 2017a; LOPES et al., 2023). Enquanto a idade do material influencia tanto na composição química, física e anatômica, pois durante seu envelhecimento ocorrem diversas modificações em suas estruturas (CANAL et al., 2020b).

A seleção e o melhoramento genético dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* são áreas promissoras para aumentar a produtividade e a qualidade do carvão vegetal produzido no Brasil. Estas pesquisas contribuem para práticas mais sustentáveis e eficientes na indústria florestal e aperfeiçoam a produção de carvão vegetal.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito da idade de colheita de árvores de genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade da madeira, visando a produção sustentável de carvão vegetal para abastecimento da indústria de ferro gusa e ligas metálicas.

2.2. Objetivos específicos

Obter as propriedades anatômicas, físicas e químicas das madeiras dos genótipos de clones elites de *Eucalyptus* e híbrido de *Corymbia* para produção de carvão vegetal em função da idade de corte.

Avaliar o efeito da idade de colheita na relação S/G, composição química estrutural e elemental e índice de cristalinidade da celulose de genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia* e suas correlações com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Obter a degradação térmica das madeiras e estabelecer suas relações com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, de modo, a subsidiar o planejamento florestal e obtenção do $IMA_{\text{carvão vegetal}}$.

Avaliar o efeito do genótipo e da idade de colheita das árvores no rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Indicar os genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia* com o maior potencial para produção de carvão vegetal em função da idade de corte da árvore.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Produção de carvão vegetal

O carvão vegetal é um dos produtos obtidos por meio da carbonização da madeira, conhecido como pirólise lenta. A carbonização consiste em submeter a madeira a um processo térmico em ambiente com ausência total ou parcial de oxigênio (DELATORRE et al., 2020).

Esse processo ocorre com temperaturas acima de 300 °C, onde é retirado a umidade e os materiais voláteis da madeira obtendo-se três produtos, a fração líquida composta por licor pirolenhoso e alcatrão; a fração gasosa composta por gases não condensáveis, como monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e metano; e a fração sólida que consiste no carvão vegetal (BRIDGWATER, 2012; FORNES; BELDA; LIDÓN, 2015; MOISÉS et al., 2019).

A qualidade do carvão vegetal é influenciada pelo tipo de forno utilizado, espécie e características física e química da madeira, e a relação entre temperatura e tempo (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019), sendo que estes dois últimos devem estar em sintonia (SIEBENEICHLER et al., 2017).

Os tipos de fornos variam principalmente em sua capacidade de produção (m³), materiais usados na construção, número de chaminés, mecanização, níveis de controle do processo e fonte de calor utilizada (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019). Quanto ao material utilizado na construção eles podem ser de alvenaria, metálicos ou híbridos.

Quanto aos fornos de alvenaria, Ribeiro et al. (2020) destacaram três tipos de fornos, os fornos de encosta, rabo-quente e os fornos de superfície (circular). Os fornos de encosta utilizam um talude de apoio para suas paredes. Este tipo de forno necessita de maior tempo de resfriamento devido ao isolamento térmico do talude, é de difícil mecanização e controle das emissões de gases e possui rendimento gravimétrico em torno de 30% (RIBEIRO et al., 2020).

Os fornos do tipo “rabo-quente” são construídos de alvenaria e barro, possuem entrada de ar, popularmente chamado de “tatus”, localizados na base do forno para combustão parcial da lenha. Na cúpula do forno estão as saídas de fumaça, as “baianas”, usadas pelo carbonizador para controlar o processo de carbonização de forma empírica, a partir da coloração da fumaça. Este forno possui rendimento gravimétrico próximo de 26% (RIBEIRO et al., 2020).

Os fornos de superfície geralmente possuem de uma a seis chaminés, utilizadas para eliminar os gases e melhorar as condições térmicas do forno, podem possuir uma ou duas portas. Sua estrutura possibilita maior controle da carbonização, o que resulta em um rendimento gravimétrico maior do que os fornos anteriores, entre 28 e 34% (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

Outro tipo de forno utilizado no Brasil, são os fornos retangulares, sua construção é realizada de concreto armado e alvenaria. Este tipo de forno é comumente utilizado por grandes empresas por possuir uma capacidade volumétrica que varia de 150 a 550 metros cúbicos (m³), o que permite a mecanização das atividades de carregamento e descarregamento. Estes fornos possuem um rendimento gravimétrico entre 30 e 35% (LEME et al., 2018; RAMOS et al., 2023).

Em relação a material prima, o carvão vegetal poder ser produzido a partir de quase todas as biomassas lignocelulósicas, apesar de nem todas resultarem em carvão vegetal com propriedades adequadas, principalmente para fins industriais. O Brasil, diferentemente dos demais países, produz quase todo o seu carvão vegetal a partir de matéria-prima sustentável proveniente de plantios homogêneos de eucalipto (BICHEL; TELLES, 2021; KUMAR; GUNJAL; CHAUHAN, 2021).

Os plantios florestais totalizaram 9,93 milhões de hectares em 2022, sendo 7, milhões de hectares cultivados com *Eucalyptus*, enquanto o gênero de *Corymbia* se constituem em áreas de pequenos e médios produtores rurais (IBÁ, 2023; REIS; ASSIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2013). Os plantios de *Eucalyptus* contribuíram com 94% da produção de carvão vegetal (IBÁ, 2023).

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado nas indústrias, sendo este um dos redutores energéticos mais importantes para as indústrias siderúrgicas. O principal polo de consumo de carvão vegetal do Brasil encontra-se no estado de Minas Gerais, com mais de 45% das empresas (CACHOEIRA et al., 2019). No ano de 2021, quase 23% da produção de ferro gusa da indústria siderúrgica foi a partir de carvão vegetal, enquanto o restante utilizou-se insumo não renovável (carvão mineral) importado (SINDIFER, 2022).

3.2. Taxa de crescimento

A árvore durante o seu crescimento produz diferentes tipos de tecido lenhoso, chamados de madeira juvenil e madeira adulta. A madeira juvenil é o xilema secundário, que se forma pelo meristema cambial imaturo nos primeiros anos de crescimento da árvore, período chamado de juvenilidade (LUBE et al., 2013). A madeira juvenil localiza-se no centro da árvore e ao redor da medula, presente da base até o topo da árvore, com parte de albúrnio ou cerne o que vai variar conforme a espécie e a idade da árvore, enquanto a madeira adulta é o xilema formado após o período de juvenilidade, localizado próximo à casca (GATTO et al., 2008; LUBE et al., 2013).

Os dois lenhos têm características anatômicas, químicas, físicas e mecânicas diferenciadas. A madeira juvenil, de modo geral, tem células de xilema mais curtas, ângulo de microfibrila da camada S₂ maior, paredes secundárias mais finas e menor densidade de vasos, o que a deixa mais flexível para se curvar com a ação do vento sem se quebrar (VIDAURRE et al., 2011). O lenho adulto detém menor ângulo de microfibrila, paredes secundárias mais espessas, e conseqüentemente mais rigidez devido a maior carga mecânica. Geralmente, suas células alcançaram as dimensões máximas e se mantem constantes (PALMA; LEONELLO; BALLARIN, 2010).

Essa madeira quando formada pode ser visualmente dividida em duas regiões distintas, o albúrnio e o cerne. O albúrnio é a área do xilema ativo que conduz água das raízes para as folhas e o cerne é a região mais interna do tronco, que deixou de conduzir água. A atividade cambial que forma a madeira e a taxa de crescimento da árvore são fortemente afetadas pela temperatura, precipitação, espaçamento de plantio e idade, a variação destes fatores resulta em madeiras com propriedades diversas (VIDAURRE et al., 2011).

A temperatura quando muito baixa (< 15 °C) restringe a fotossíntese, a divisão e a expansão celular, conseqüentemente limita a taxa de crescimento (LOCOSSELLI et al., 2020). O estresse causado pela temperatura está relacionado com o aumento da taxa de respiração da planta e redução na captura de carbono durante a fotossíntese. Isto é resultado do aumento do déficit de pressão de vapor d'água, o que causa o fechamento do estômato e leva a morte da planta pela falta de carbono. O crescimento de uma planta pode aumentar até 12% para cada 7 °C aumentado na temperatura média anual (CLARK; CLARK; OBERBAUER, 2013; SLOT; WINTER, 2016). O mesmo ocorre com o estresse hídrico, onde devido à baixa disponibilidade de água ocorre o fechamento dos estômatos, com a diminuição das trocas gasosas e fotossíntese acontece a redução de fixação de carbono para formação de novas células, o que resulta na diminuição do crescimento da planta (ALMEIDA et al., 2020; PARRY, 2002).

O espaçamento exerce efeitos perceptíveis no crescimento em diâmetro e altura das árvores, sendo que espaçamentos mais adensados resultam em maiores valores de área basal e volume do povoamento, enquanto espaçamentos menos adensados são associados a maiores valores de diâmetro e altura das árvores (OLIVEIRA NETO et al., 2003; TIENNE et al., 2009). As dimensões das árvores são os principais fatores que influenciam no desenvolvimento do cerne, isso foi constatado em alguns estudos em que árvores cultivadas em maiores densidades, ou seja, com menor espaçamento, resultam em menor proporção de cerne no lenho. Portanto, árvores de maiores diâmetros terão uma proporção maior de cerne (GOMINHO; PEREIRA, 2005; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009).

A idade tem efeito importante na estrutura das células cambiais e seus derivados, as fusiformes e as iniciais do raio. Árvores jovens são compostas majoritariamente por madeira juvenil que possui maior ângulo microfibrilar (AMF), uma importante característica anatômica da madeira que influencia em propriedades como resistência mecânica, rigidez e a estabilidade dimensional. Durante a idade juvenil a taxa de incorporação de biomassa é crescente, assim como o aumento da densidade básica e comprimento das fibras até se estabilizarem na idade adulta. A principal forma de reduzir a quantidade e o efeito da madeira juvenil é alterar a idade de colheita (ZOBEL; BUIJTENEN, 1989).

A porção de lenho juvenil/adulto é determinante em diversas características da madeira, como a densidade, a relação cerne/alburno e as propriedades químicas. A densidade básica é uma das propriedades da madeira comumente utilizadas como parâmetro de qualidade, no entanto, é um parâmetro de alta variabilidade, pois varia no sentido radial e longitudinal de uma árvore, além disso, varia entre as árvores de mesma espécie e espécies diferentes. A densidade tende a aumentar com o amadurecimento da árvore, como consequência do aumento da espessura de parede celular e redução da frequência dos elementos de vasos, ou a diminuir com altas taxas de crescimento ocasionadas por alterações no clima ou índice de sítio (SETTE JUNIOR et al., 2010; VITAL, 1984).

A relação cerne/alburno determina a ocorrência do tipo predominante de madeira e afeta a sua secagem, que é a etapa inicial da produção de carvão vegetal. A região do cerne é mais impermeável, consequência da obstrução dos vasos por tilos ou presença de extrativos, pois a passagem de água da parte mais interna para a mais externa da madeira é dificultada. O alburno é mais permeável e promove uma secagem mais rápida. Geralmente, a relação cerne/alburno tende a diminuir no sentido longitudinal da árvore (base-topo), isso ocorre devido a formação de novas camadas no lenho, o que resulta em maior proporção de madeira jovem nas posições mais altas do tronco. A formação do cerne acompanha a idade da árvore, sendo sua porcentagem maior onde o lenho é mais velho, ou seja, na base da árvore (COSTA et al., 2017; PEREIRA et al., 2013c).

Quimicamente, a madeira juvenil por apresentar menor densidade, traqueídeos mais curtos e paredes celulares mais finas possui maior teor de celulose e hemicelulose e menor teor de lignina (FROMM, 2013; ZOBEL; BUIJTENEN, 1989), com tendência de redução de celulose e hemiceluloses à medida que a idade aumenta, pois ocorre diminuição da proporção de madeira juvenil com o envelhecimento da árvore (ZOBEL; BUIJTENEN, 1989), o aumento do teor de lignina é decorrente do processo de lignificação. Quanto ao teor de extrativos, ocorre o aumento em função da idade do material lenhoso, justificado pelo início do processo de

cernificação, no qual ocorre a transformação do material de reserva em extrativos e a formação do cerne. Este processo é caracterizado pela morte de células e alterações na constituição química.

3.3. Idade de corte das árvores

As empresas de base florestal determinam a idade de corte da árvore com base na produtividade volumétrica do povoamento e não consideram a variação na qualidade da madeira em função da idade da floresta. Isso, pois, durante o crescimento da árvore ocorre diversas mudanças nas propriedades da madeira (CARNEIRO et al., 2014). Estas mudanças ocorrem devido alterações fisiológicas e alteram a qualidade da madeira e de seus produtos.

Quando a idade de colheita da floresta não é padronizada, essas alterações na qualidade da madeira causam heterogeneidade do material. Isto é um dos maiores problemas enfrentados pelas indústrias siderúrgicas que utilizam o carvão vegetal como agente redutor (LOUREIRO et al., 2021; PROTÁSIO et al., 2014).

Para determinar a idade de corte ideal das árvores, para determinada finalidade, como a produção de carvão vegetal, deve ser realizadas diferentes avaliações das características tecnológicas da madeira, muitas vezes influenciadas pelo incremento da idade. Segundo Sturion et al. (1988) a densidade básica da madeira, por exemplo, aumenta em média 8% com o incremento da idade de corte de quatro para sete anos.

Meneses et al. (2015) constataram que a maior taxa de incremento da densidade básica ocorre nas árvores mais jovens, os autores encontraram incremento em densidade de 3 a 4% ao ano. Segundo os autores, isso ocorre devido as variações morfológicas e químicas da transição de madeira juvenil e adulta. As madeiras consideradas de elevada densidade básica resultam em maior massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume e maior densidade aparente (CARNEIRO et al., 2017b). Portanto, determinar uma idade de corte na qual se obtém madeiras com maior densidade resulta em maiores ganhos nos processos de colheita e transporte, visto que o custo do frete é calculado de acordo com o peso do material, o que permite transportar mais material por unidade de volume e reduzir os custos com combustível (SILVA, 2017).

Coelho (2015) simulando um cenário de produção de carvão vegetal com um clone de 520 kg m⁻³ com rendimento gravimétrico de 30% e outro de 578 kg m⁻³ com rendimento gravimétrico de 34%, verificou a demanda de 3,33 e 2,90 toneladas de madeira, respectivamente, para produção de uma tonelada de carvão vegetal, ou seja, 15% a mais de volume de madeira com menor densidade para a mesma produção de carvão vegetal. O

parâmetro de rendimento gravimétrico em carvão vegetal possui correlações positivas com teor de lignina total, relação S/G e índice de cristalinidade.

Entre a idade da árvore e o teor de cinzas, Castro et al. (2016) encontraram correlação negativa, visto que o conteúdo diminui de acordo com o aumento da idade. O teor de cinzas é formado pelos minerais presentes na madeira e que não participam da combustão, o que resulta em correlação negativa com o poder calorífico superior. Quando utilizado carvão vegetal com alto teor de cinzas nas indústrias siderúrgicas a resistência mecânica do ferro gusa ou do aço é reduzida. Os valores para o teor de cinzas geralmente variam de 0,07% a 1%, de forma a não comprometer suas propriedades energéticas (NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013). No entanto, deve ser observada a idade desse material, visto que Castro et al. (2016) ao avaliarem árvores nas idades três, quatro, cinco e sete anos, encontraram aos três anos valores acima de 1%.

3.4 *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp.

Dentre as diversas espécies utilizadas em plantios comerciais no Brasil, os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* se destacam devido ao seu rápido crescimento, resistência a diversas condições ambientais e alta adaptabilidade. O gênero de *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, com cerca de 500 espécies, nativos da Austrália e alguns países do sudeste asiático (MALINOWSKI; NAKASHIMA; ALQUINI, 2009; SANCHEZ; LOPEZ-RIOS, 2007).

A área de floresta plantada no Brasil em 2022 totalizou 9,94 milhões de hectares, sendo que 7,6 milhões de hectares são de *Eucalyptus*, permanecendo como a espécie mais cultivada, correspondente a 76% da cobertura total. A produtividade média do eucalipto no Brasil foi de 32,7 m³/ha/ano (com casca) (IBA, 2023).

O gênero *Corymbia* também pertencente à família Myrtaceae, possui 113 espécies com ocorrência natural na costa leste da Austrália. Até a década de 1990 as espécies do gênero *Corymbia* eram classificadas como *Eucalyptus*. Em 1995, após estudos taxonômicos, foram encontradas divergências e *Corymbia* passou a ser considerado um gênero (HILL; JOHNSON, 1995; REIS; ASSIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2013).

As plantações comerciais de *Eucalyptus* são importantes em diversos países. Enquanto as espécies de *Corymbia* tem ganhado destaque recentemente, mostrando-se promissoras em regiões tropicais e subtropicais. O *Corymbia* tem despertado interesse principalmente para ser utilizado em regiões onde futuramente podem ser inadequadas para as espécies de eucaliptos devido ao estresse abiótico e biótico causado pelas mudanças climáticas e a busca pela melhor adequação da matéria prima. Visto que o *Corymbia* tem demonstrado maior tolerância ao calor,

estresse hídrico e resistência a pragas e doenças quando comparado as espécies de eucalipto (BRAWNER et al., 2011; REIS; ASSIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2013; TAMBARUSSI et al., 2018)

Vale ressaltar que os híbridos criados a partir dos genótipos de *Corymbia citriodora* e *Corymbia torelliana* podem aumentar a chance de florestas bem-sucedidas, apesar de ainda ser pouco explorado, essa hibridização objetiva unir a qualidade da madeira de *C. citriodora* e a resistência ao vento e as pragas florestais de *C. torelliana*. Além de que *C. citriodora* possui baixa taxa de enraizamento, portanto, a presença do *C. torelliana* que apresenta a melhor taxa de enraizamento entre as espécies de *Corymbia*, garante uma melhora na propagação vegetativa do híbrido (REIS; ASSIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2013).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados cinco genótipos (Tabela 1), sendo quatro de *Eucalyptus* spp. e um híbrido de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, nas idades de cinco, seis e sete anos. Foram selecionadas três árvores de diâmetro médio por idade, excluindo árvores de bordas, suprimidas e com defeito, totalizando 45 árvores (unidades amostrais). As árvores foram obtidas de plantios comerciais com espaçamento 6 x 1,5 metros, pertencentes a empresa Aperam, localizados na região de Itamarandiba, Minas Gerais (Latitude 17° 44' 45'' S; longitude 42° 45' 11'' W e altitude 1.000m).

As precipitações da região de instalação do experimento atingem uma média de 1.166 mm, o período de maior precipitação ocorre entre novembro e março. A temperatura média de 21 °C e o clima pela classificação de Koppen é tropical de altitude Cwa, temperado úmido com inverno seco e verão quente. O solo é do tipo latossolo vermelho distrófico típico e vermelho amarelo distrófico típico, com textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturado. A topografia é plana (chapada) e a vegetação nativa é característica do bioma cerrado (SILVA; FERREIRA, 2011).

O teste clonal foi instalado em parcelas quadradas de 8 linhas com 8 plantas para cada material genético. Os diâmetros à altura do peito (DAP's) das árvores selecionadas variaram entre 13,3 e 22,8 cm, com valor médio de 17,02 cm. As alturas comerciais (Hc's) variaram entre 13,1 e 23,8 m com valor médio de 20,15 m.

O incremento médio anual para cada material genético foi determinado pelo método de Smallian, multiplicando-se as médias dos valores das áreas seccionais obtidas nas extremidades de cada seção e o seu comprimento. O volume total de madeira produzida por hectare foi calculado pela multiplicação do volume individual das árvores pelo número de árvores por hectare. O valor do IMA foi calculado conforme equação a seguir.

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

Em que: 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).

Tabela 1 - Identificação dos genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizados no estudo

| Genótipos | Idade (anos) | IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|--|--------------|--|
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 5 | 28,20 |
| | 6 | 36,72 |
| | 7 | 51,19 |
| <i>E. urophylla</i> | 5 | 58,52 |
| | 6 | 52,43 |
| | 7 | 48,73 |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 5 | 41,33 |
| | 6 | 39,95 |
| | 7 | 43,19 |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> (tri-cross) | 5 | 53,02 |
| | 6 | 34,36 |
| | 7 | 40,99 |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 5 | 53,62 |
| | 6 | 43,65 |
| | 7 | 56,66 |

O experimento foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e no Laboratório de Celulose e Papel (LCP), do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa – UFV, exceto a difração de raio X, para determinação da cristalinidade da celulose, que foi realizada no Laboratório de Difração de Raios X, do Departamento de Física.

4.1. Preparo de Amostras

O preparo das amostras foi feito a partir da retirada de seis discos nas posições 0%, DAP (diâmetro à altura do peito), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco, até o diâmetro mínimo de 6 cm. Em seguida, foi feita a medição da área de cerne e alburno de cada disco. Na sequência, em cada um dos discos referente a todas as alturas foram utilizados para retirar o material destinado as análises anatômicas da madeira. A diante, foram obtidas duas cunhas opostas, passando pela medula, utilizadas para determinação da densidade básica da madeira.

O restante de cada disco foi seccionado, formando uma amostra composta destinada à carbonização, e outra parte destinada às demais análises. Para as análises de poder calorífico superior, índice de cristalinidade da celulose, composição química estrutural e elementar as amostras de madeira foram moídas em um moinho de laboratório tipo Thomas – Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-85 (TAPPI, 1996a). Para essas análises foram formadas amostras compostas, enquanto para a densidade básica da madeira e porcentagens de cerne e alburno a avaliação foi feita no sentido base-topo.

Após cada carbonização, o rendimento gravimétrico em carvão foi determinado e uma parte das amostras carbonizadas foi destinada à determinação da densidade relativa aparente, o restante do material foi triturado para avaliação da composição química imediata e poder calorífico superior (PCS).

4.2. Propriedades da madeira

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água e o poder calorífico foi determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300. Na tabela 2 estão apresentadas suas respectivas normas, utilizadas para realização dos ensaios.

Tabela 2 – Propriedades da madeira determinadas para os genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

| Propriedade | Norma/Referência |
|-----------------------------|--|
| Densidade básica da madeira | ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984) |
| Poder calorífico superior | ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984) e ASTM (1982) |

4.3. Propriedades Anatômicas da Madeira

4.3.1. Relação cerne/alburno (C/A)

A identificação de cada torete na região limite entre cerne e alburno, foi feita utilizando uma lupa com aumento de dez vezes, analisando as alterações na cor e a existência de poros obstruídos por tilos no cerne. De uma ponta à outra de cada disco, foi traçado duas retas formando um ângulo de 90°, que cruzava o centro da medula. Foram feitas medições do diâmetro total e diâmetro do cerne usando uma régua de 0,1 cm de precisão, de acordo com a metodologia de Evangelista (2007). Foi utilizada a seguinte fórmula no cálculo da relação C/A:

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

Em que: Dc: Diâmetro do cerne (cm); e D: Diâmetro do disco sem casca (cm).

Para cada genótipo, foi calculada a média da relação C/A utilizando a média ponderada da relação C/A dos toretes coletados ao longo do tronco da árvore e o volume das toras entre dois discos consecutivos foi utilizado como fator de ponderação.

4.3.2. Análise morfológica de fibras e poros

Para cada árvore, foram retirados pequenos fragmentos nas regiões do cerne e do alburno no sentido radial dos discos retirados referente a todas as alturas, configurando uma amostra composta. As amostras foram acomodadas com solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial para individualizar as fibras, conforme o método descrito por Dadswell (1972). Em seguida, foram montadas as lâminas temporárias e medidos o comprimento (mm), largura (μm) e o diâmetro (μm) de 30 fibras por árvore. Os equipamentos utilizados foram um microscópio ótico com câmera fixada, um sistema de aquisição de imagens e o software Axio-Vision 4.3. A espessura da parede celular da fibra foi determinada matematicamente pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume. A fração parede (FP) foi calculada de acordo com Foelkel et al. (1975):

$$FP = \frac{2 * Ep}{Lf} * 100 \quad (3)$$

Em que: FP: Fração parede (%); Ep: Espessura de parede (μm); e Lf: Largura da fibra (μm).

Para medir o diâmetro e frequência de poros, foi utilizada amostras da região periférica do cerne de cada árvore retirados da parte superior do disco relativo ao DAP. Os cortes anatômicos do lenho foram obtidos através do método de microtomia, com emprego de um micrótomo de deslize horizontal, foi retirado material com espessura média de 16 μm , os cortes foram feitos nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial para cada uma das amostras. O material foi desidratado em uma série alcoólica, tingidos com solução de safranina, e as lâminas foram fixadas com Entellan. Com o auxílio do software Axio-Vision 4.3, para cada árvore mediu-se o diâmetro de 30 poros e a frequência foi mensurada em 5 micrografias.

4.4. Propriedades Químicas da Madeira

4.4.1. Composição química elementar

As determinações da análise química elementar da madeira foram realizadas em duplicatas, de acordo com o método descrito na norma DIN EN 15104 (2011). As amostras utilizadas foram previamente selecionadas a partir de peneiras sobrepostas com malhas de 200 e 270 mesh, sendo utilizada 2, mg ($\pm 0,5$) da amostra que ficou retirada na peneira de 270 mesh. As amostras selecionadas foram secas em estufa à temperatura constante de $105 \pm 2^\circ\text{C}$.

Foram feitas uma análise por vez, colocando-as na mesa giratória do equipamento da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube CHNS-O. Para a realização da análise são necessários os gases de arraste e ignição, sendo utilizados o hélio e o oxigênio, respectivamente. O tubo de combustão, presente no interior do equipamento durante a queda da amostra do carrossel, chega à temperatura de 1.150°C .

Após a combustão, os gases são transportados por arraste para o tubo de redução e seguem para a coluna de detecção, onde cada um dos elementos, o carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H) e enxofre (S) são identificados por meio de detectores de condutividade térmica, pois cada um dos elementos possui interações e picos específicos. O valor de oxigênio é determinado pela soma do C, N, H, S e cinzas, subtraído de 100 (Equação 4). O teor de cinzas foi obtido por meio da química imediata da madeira.

$$\text{O (\%)} = 100 - \text{C (\%)} - \text{H (\%)} - \text{N (\%)} - \text{S (\%)} - \text{CZ (\%)} \quad (4)$$

Em que: O (%): Teor de oxigênio; C (%): Teor de carbono; H (%): Teor de hidrogênio; N (%): teor de nitrogênio, S (%): Teor de enxofre e CZ (%): Teor de cinzas.

4.4.2. Composição química estrutural

A composição química estrutural da madeira foi estimada a partir da determinação do teor de extrativos totais, teor de lignina solúvel e insolúvel, holoceluloses e cinzas. Para cada árvore, foram utilizadas uma amostra composta de madeira moída anteriormente, utilizando-se a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e foi recolhida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada de acordo com a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1996b).

Os teores de extrativos da madeira foram determinados conforme com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996c), em duplicatas, utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, alterando apenas o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno.

O teor de lignina insolúvel foi determinado em duplicata pelo método Klason, com modificações de acordo com o proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, por meio da diluição do filtrado proveniente do procedimento realizado para obtenção da lignina insolúvel, conforme Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi obtido através da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. Em seguida a porcentagem de holoceluloses foi calculada subtraindo o teor de extrativos totais e lignina total de 100 (Equação 5).

$$\text{HOLO (\%)} = 100 - \text{EXT (\%)} - \text{LG (\%)} - \text{CZ (\%)} \quad (5)$$

Em que: HOL (%): Teor de holoceluloses; EX (%): Teor de extrativos totais e LG (%): Lignina total; CZ (%) = Teor de cinzas.

A determinação da porcentagem de cinzas na madeira foi determinada de acordo com a norma DIN IN 144775 (2009), utilizando o cadinho de porcelana ao invés de platina, e a temperatura de 600 °C no lugar de 750 °C.

4.4.3. Relação siringila/guaiacila (S/G)

A determinação da relação siringila/guaiacila (S/G) da lignina foi feita a partir da cromatografia líquida, em duplicata, após a oxidação da serragem livre de extrativo da madeira com nitrobenzeno (LIN e DENCE, 1992).

4.4.4. Cristalinidade da celulose

Para avaliar a cristalinidade da celulose, as amostras de madeira foram caracterizadas por difração de raio X, a partir da metodologia descrita na literatura pelos autores Browning (1967) e Fengel e Wegener (1989). Para a análise, foram utilizadas amostras compostas da fração serragem que passou pela peneira de 200 mesh, e ficou retida na peneira de 270 mesh. Foi utilizada 0,1 g de serragem fixada em lâmina com o auxílio de cola do tipo PVA.

O cálculo do índice de cristalinidade utiliza a difração de raio X, essa técnica usa o espalhamento da radiação X por estruturas organizadas (cristais), o que permite realizar estudos sobre a composição destes materiais e determinar sua estrutura e a fração cristalina (BAUMHARDT NETO, 2007). O índice de cristalinidade é determinado através 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.

A análise de difração de raios X foi realizada à temperatura ambiente em um sistema de difração D8-Discover (Bruker) equipado com tubo de Cu ($L=1,5418$ angstroms, 40kV e 40 mA) e espelho de Goebel. Foi utilizada varredura $\theta - 2\theta$ de 10 a 40 graus, com passo de 0.05 graus por segundo. O índice de cristalinidade da celulose foi calculado de acordo com Segal et al. (1959), utilizando-se o software OriginPro 10.05 (ORIGINLAB, 2023).

4.5. Carbonização da Madeira

Para carbonização foi utilizada uma amostra composta por árvore, formada a partir de amostras que foram retiradas de cada disco ao longo da altura comercial da árvore. As amostras foram secas em estufa a uma temperatura constante de $103\pm 2^\circ\text{C}$, por 72 horas.

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico tipo mufla, utilizando-se aproximadamente 450 g de madeira inseridas em um recipiente metálico com dimensões nominais de 0,3 m de comprimento, 0,12 m de diâmetro e um volume de aproximadamente $0,003 \text{ m}^3$. O controle de aquecimento foi feito manualmente, a uma taxa de aquecimento média de $4,17^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ (Tabela 3).

A marcha de carbonização foi determinada a partir de pré-testes baseados no teor de carbono fixo do carvão vegetal, chegando à temperatura inicial de 150°C e a temperatura final de 450°C , sendo mantida nesta última por um período de 60 minutos, portanto, o tempo total de carbonização foi de 7,5 horas. Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão.

Tabela 3 - Rampa de aquecimento utilizada na carbonização dos genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

| Tempo (minutos) | Temperatura ($^\circ\text{C}$) | Taxa de aquecimento ($^\circ\text{C}/\text{minutos}$) |
|-----------------|----------------------------------|---|
| 00 | 150 | - |
| 60 | 200 | 3,33 |
| 60 | 250 | 4,17 |
| 90 | 350 | 3,89 |
| 90 | 400 | 4,44 |
| 60 | 450 | 5,00 |

4.7 Estimativa da massa de carvão vegetal

A massa seca de madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi obtida multiplicando-se o incremento médio anual pela densidade básica da madeira, e a massa de carvão vegetal ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi obtida

multiplicando a massa seca de madeira pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal, conforme as equações a seguir:

$$MSM = \frac{IMA * Dbm}{1000} \quad (6)$$

$$MCV = MSM * RGCV \quad (7)$$

Em que: MSM: Massa seca de madeira, em t ha⁻¹ ano⁻¹; IMA: Incremento médio anual (sem casca), em m³ ha⁻¹ ano⁻¹; Dbm: Densidade básica da madeira, em kg m⁻³. MCV: Massa de carbono carvão vegetal, em t ha⁻¹ ano⁻¹ e RGCV: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal dividido por 100.

4.6. Propriedades do carvão vegetal

Foram determinadas a densidade relativa aparente do carvão vegetal pelo método hidrostático, com imersão em mercúrio. O Poder calorífico superior do carvão vegetal utilizando uma bomba calorimétrica adiabática IKA300 e a composição química imediata, formada pelo teor de material volátil, cinzas e carbono fixo. Na tabela 4 estão apresentadas as normas utilizadas nos ensaios.

Tabela 4 – Propriedades do carvão vegetal determinadas para os genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

| Propriedade | Norma/Referência |
|-----------------------------|--|
| Densidade relativa aparente | Vital (1984) |
| Poder calorífico superior | ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984) e ASTM (1982) |
| Composição química imediata | ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986) |

A friabilidade foi determinada utilizando cerca de 20 g de amostras de carvão vegetal colocadas a um friabilômetro por 14 minutos a 35,5 RPM adaptando-se a norma do Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), citada por Oliveira et al. (1982). Em seguida, o carvão foi peneirado, utilizando uma peneira de 9,5 mm e calculada a perda de massa.

4.7. Análise estatística

O experimento foi instalado em esquema fatorial com delineamento inteiramente casualizado. O primeiro fator é formado por cinco tratamentos (genótipos) e o segundo fator com três tratamentos (idade), sendo assim o arranjo fatorial foi 5x3. O experimento foi composto por três repetições (árvores), totalizando 45 unidades amostrais.

Inicialmente os dados foram submetidos ao método multivariado de análise de componentes principais (PCA), a fim de extrair padrões. Sequencialmente, foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Levene, para testar a normalidade e homogeneidade de variância, respectivamente. Atendendo aos pressupostos, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), para verificar interação entre os fatores. Quando estabelecidas significância os fatores foram desdobrados nos diferentes níveis, onde não houve interação os fatores foram analisados separadamente. Quando não atendidas as pressuposições da ANOVA os resultados foram interpretados com auxílio de estatística descritiva.

Para dados qualitativos foram utilizados testes de média (Tukey a 95% de probabilidade). Todas as análises foram realizadas no software livre R (R CORE TEAM, 2024).

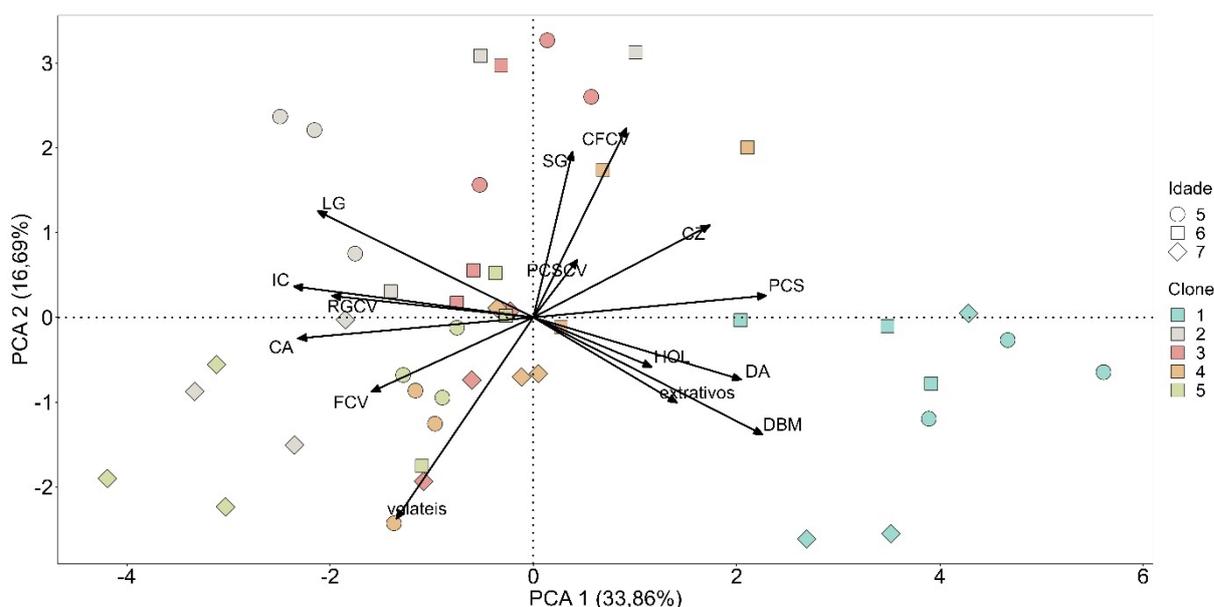
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Efeito da idade de colheita nas propriedades da madeira e do carvão vegetal

5.1.1. Análise de componentes principais

Selecionou-se os dados, excluindo a composição química elementar, devido ao menor desvio entre os fatores estudados, que são utilizados como importantes critérios de seleção de material genético e qualidade do carvão vegetal, em seguida foram agrupados por análise de componentes principais (PCA) (Figura 1), onde as variáveis com maiores contribuições para os componentes foram identificadas com base nos autovetores. Os dois primeiros componentes principais tiveram os maiores valores e explicaram mais de 50% da variação total dos dados.

Figura 1 - Análise de componentes principais das propriedades da madeira e do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* spp. e um híbrido de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* em diferentes idades



Em que: LG: Lignina total; SG: Relação Siringila/guaiacila; CFCV: Carbono fixo do carvão vegetal; CZ: Teor de cinzas do carvão vegetal; IC: Índice de cristalinidade da celulose; CA: Relação cerne/alburno; PCSCV: Poder calorífico superior do carvão vegetal; PCS: Poder calorífico da madeira; RGCV: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; FCV: Teor de finos do carvão vegetal; HOL: Teor de holoceluloses; DA: Densidade aparente do carvão; DBM: Densidade básica da madeira;

Verifica-se que houve uma correlação positiva entre rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), lignina total (LG) e índice de cristalinidade da celulose (IC), o que indica que

estes dois componentes influenciam no aumento do rendimento gravimétrico. A lignina é um polímero complexo e possui uma alta resistência a degradação térmica e porcentagens consideráveis de carbono elementar em sua composição, mais de 65%, portanto os componentes ricos em oxigênio como a celulose e hemiceluloses degradam-se de forma mais rápida (COUTO et al., 2023; SANTOS et al., 2016).

Quanto a cristalinidade da celulose, pressupõe-se que madeiras com maiores índices de cristalinidade da celulose são mais resistentes a degradação térmica, o que contribui para um maior rendimento gravimétrico. Este resultado pode ser explicado pela diferença de estabilidade térmica entre a celulose amorfa e celulose cristalina, esta última possui fortes e bem estruturadas ligações de hidrogênio, intramoleculares e intermoleculares resultando em uma estrutura mais condensada (CHEN et al., 2020; LENG et al., 2018). Esses resultados são semelhantes a resultados encontrados em estudos realizados anteriormente com madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* (MASSUQUE et al., 2021, 2022).

O rendimento gravimétrico e extrativos totais se correlacionaram de forma negativa, resultado divergente foi encontrado por Fialho et al. (2022), isso possivelmente ocorreu devido à natureza dos extrativos presentes no material utilizado no estudo. Os extrativos presentes na madeira incluem lipídios, compostos fenólicos, terpenóides, ácidos graxos entre outros. Os ácidos graxos e esteroides são degradados em temperaturas mais baixas que a temperatura final de carbonização, com isso não contribuem com o rendimento do carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013a; SCHULZ et al., 2020).

Foi encontrada também, uma correlação positiva entre relação cerne/alburno (C/A) e teor de finos do carvão. Quanto maior a relação C/A maior será a dificuldade para liberar os gases e vapor d'água do interior da madeira durante a carbonização, devido à baixa permeabilidade do cerne, o que ocasiona problemas na secagem da madeira (BRITO et al., 2019). Com isso, ocorre o aumento da pressão interna na madeira e favorece o colapso de suas células o que aumenta a friabilidade do carvão vegetal e conseqüentemente o seu teor de finos.

A densidade aparente do carvão vegetal e a densidade básica da madeira (DBM) tiveram correlação positiva, o que é esperado e comumente encontrado em estudos que correlacionam as propriedades da madeira com as do carvão vegetal. Esta correlação positiva propõe que quanto maior a DBM utilizada para produção de carvão vegetal maior será a densidade aparente desse carvão, melhorando a produtividade das carvoarias e reduzindo os custos de transporte (FIALHO et al., 2022).

A análise de variância indicou que houve interação significativa entre os fatores clones e idades para todas as propriedades da madeira, portanto, foi necessário realizar o

desdobramento de um fator dentro do outro. O mesmo não ocorreu para as propriedades do carvão vegetal, pois a densidade aparente e os teores de carbono fixo e materiais voláteis não resultaram em interação entre os fatores, com isso foram avaliados de forma independente. A densidade relativa aparente resultou em diferença significativa apenas para os clones. Os teores de carbono fixo e materiais voláteis resultaram em diferença significativa apenas para a idade, sendo apresentados a média em uma única figura.

5.1.2. Propriedades anatômicas da madeira

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre idade e clone para todas os parâmetros anatômicos da madeira. Os valores médios são apresentados nas tabelas 5 e 6, respectivamente para fibras e vasos.

Tabela 5 - Valores médios dos parâmetros anatômicos da fibra da madeira dos clones em função da idade de corte das árvores

| Clones | Idade (anos) | | |
|---|--------------|------------|-----------|
| | 5 | 6 | 7 |
| COMPRIMENTO DA FIBRA (mm) | | | |
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 0,99 aA | 0,99 abA | 0,99 abA |
| <i>E. urophylla</i> | 0,99 aA | 1,02 aA | 0,97 bA |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 0,90 bB | 0,95 bB | 1,05 aA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 0,97 aB | 1,03 aA | 1,01 abAB |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 1,01 aA | 1 abA | 0,98 bA |
| LARGURA DA FIBRA (µm) | | | |
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 17,33 dB | 18,46 bA | 18,32 bA |
| <i>E. urophylla</i> | 21,21 abA | 19,42 abAB | 18,96 abB |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 20,81 aA | 18,93 abB | 19,07 abB |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 18,58 cB | 19,83 aA | 19,45 aA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 19,54 bcA | 19,18 abA | 18,91 abA |
| DIÂMETRO DO LUME (µm) | | | |
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 8,05 cB | 8,75 bAB | 9,05 aA |
| <i>E. urophylla</i> | 11,11 aA | 9,74 aB | 9,84 aB |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 11,26 aA | 9,86 aB | 9,01 aC |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 8,94 cA | 9,68 abA | 9,49 aA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 10,05 bA | 9,48 abA | 9,51 aA |
| ESPESSURA DA PAREDE (µm) | | | |

| | | | |
|---|----------|----------|----------|
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 4,64 abA | 4,72 bcA | 4,64 cdA |
| <i>E. urophylla</i> | 4,42 bB | 4,85 abA | 4,4 dB |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 4,78 aB | 4,54 cC | 5,01 aA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 4,82 aA | 5,03 aA | 4,94 abA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 4,75 aA | 4,86 abA | 4,7 bcA |

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Tabela 6 - Valores médios da fração parede da madeira dos clones em função da idade de corte das árvores.

| Clones | Idade (anos) | | | DP |
|---|---------------|-------|-------|------|
| | 5 | 6 | 7 | |
| | FRAÇÃO PAREDE | | | |
| <i>C. citriodora</i> x <i>torelliana</i> | 53,52 | 51,13 | 50,61 | 1,45 |
| <i>E. urophylla</i> | 43,69 | 49,95 | 46,41 | 3,03 |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 45,92 | 47,95 | 52,58 | 3,08 |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 51,88 | 50,72 | 50,80 | 1,10 |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 48,59 | 50,70 | 49,70 | 1,11 |

Em que: DP: Desvio Padrão.

Tabela 7 - Valores médios dos parâmetros anatômicos dos vasos da madeira dos clones em função da idade de corte das árvores

| Clones | Idade (anos) | | |
|---|---|-----------|-----------|
| | 5 | 6 | 7 |
| | FREQÜÊNCIA (n° poros mm ⁻²) | | |
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 11,24 aA | 9,97 aAB | 9,16 bB |
| <i>E. urophylla</i> | 10,3 aA | 10,65 aA | 9,8 bA |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 11,48 aA | 10,61 aAB | 9,88 bB |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 10,78 aA | 11,43 aA | 11,67 aA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 10,39 aA | 10,56 aA | 10,23 abA |
| | DIÂMETRO DOS VASOS (µm) | | |
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 109,85 cB | 114,33 aB | 121,99 aA |
| <i>E. urophylla</i> | 117,88 bA | 119,24 aA | 118,27 aA |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 113,25 bcA | 113,78 aA | 116,53 aA |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 125,82 aA | 114,12 aB | 116,26 aB |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 116,88 bA | 114,97 aA | 120,02 aA |

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades;

O comprimento das fibras não apresentou um padrão com o aumento da idade de corte. Não houve diferença significativa para idade nos clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita*. O comprimento das fibras variou de 0,90 mm a 1,03 mm, segundo Marini et al. (2022) as fibras do tipo curta possuem comprimento entre 0,5 e 2 mm.

A largura das fibras apresentou tendência de diminuição com o avanço da idade de corte para os clones *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *E. pellita*. Enquanto para o *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis* teve um aumento aos seis anos, isto pode ter sido ocasionado pelas condições do plantio permitindo o seu desenvolvimento, possibilitando maior incremento na largura das fibras (BENITES et al., 2018). Os valores de largura das fibras ficaram próximos dos encontrados por Braz et al. (2014) e Benites et al. (2018) para *eucalyptos*, 18,62 μm com 2,5 anos e 18,80 μm com 3,5 anos, respectivamente. Com exceção do *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* que possuía 17,33 μm aos cinco anos.

De forma geral, o diâmetro do lume diminuiu com o aumento da idade de corte. O clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* teve um dos menores valores nas idades avaliadas, sendo estatisticamente igual ao *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* aos cinco e seis anos e ao *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* aos seis. A idade sete não houve diferença significativa em nenhum dos clones. O diâmetro do lume está diretamente relacionado a largura das fibras e espessura de parede, sendo que quanto maiores forem os seus valores mais espaços vazios serão encontrados na madeira, propiciando uma menor densidade básica e resistência mecânica (BRAZ et al., 2014). Para produção de carvão vegetal, o ideal é utilizar material com a menor área de espaços vazios.

Para a espessura de parede não houve uma tendência de aumento com a idade, a madeira do clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* teve o segundo menor valor nas três idades avaliadas (4,64 μm a 4,72 μm). Gonçalves e Lelis (2012) avaliaram árvores com 4,2 anos e encontraram um valor médio de 3,96 μm , valor menor do que o encontrado neste estudo para as três idades, os autores explicaram que possivelmente isso ocorreu em função das condições diferentes dos plantios e variabilidade genética dos clones. O clone *Eucalyptus urophylla* se diferenciou dos demais clones na idade cinco com o menor valor, obteve também a menor

densidade básica (kg m^{-3}) nesta idade (Figura 02), enquanto o *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, obteve baixos valores de espessura de parede, mas teve a maior densidade básica, possivelmente influenciada pelos menores valores de diâmetro do lume.

Para a fração parede (FP), que indica a proporção da espessura da parede em relação ao diâmetro total da fibra, os valores médios variaram entre 46,41% e 53,52%. O clone com os maiores valores foi o *C. citriodora* x *C. torelliana*, com exceção da idade sete que o clone *E. grandis* x *E. urophylla* obteve o maior valor. Os clones com maiores valores de desvio padrão foram o *E. grandis* x *E. urophylla* e o *E. urophylla* com 3,08 e 3,03, respectivamente.

O recomendado para produção de carvão vegetal é fração parede acima de 60%, porém nenhum dos clones obteve estes valores, pois apresenta maior porção de massa para sustentar a decomposição térmica da madeira, o que resulta em maior rendimento do carvão (PAULA, 2005). Apesar de não ter obtido este valor, o *C. citriodora* x *C. torelliana* além de obter os maiores valores de fração parede teve também os menores valores de diâmetro do lume e menor largura da fibra estas características atribuem a ele uma maior densidade básica devido ao menor número de espaços vazios.

A frequência de poros diferiu significativamente para idade nos clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e não obteve diferença significativa entre clones aos cinco e seis anos. Para os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* ocorreu uma redução com o aumento da idade, possivelmente influenciado pela formação do lenho tardio.

Para diâmetro dos vasos houve diferença significativa entre a idade apenas para os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*, sendo que a madeira do clone de *Corymbia* teve o maior valor na idade sete. Os poros são estruturas ocas que possibilitam maior permeabilidade a madeira, com isso, uma maior frequência dessas estruturas proporciona uma melhor secagem a madeira (SHAHVERDI et al., 2012; ZANUNCIO et al., 2018), processo que antecede a produção de carvão vegetal e influencia a qualidade do produto. No entanto, deve-se observar a frequência dos poros juntamente com o seu diâmetro.

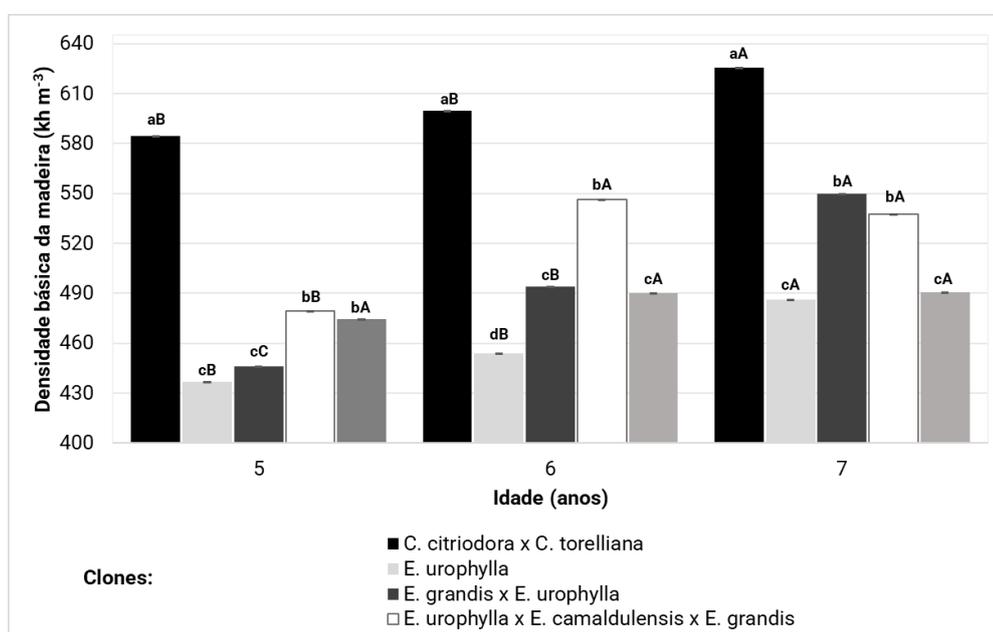
Visto que, observou-se que quando os clones tiveram maiores valores para frequência de poros aliados aos menores valores de diâmetro de vasos, esses tiveram maiores valores de densidade básica da madeira, como no caso do *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, enquanto *Eucalyptus urophylla* teve baixos valores de frequência de poros e maior diâmetro dos vasos, conseqüentemente baixos valores de densidade básica. De acordo com Pereira et al. (2016) o maior espaço vazio é proporcionado pela maior frequência e maiores diâmetros de poros,

resultando em baixos valores de densidade básica, assim como o inverso proporciona maiores valores de densidade básica.

5.1.3. Densidade básica da madeira

Na Figura 2 são apresentados os valores médios de densidade básica da madeira em função dos tratamentos. De acordo com a análise de variância houve efeito da interação idade e clone.

Figura 2 - Densidade básica da madeira (kg m^{-3}) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função das idades de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Todos os clones apresentaram diferença significativa em pelo menos uma idade para densidade básica da madeira, com exceção do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* (Figura 2). A densidade básica tendeu a aumentar com o avanço da idade, em média o incremento foi maior da idade seis para a idade sete, próximo de 7,50%. Para os clones *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* os ganhos foram maiores da idade cinco para seis, 13,88 e 3,37%, respectivamente. O incremento da densidade básica com o avanço da idade é esperado devido ao início da formação do lenho tardio, onde ocorre o aumento da espessura da parede celular e uma redução na frequência dos elementos de vaso, quando isso não ocorre acredita-se que seja

efeito das condições climáticas do local do plantio ou devido as características dos genótipos (FAN et al., 2022; VEGA et al., 2021).

O recomendado para produção de carvão vegetal são valores acima de 500 kg m^{-3} (COUTO et al., 2023), sendo que na idade de cinco anos apenas o clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* atenderia ao desejado para siderurgia. O clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* atingiu o valor recomendado aos seis anos, enquanto o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* que obteve ganhos acima de 10% nas três idades avaliadas atingiu o recomendado apenas na idade sete anos. Já os clones *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* não atingiram os valores recomendados para produção de carvão vegetal em nenhuma das idades estudadas, sendo indicado manter esses materiais em campo por mais tempo.

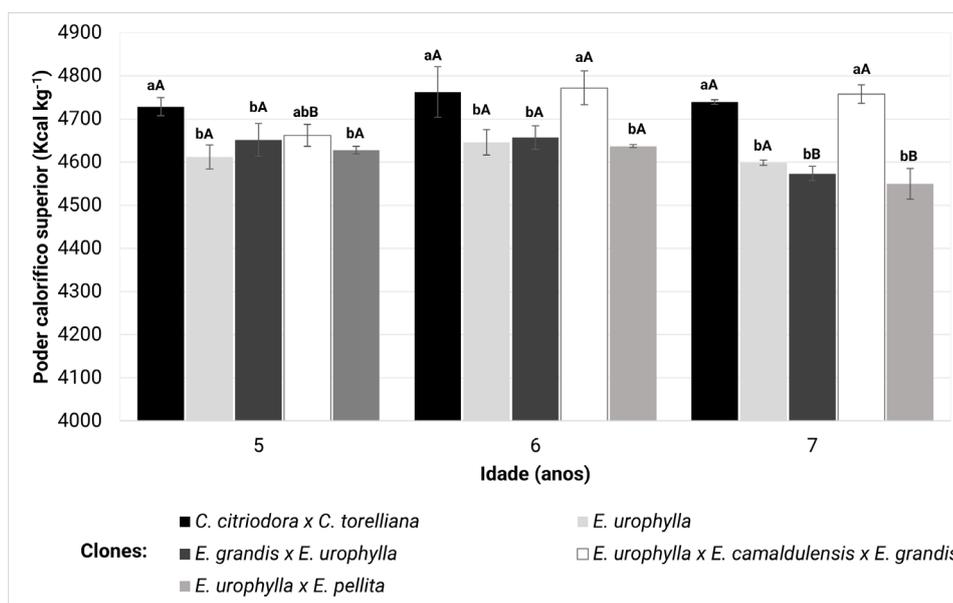
Neste estudo, as características anatômicas como diâmetro do lume e fração parede (Tabela 7) corroboram com os resultados da densidade básica do *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, por possuir o menor diâmetro de lume e uma das maiores frações parede (Tabela 07). De acordo com Paes et al. (2015) estas características são associadas a maiores valores de densidade básica da madeira.

Portanto, analisando a possibilidade de antecipação da idade de corte que, geralmente ocorre aos sete anos (SILVA et al., 2020), verifica-se que apenas o clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* estaria apto para atender as necessidades das indústrias produtoras de carvão vegetal, porém, deve-se analisar outras propriedades juntamente com a densidade básica da madeira.

5.1.4. Poder calorífico superior

Na Figura 3 são apresentados os valores médios de poder calorífico da madeira em função dos tratamentos. De acordo com a análise de variância houve efeito da interação idade e clone.

Figura 3 - Poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função das idades de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

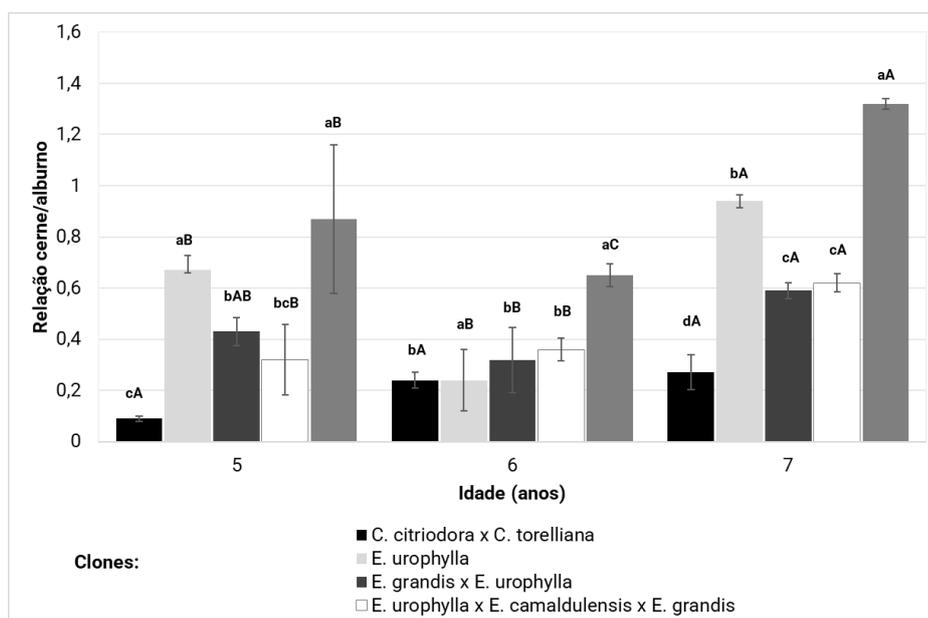
O clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* teve maior média do poder calorífico superior (PCS) da madeira em relação aos demais, exceto ao clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*, o qual foi estatisticamente igual em todas as idades. O maior poder calorífico superior deste clone pode ser devido ao teor de extrativos totais, pois obteve um dos maiores teores nas idades avaliadas (Figura 10) e possivelmente possui maior proporção de compostos fenólicos com altos teores de carbono (CARNEIRO et al., 2017b). Além disso, também possui a maior densidade básica, mas é importante salientar que a quantidade de energia desprendida por uma biomassa é influenciada pela sua composição química, como teor de carbono elementar e teor de lignina (PEREIRA et al., 2021).

A diferença entre os valores do PCS não foi superior a 300 kcal kg^{-1} , não sendo considerado um ganho energético efetivo. Seria considerado como relevante uma diferença superior a 300 kcal/kg , não sendo justificado manter a floresta para produção de carvão vegetal baseado neste ganho (NONES et al., 2014). De forma geral, o PCS da madeira não aumentou com a idade de corte da árvore, apesar do incremento na proporção de cerne/alburno, a exceção do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* que aumentou 2,6% com aumento da idade cinco para a seis anos.

5.1.5. Relação cerne/alburno (C/A)

Na Figura 4 são apresentados os valores médios da relação cerne/alburno da madeira em função dos tratamentos. De acordo com a análise de variância houve efeito da interação idade e clone.

Figura 4 - Relação cerne/alburno de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Para o clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* a idade não resultou em diferença significativa, ou seja, a idade não interferiu na relação cerne/alburno. Os maiores valores foram observados para o *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* e o menor pelo *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* independentemente da idade.

A relação cerne/alburno aumentou com o avanço da idade. Este resultado é ocasionado devido ao processo de cernificação, pois o cerne é formado quando deixa de ser um tecido de condução, se tornando uma região não ativa, portanto a porcentagem de cerne será maior onde o lenho é mais velho. Durante sua formação, o cerne perde nutrientes de reserva e sofre infiltração de diversas substâncias que alteram seu cheiro e cor, nesse processo ocorre a

formação das tiloses que obstruem os vasos impedindo a passagem de água, tornando-o uma região impermeável (CANAL et al., 2020b; RESENDE et al., 2018).

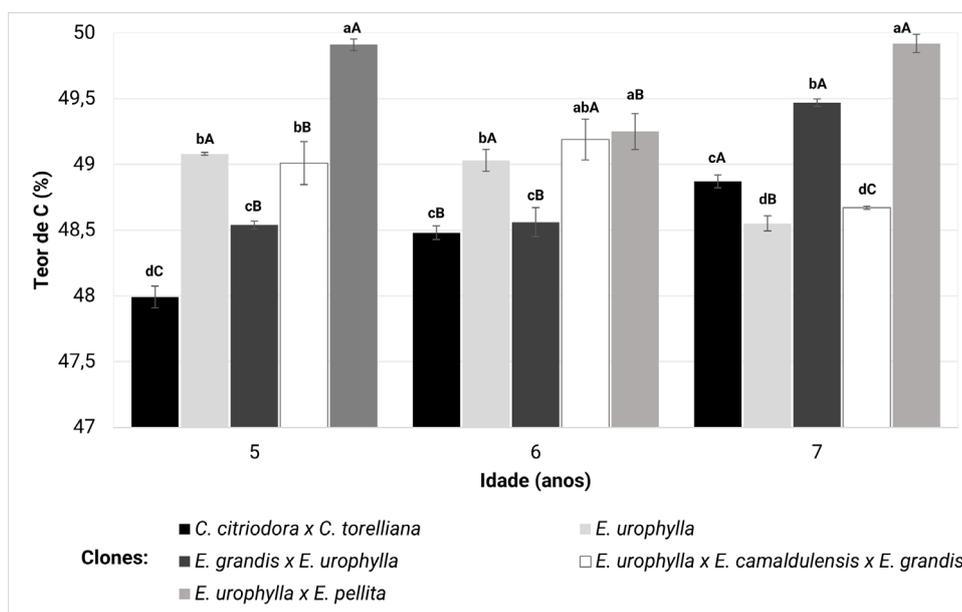
Dessa forma, quanto maior a relação cerne/alburno maior o tempo de secagem devido a maior impermeabilidade deste lenho, além disso, a densidade da região do cerne é menor do que a do alburno, para madeira de eucalipto em idades mais jovens, o que ocasiona em menor valor de densidade básica quando ocorre altos valores para relação cerne/alburno. Assim como observado por Ramos et al. (2023) para clones de eucalipto com 9 anos, onde os mais densos tiveram menor relação cerne/alburno.

Para produção de carvão vegetal é interessante que o clone possua os menores valores de relação cerne/alburno, para serem mais permeáveis terem os menores tempos de secagem, maior resistência do carvão vegetal e conseqüentemente menor geração de finos. Neste presente estudo o clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* poderia ser indicado para produção de carvão vegetal a partir dos cinco anos, pois tem baixa relação cerne/alburno e alta densidade básica da madeira.

5.1.6. Composição química elementar

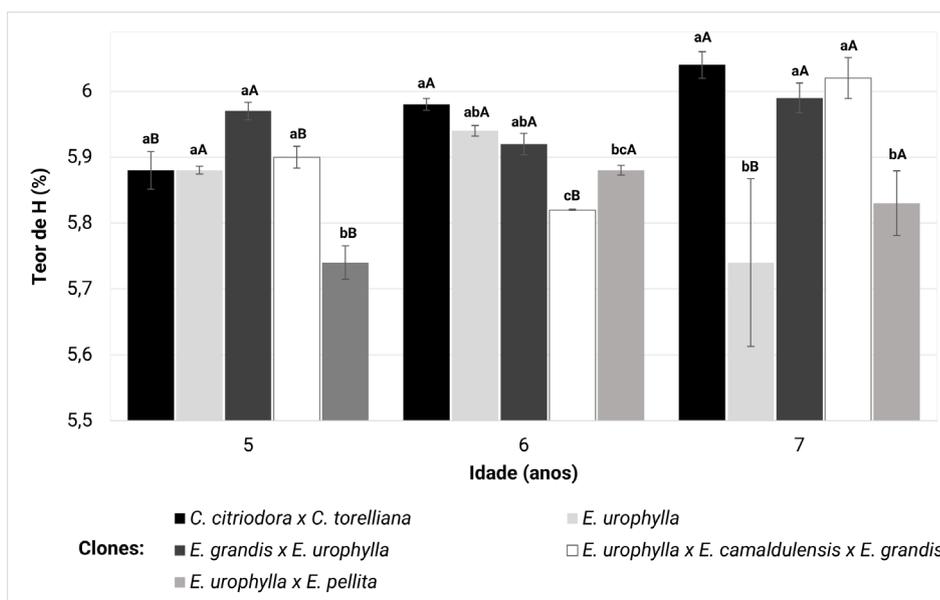
Nas figuras 5, 6, 7, e 8 estão apresentados os valores médios do teor de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) em função dos tratamentos. O teor de enxofre (S) não foi detectado por meio do analisador. Houve interação significativa para todos os elementos.

Figura 5 - Teor de carbono (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



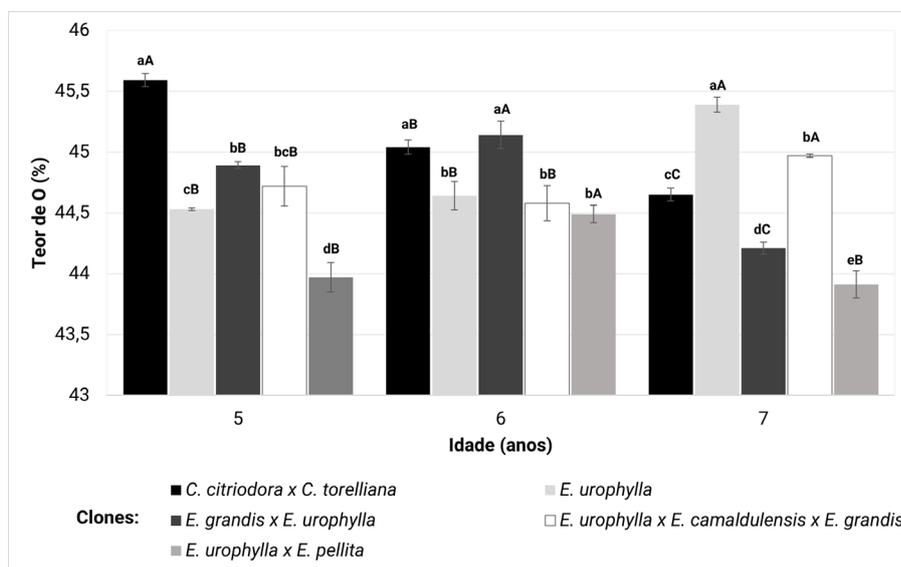
Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Figura 6 - Teor de hidrogênio (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



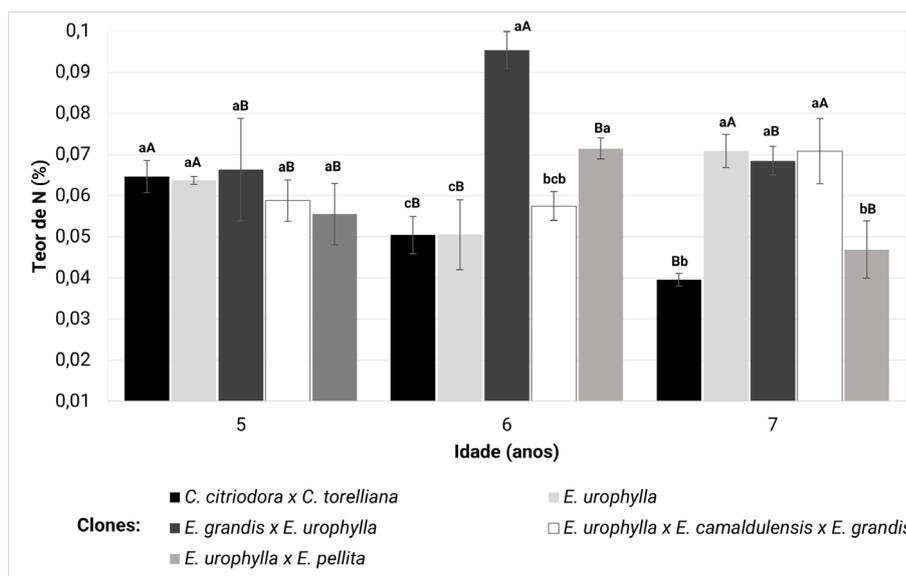
Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Figura 7 - Teor de oxigênio (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Figura 8 - Teor de nitrogênio (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Pode-se observar que houve diferença significativa no teor de carbono em pelo menos uma das idades, sem apresentar uma tendência específica, com exceção do *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* que obtiveram ganho médio próximo de 1% ao ano.

Entre os clones também houve diferença significativa no teor de carbono, exceto para os *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* que foram estatisticamente iguais nas três idades, enquanto o *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* foram estatisticamente iguais na idade de corte de seis anos.

Os teores de carbono ficaram dentro do recomendado pela literatura, aproximadamente 48% de carbono (SILVA et al., 2022), o maior valor encontrado foi para o clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* nas três idades. Para produção de energia é indicado a utilização de materiais com maiores teores de carbono por influenciarem no poder calorífico superior e no rendimento em carbono fixo no carvão vegetal (ZANUNCIO et al., 2019).

O teor de hidrogênio não apresentou uma tendência de aumento com avanço da idade de corte das árvores. Houve diferença estatística entre todos os clones e idades, com exceção do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* que não diferiu significativamente entre as idades avaliadas. Os valores médios encontrados neste estudo, variaram de 5,6 % a 6,06 % e estão de acordo com os valores médios encontrados em outros estudos, próximo de 6% (MONTROYA et al., 2023; REIS et al., 2012).

Os maiores valores para o teor de hidrogênio foram para *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* na idade sete. Baixos valores de hidrogênio resultam em uma alta relação C/H o que é indesejável para madeiras com a finalidade de produção de energia, pois de acordo com Protásio et al. (2011) o aumento de 1% de hidrogênio aumenta aproximadamente 515 kcal kg⁻¹ de poder calorífico superior. Neste estudo os ganhos considerados relevantes foram para os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* com incremento de 1,64% no teor de hidrogênio com acréscimo de 0,72% no PCS e o *Eucalyptus urophylla* com aumento de 1% no teor de hidrogênio e 0,73% de PCS, ambos da idade cinco para seis.

O teor de oxigênio da madeira, na idade de corte de sete anos apresentou diferença significativa entre os clones, porém não evidenciou uma tendência com o aumento da idade, resultado divergente ao encontrado por Protásio et al. (2014), que observaram acréscimo para o teor de oxigênio com o avanço da idade.

Essa diferença pode ser benéfica para madeiras voltadas a produção de carvão vegetal, já que o teor de oxigênio influencia negativamente o poder calorífico e o rendimento em carbono fixo. O teor de oxigênio da madeira do clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* reduziu em média, 1% ao ano, promovendo o incremento em carbono fixo e, conseqüentemente aumento do poder calorífico da madeira (NEVES et al., 2013). O menor valor de oxigênio observado foi para o clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. pellita* aos sete anos.

Para o teor de nitrogênio, observa-se que na idade de cinco anos, não houve diferença significativa entre clones. Alguns autores observaram uma tendência de redução do teor de nitrogênio com o avanço da idade (NEVES et al., 2013; SANTANA et al., 2012), essa tendência não foi observada neste estudo para todos os clones, exceto para o clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* que teve uma diminuição média de 21% ao ano. Segundo Soares et al. (2014) o teor de nitrogênio é necessário em maior quantidade principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento da planta.

De acordo com a literatura as concentrações de nitrogênio são relativamente baixas, variando de 0,1 a 0,6 %, isso ocorre, pois, espécies de rápido crescimento produzem madeiras com menor teor de N. Geralmente, espécies de crescimento lento possuem maior concentração de nitrogênio devido a necessidade de armazenamento. Os *Eucalyptus* e *Corymbia* são espécies consideradas de rápido crescimento, logo os resultados estão em concordância com o de outros estudos (BECKER et al., 2012; MARTIN et al., 2014).

Os valores encontrados para os diferentes clones avaliados nesta pesquisa ficaram abaixo de 1%, independentemente da idade de corte das árvores. Estes baixos valores de N são uma vantagem quando se trata da utilização da madeira para produção de carvão vegetal, pois durante a sua combustão ocorre a formação de óxidos de nitrogênio, gases altamente tóxicos e poluentes ao meio ambiente. Além disto, o teor de nitrogênio influencia negativamente no poder calorífico superior da madeira (REIS et al., 2012).

5.1.7. Composição química estrutural

Nas figuras 9, 10, 11 e 12 estão apresentados os valores médios da lignina total, extrativos totais, holoceluloses e cinzas em função dos tratamentos. Houve interação significativa entre os fatores clone x idade para todos os componentes químicos estruturais da madeira.

Figura 9 - Teor de lignina (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

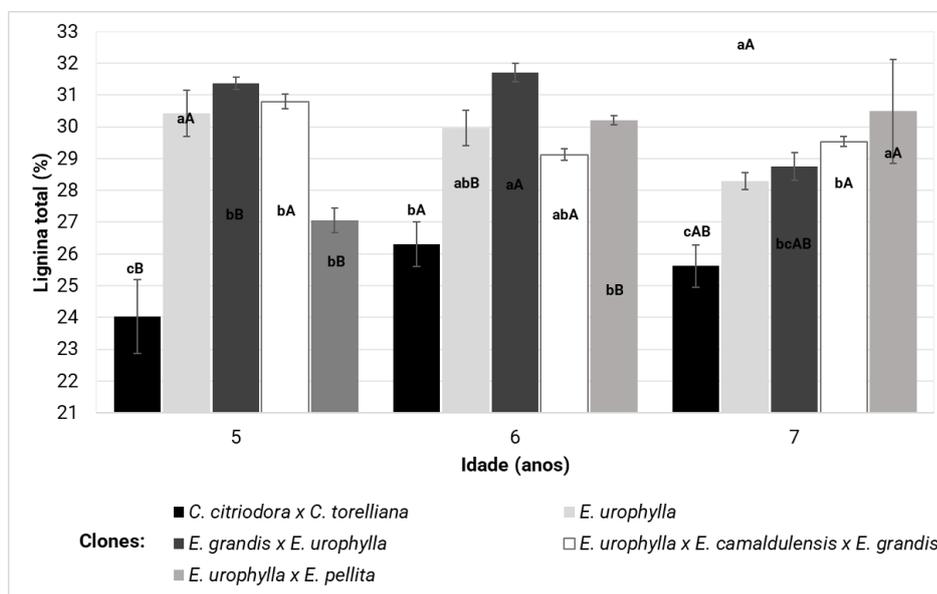
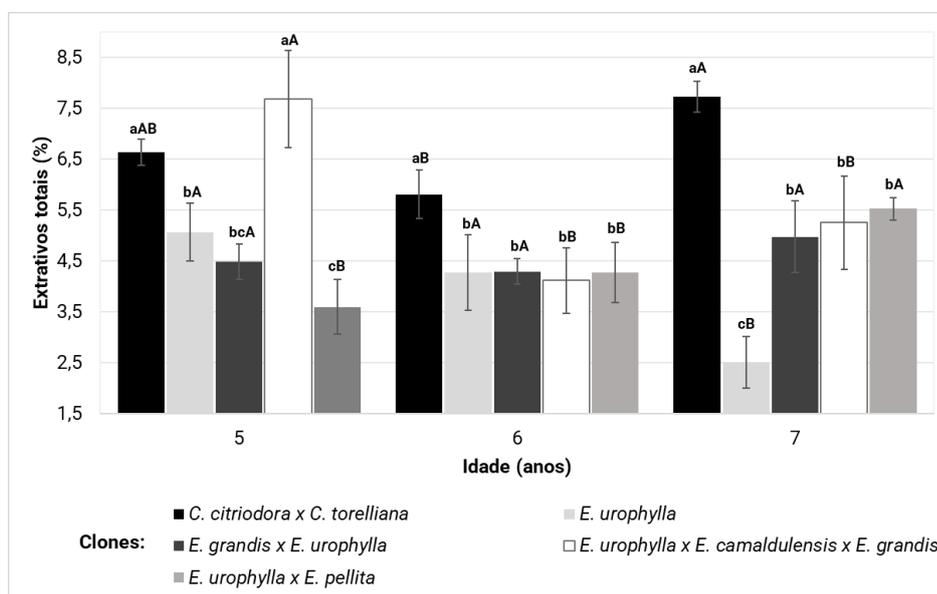
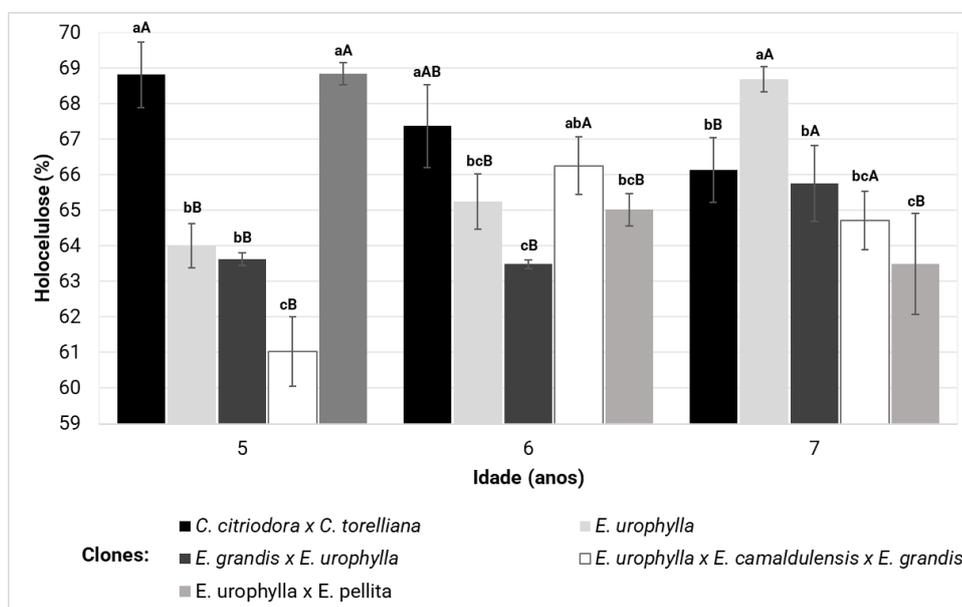


Figura 10 - Teor de extrativos totais (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte da árvore



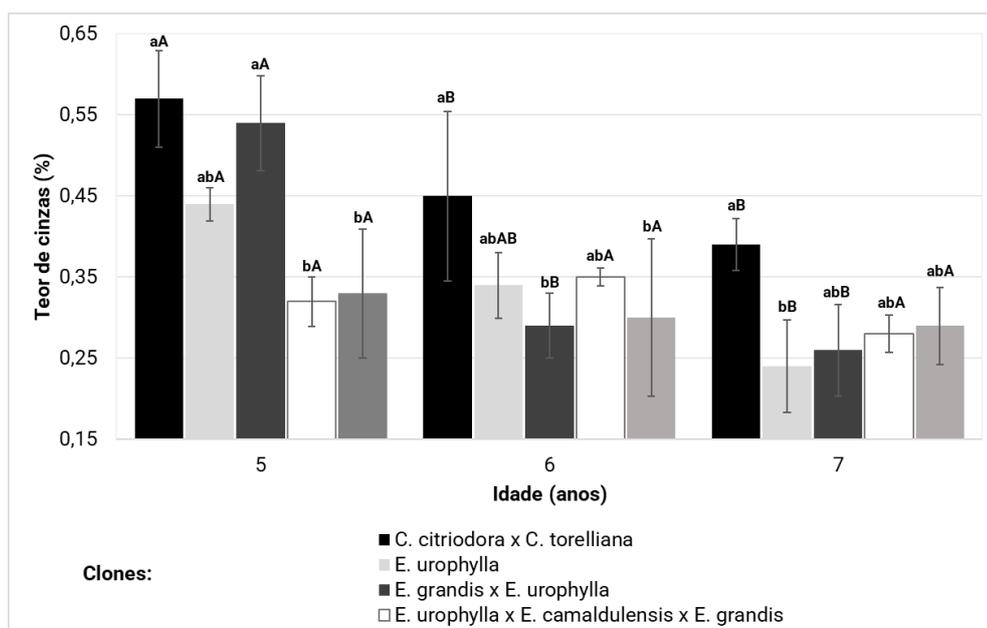
Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Figura 11 - Teor de holocelulose (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte da árvore



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Figura 12 - Teor de cinzas (%) na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte da árvore



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Os valores de lignina total encontrados neste estudo ficaram dentro do esperado baseado na literatura disponível, entre 28 e 32% (PROTÁSIO et al., 2021), com exceção do *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* com valores próximos de 25,5%.

De forma geral, os clones apresentaram um padrão de decréscimo com posterior aumento na idade de sete anos. Isso ocorre porque o teor de lignina sofre alterações de acordo com o avanço da idade da árvore (PEREIRA et al., 2013a). A madeira juvenil possui maiores teores de lignina total em relação a madeira adulta, neste estudo apenas os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* não responderam desta forma, o que pode ser explicado pelo processo de lignificação da madeira não ser expressivo para estes clones (CARNEIRO et al., 2017b), até a idade em que houve o corte das árvores para realizar o estudo. O clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* teve maior incremento de lignina total em relação aos demais, com ganho médio de 6% ao ano.

O processo de formação da lignina na madeira pode ser influenciado por diferentes tipos de eventos, como déficit hídrico, ventos, baixas temperaturas, deficiência mineral, entre outros. Estes eventos afetam a biossíntese de lignina a partir do aumento da atividade de peroxidases e lacases, enzimas responsáveis pela formação da lignina, consequentemente afeta a lignificação celular (DEUS et al., 2022).

Quanto ao teor de extrativos totais, houve efeito da idade em pelo menos uma das idades avaliadas, excluindo-se o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* que não houve diferença significativa e o *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* no qual a idade de seis anos foi estatisticamente igual a cinco e sete. Os valores encontrados variaram de 2,51 a 7,73%, sem ter uma tendência de incremento com o aumento da idade da árvore.

A madeira do clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* teve os maiores valores de extrativos totais, seguido do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* com cinco anos, enquanto o clone que obteve o maior ganho de uma idade para outra foi *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita*, com ganho médio de 24% ao ano. O teor de extrativos encontrados estão de acordo com a literatura consultada (PEREIRA et al., 2013a; ZANUNCIO et al., 2014). Neves et al. (2013) avaliaram clones com cinco anos e encontraram valores médios de 3,2%, valores inferiores ao encontrados neste estudo para a mesma idade.

Os teores de extrativos podem contribuir favoravelmente com o aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, isso varia de acordo com o tipo de extrativos presentes na

madeira. Os ácidos graxos e esteroides são degradados em temperaturas mais baixas que a temperatura final de carbonização, com isso não contribuem com o rendimento do carvão vegetal, enquanto outros se decompõem a uma temperatura mais alta, como os extrativos fenólicos geralmente encontrados em madeiras adultas. Isso possivelmente ocorre devido ao processo de cernificação da madeira, onde ocorre a morte das células do parênquima radial, consumo de amido e aumento no conteúdo de extrativos e tilos (CARNEIRO et al., 2017c; FONTE et al., 2017; KAČÍK et al., 2022).

O teor de holoceluloses apresentou diferenças significativas entre clones e idades sem apresentar um padrão com o aumento da idade de corte, com exceção dos clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e o *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* que apresentaram redução da idade cinco para a sete, sendo 3,88 e 7,78% respectivamente. Os valores variaram de 61,03 a 68,84% e ficaram dentro do encontrado em outros estudos (LOUREIRO et al., 2019; MENUCELLI et al., 2019)

A holocelulose é mais facilmente degradado e sua decomposição térmica ocorre em temperaturas entre 220 e 400 °C, por isso madeiras com baixos teores de holocelulose e altos teores de lignina e extrativos são preferíveis para produção de carvão vegetal, pois aumentam a resistência a degradação térmica e resultam em maiores rendimentos gravimétricos, além disso a degradação da holocelulose ocasiona o aumento da produção de gases não condensáveis e condensáveis durante a carbonização da madeira para produção de carvão vegetal (FIALHO et al., 2019; LOUREIRO et al., 2019).

O teor de cinzas da madeira não demonstrou diferença significativa para idade nos clones *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita*. De forma geral, o teor de cinzas da madeira tendeu a reduzir com o avanço da idade de corte. Castro et al. (2016), Moulin et al. (2015) e Soares et al. (2015) também observaram essa redução, os autores explicaram que provavelmente essa redução ocorreu devido a diminuição da atividade fisiológica da árvore com o aumento da idade, sendo necessário menor quantidade de componentes minerais.

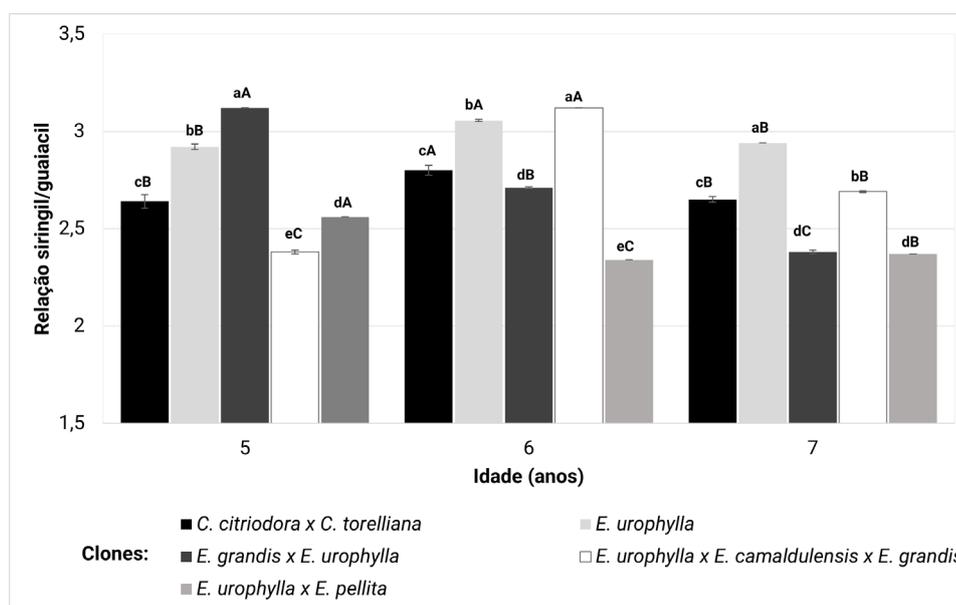
Os clones que tiveram redução média, no teor de cinzas, acima de 10% de um ano para o outro foram *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Os valores variaram de 0,21 a 0,56% e estão de acordo com os resultados encontrados em outros estudos (CASTRO et al., 2016; MOULIN et al., 2015). No entanto, os valores foram maiores que o encontrado para madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos sete anos (0,18%) no estudo realizado por Pereira et al. (2013b).

As cinzas são componentes inorgânicos que compõem a madeira. Seu valor superior em idades de corte mais jovem indica que a biomassa ainda se encontra em fase de crescimento, no qual seu metabolismo necessita de maior quantidade de minerais. Porém, alto teor de cinzas na madeira não é desejável para produção de carvão vegetal, visto que estes componentes não são degradados durante a pirólise e prejudicam o processo de produção de ligas de ferro e causam incrustações e corrosão nos equipamentos e nas tubulações (JARDIM et al., 2017; MOULIN et al., 2015; PEREIRA et al., 2013a).

5.1.8. Relação siringil/guaiacil (S/G)

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre idade e clone para a relação siringil/guaiacil da madeira. Na Figura 13 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 13 - Relação siringil/guaiacil na madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

De modo geral, a relação siringil/guaiacil (S/G) não aumentou com o incremento da idade de corte das árvores. Para os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla*, não houve diferenças significativas entre as idades de cinco e sete anos. Todos os

clones apresentaram diferenças dentro das idades com exceção dos clones *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* que foram estatisticamente iguais na idade sete.

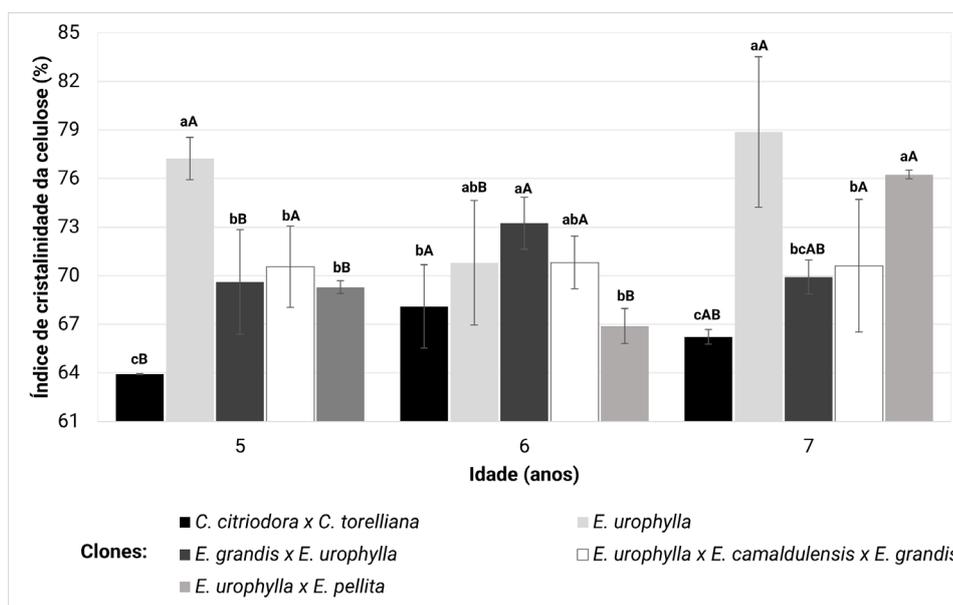
Os valores ficaram entre 2,34 e 3,12, sendo o menor valor encontrado na idade de seis anos para o *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita*. Espera-se que os menores valores de relação S/G influenciem para um maior rendimento gravimétrico e poder calorífico superior da madeira, pois a unidade de guaiacil tem uma estrutura química com um grupo metoxila (-OCH₃) a menos no anel aromático, quando se compara com a lignina tipo siringil, e isso facilita a ocorrência de ligações do tipo carbono-carbono (C=C; C-C; C-O-C) entre os anéis aromáticos, resultando em maior resistência térmica (PROTÁSIO et al., 2017).

Os menores valores encontrados na literatura para clones de *Eucalyptus* corroboram com os resultados encontrados neste estudo. Castro et al. (2013) encontraram valores entre 2,40 e 2,35 para *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis*, respectivamente, aos sete anos.

5.1.9. Índice de cristalinidade da celulose

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre idade e clone para o índice de cristalinidade da madeira. Na Figura 14 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 14 - Índice de cristalinidade da celulose (%) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

O índice de cristalinidade da celulose (IC) não apresentou um padrão com o aumento da idade. Os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* não apresentaram diferença significativa entre as idades de cinco e sete anos. Por outro lado, o índice de cristalinidade da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* não foi afetada pela idade de corte.

Mais da metade dos dados obtidos ficaram acima dos 70%, o maior valor foi encontrado para o *Eucalyptus urophylla*, seguido pelo *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita*. O resultado foi condizente ao encontrado por Pereira et al. (2013b) ao estudar seis clones de eucaliptos aos sete anos, onde encontraram valores que variaram de 67% a 70,06%, mas foram superiores aos encontrados em outros estudos (CHEN et al., 2020; IOELOVICH, 2023).

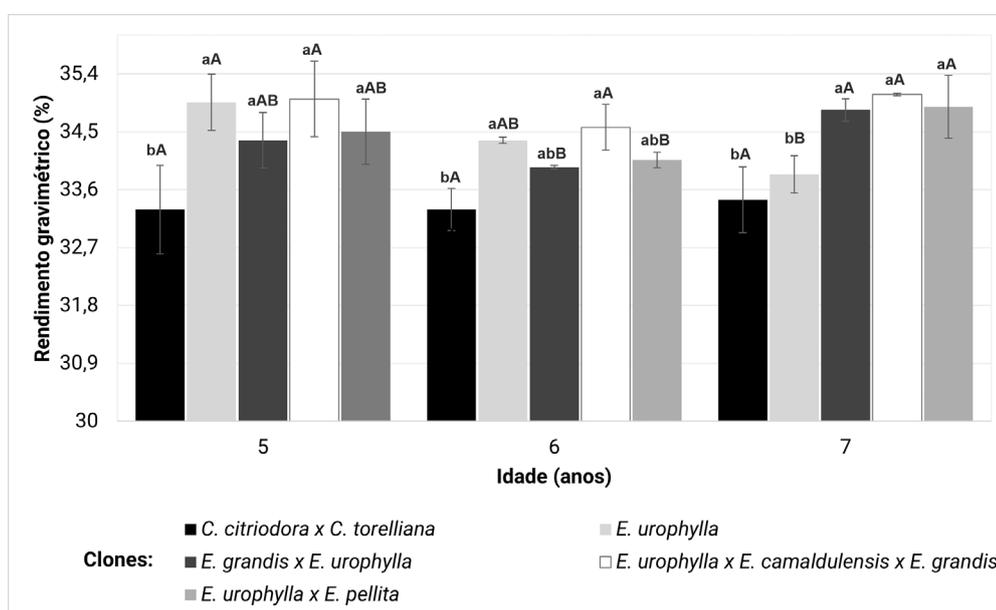
Alguns estudos constataram que o índice de cristalinidade da celulose contribuiu para maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal (CHEN et al., 2020; LOURENÇO et al., 2020), baseando-se no fato de que as regiões amorfas da celulose são mais suscetíveis a ação do calor e conseqüentemente possuem menor estabilidade térmica quando comparadas com as regiões cristalinas. Neste estudo, os resultados seguiram esta tendência, principalmente nas idades cinco e seis anos, onde o *Eucalyptus urophylla* teve os maiores valores de IC e

rendimento gravimétrico, enquanto na idade de sete anos os maiores valores foram do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita*.

5.1.10. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre a idade e clone para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Na Figura 16 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 16 - Rendimento gravimétrico (%) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Para os clones *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* a idade de corte não afetou o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Avaliado o efeito do clone, nota-se que, apenas o clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* se diferenciou dos demais, tendo os menores rendimentos gravimétricos em carvão vegetal. Os valores ficaram dentro do desejado para produção de carvão vegetal e de acordo com os encontrados na literatura (>30%) (CASTRO et al., 2016; PROTÁSIO et al., 2021a).

Em outro estudo, Loureiro et al. (2021) estudando três amostras do híbrido de *Corymbia* (*Corymbia citriodora* x *torelliana*) encontraram valores maiores aos citados anteriormente,

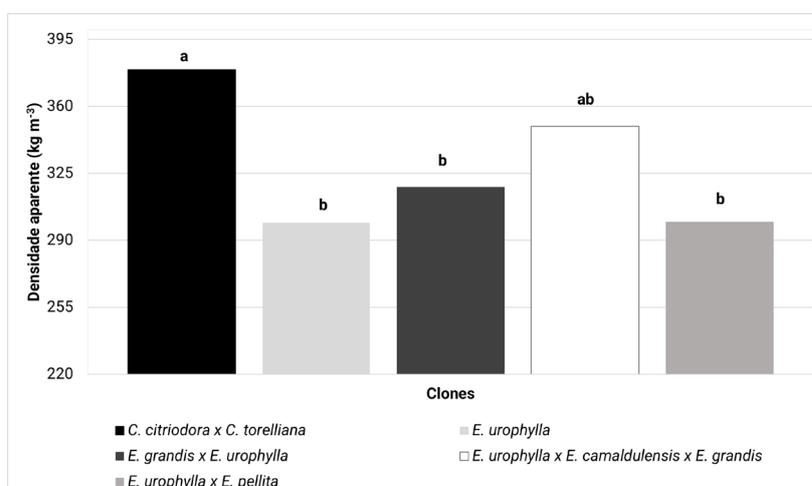
34% (valor médio), sendo esses superiores aos obtidos para clones de *Eucalyptus*, no entanto, não foi encontrado o mesmo nesta pesquisa. O clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* apesar de ter maior densidade básica e extrativos totais, tem maiores teores de holocelulose na madeira, o que pode ter contribuído para o baixo rendimento gravimétrico em carvão vegetal, isso ocorre pois os carboidratos que compõem a holocelulose são facilmente degradados durante o processo de carbonização. Além disso, possivelmente a maior proporção dos extrativos é do tipo ácido graxos e esteroides que são facilmente degradados a baixas temperaturas (VALE et al., 2010).

Os clones *E. urophylla*, *E. grandis* x *E. urophylla*, *E. urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis* e *E. urophylla* x *E. pellita* se destacaram com os maiores valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal, possivelmente influenciados pelo índice de cristalinidade de celulose e lignina total, visto que estes clones possuíam valores maiores que o clone de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, e essas propriedades correlacionaram-se de forma positiva com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

5.1.11. Densidade aparente do carvão vegetal

A análise de variância demonstrou que houve apenas efeito isolado do clone na densidade aparente do carvão vegetal. Na Figura 17 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos estudados.

Figura 17 - Densidade aparente do carvão vegetal (kg/m^3) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey;

Nota-se que não houve diferença significativa entre os clones *E. urophylla*, *E. urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis* e *E. grandis* x *E. pellita*. Os valores de densidade aparente estão próximo dos encontrados na literatura para os clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* e dentro do desejável para uso siderúrgico, que é 250 kg m^{-3} (COSTA et al., 2019; SILVA; ATAÍDE, 2019).

Enquanto para Massuque et al. (2023) é recomendável selecionar material com densidade aparente acima de 380 kg m^{-3} , pois aumenta a densidade energética do carvão vegetal, além de aumentar a quantidade de carbono fixo por unidade de volume, o que remete ao consumo específico do alto forno, ou seja, metros cúbicos de carvão vegetal por tonelada de gusa produzido.

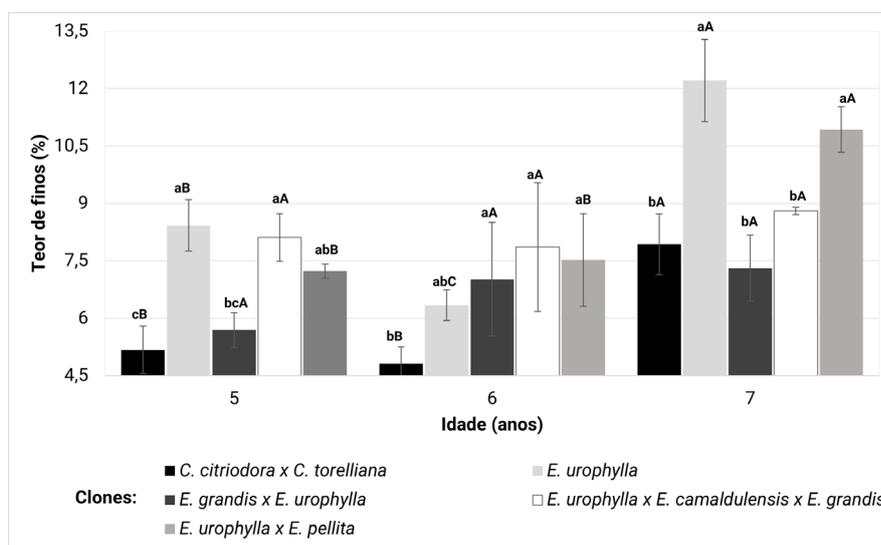
Assim como no estudo realizado por Moutinho et al. (2017), os clones de *Corymbia* apresentaram os maiores valores, devido a relação positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal. Resultado semelhante também foi observado por Costa et al. (2017) e Ramos et al. (2023).

Portanto, deve-se priorizar a seleção de materiais com maior densidade básica, pois a densidade aparente é uma das características que devem ser analisadas no carvão vegetal para fins siderúrgicos, visto que influencia diretamente no aproveitamento do volume do alto forno e na resistência mecânica do carvão vegetal (FIALHO et al., 2022; LOUREIRO et al., 2021).

5.1.12. Teor de finos do carvão vegetal

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre idade e clone para o teor de finos do carvão vegetal. Na Figura 18 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 18 - Teor de finos do carvão vegetal (%) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

A idade de corte das árvores não afetou o teor de finos gerados pelo carvão vegetal para os clones *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*.

A geração de finos, de modo geral, foi maior para os carvões vegetais produzidos com madeira aos sete anos de idade, tendo os clones *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* os maiores valores de friabilidade. Por outro lado, a menor geração de finos foi observada para o *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, independentemente da idade de corte das árvores, sendo que este também foi o clone com maior densidade básica e densidade aparente.

De modo geral, o teor de finos aumentou com o aumento da idade de corte das árvores, o que pode ter sido acarretado pelo aumento da relação cerne/alburno. O cerne, devido sua baixa permeabilidade dificulta a secagem da madeira, além disso, possui menor densidade do que o alburno, portanto, madeiras com maior relação cerne/alburno resultam em um carvão mais friável (FIGUEIRÓ et al., 2020).

Os valores do teor de finos corroboram com a afirmação feita por Pereira et al. (2016) e Ramos et al. (2023), quando dizem que a densidade básica da madeira mais elevada resulta em maiores densidades do carvão vegetal e consequentemente uma maior resistência mecânica e menor geração de finos, justificando, em parte, a menor geração de finos observada para o clone

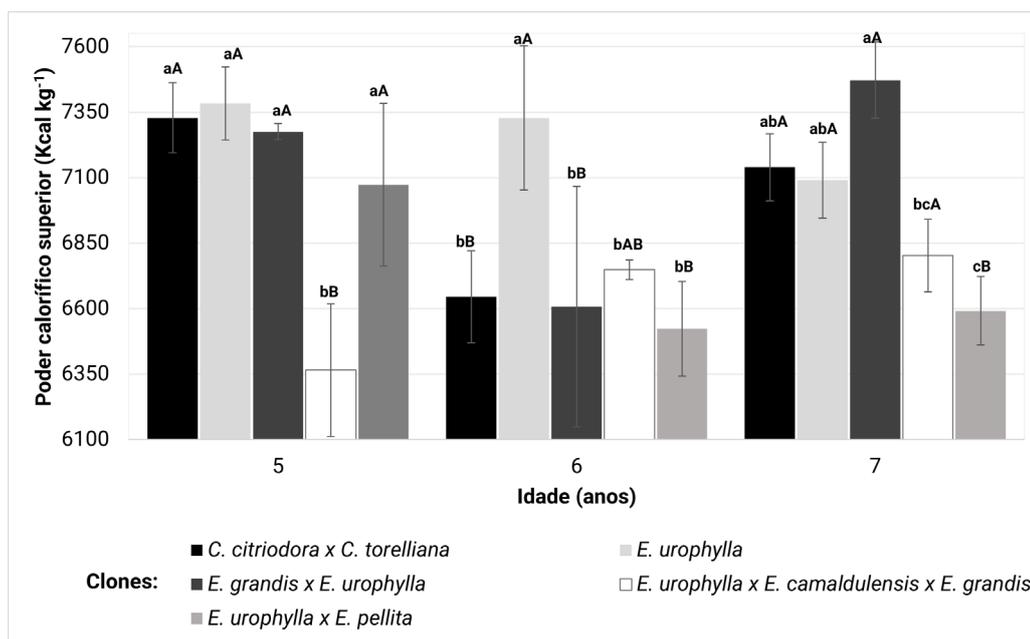
Corymbia citriodora x *C. torelliana*, outro fator a ser considerado, é a menor relação cerne/alburno deste clone.

Durante toda a cadeia produtiva do carvão vegetal ele está sujeito a abrasão e choques mecânicos o que resulta na redução de sua granulometria, portanto, é desejável um carvão menos friável. Quanto mais friável for, maior será sua propensão de gerar partículas finas durante o manuseio e transporte o que indica baixa qualidade e interfere negativamente durante o processo siderúrgico (SILVA; ATAÍDE, 2019).

5.1.13. Poder calorífico superior do carvão vegetal

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre idade e clone para o poder calorífico superior do carvão vegetal. Na Figura 19 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 19 - Poder calorífico superior do carvão vegetal (Kcal kg^{-1}) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

Observa-se que o poder calorífico do carvão vegetal produzido a partir da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* não foi afetado pela idade de corte das árvores.

De modo geral, o poder calorífico superior do carvão vegetal reduziu da idade de cinco para seis anos, seguido por um aumento aos sete anos. Com exceção do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*, que teve um aumento médio de 6% na idade seis e sete anos. Este padrão de redução com posterior aumento, pode estar associado ao comportamento do teor de extrativos totais, que teve reação similar para o *C. citriodora* x *C. torelliana* e o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

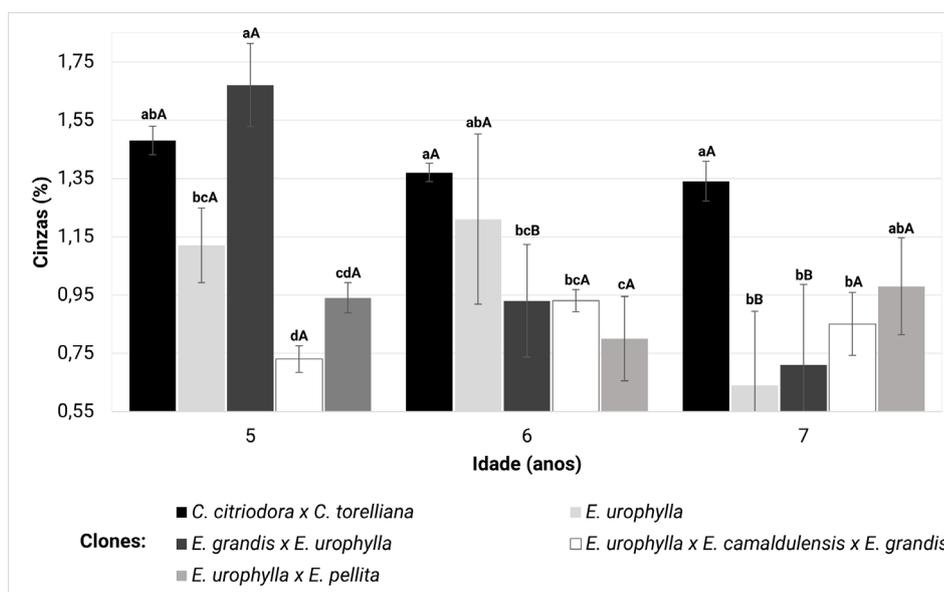
Salienta-se que, a maioria, dos dados encontrados ficaram acima dos 7000 kcal kg⁻¹, valores próximos aos encontrado por Castro et al. (2016) para três clones de *Eucalyptus*. O clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* foi o único que não atingiu este valor em nenhuma das idades, sendo afetado sobretudo pelo teor de cinzas da madeira, pois apresentou um dos maiores valores.

O poder calorífico superior do carvão vegetal é quase 40% superior ao da madeira devido a degradação parcial da celulose e hemicelulose, tendo como resultado concentração de carbono e redução nos teores de oxigênio (FIALHO et al., 2019).

5.1.14. Teor de cinzas do carvão vegetal

A análise de variância demonstrou que houve interação significativa entre idade e clone para a teor de cinzas do carvão vegetal. Na Figura 21 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 21 - Teor de cinzas (%) do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas representam diferença significativa entre clones; Letras maiúsculas representam diferença significativa entre idades.

A idade de corte das árvores influenciou no teor de cinzas do carvão vegetal apenas para os clones, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. De modo geral, o teor de cinzas do carvão vegetal desses clones teve uma tendência de reduzir com o aumento da idade, principalmente da idade seis para sete, mesmo que sem apresentar diferença significativa, os valores dos clones de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis*, em média 21% com o aumento da idade.

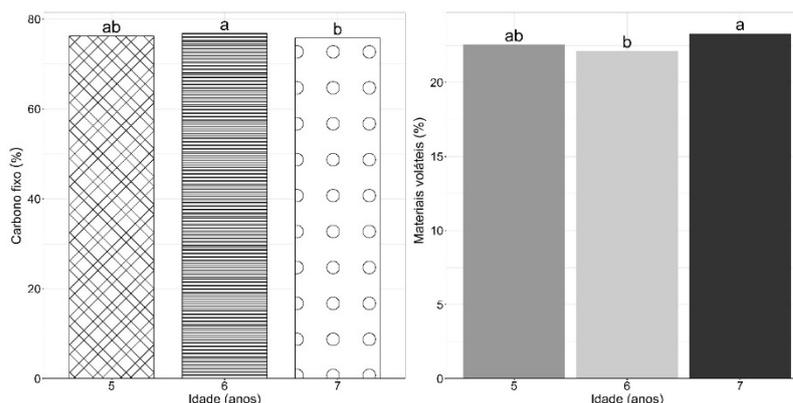
De acordo com Canal et al. (2020a) o desejável é que seja menor 5%, porém, para as indústrias siderúrgicas o limite indicado é de 1% (SANTOS et al., 2011). Este valor foi atingido na idade sete anos, com exceção do clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*. Figueiró et al. (2019) também encontraram valores acima de 1% e atribuíram a presença de contaminantes após a produção, também pode ser consequência das características físico-químicas da madeira (OLIVEIRA et al., 2020).

As cinzas diminuem o poder calorífico e ocasionam o desgaste do alto forno, além de influenciar negativamente a qualidade do aço devido ao acúmulo de minerais óxidos, o que aumentar as chances de trincas e fissuras nas ligas metálicas (SILVA; ATAÍDE, 2019).

5.1.15. Carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal

A análise de variância demonstrou que houve apenas efeito isolado da idade de corte das árvores no teor de carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal. Na Figura 20 são apresentados os valores médios em função dos tratamentos.

Figura 20 - Carbono fixo (%) e teor de materiais voláteis (%) do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey, para cada variável.

Assim como o estudo realizado por Ramos et al. (2023) o teor de carbono fixo e teor de voláteis do carvão vegetal não apresentaram variação entre os clones. Os valores ficaram dentro do citado na literatura e desejável para as indústrias siderúrgicas para o carbono fixo, o valor recomendado é entre 75% e 80%. Quanto maior o carbono fixo menor o volume ocupado pelo carvão vegetal dentro do alto forno durante a redução do minério de ferro, logo menor será o consumo específico do redutor e maior a produtividade do alto forno (FIALHO et al., 2019). Para o material volátil o valor desejado para indústria siderúrgica é de no máximo 25% (CASTRO et al., 2016), sendo que independentemente da idade todos ficaram dentro deste limite.

O teor de carbono fixo teve um acréscimo de 1% da idade de cinco para seis anos, seguido por uma redução aos sete anos. Enquanto o teor de material volátil apresentou uma diminuição da idade cinco para seis anos e um leve aumento da idade seis para sete, próximo de 6%.

Importante ressaltar que antes de realizar comparações entre os valores encontrados na literatura, que estes parâmetros são influenciados tanto pela madeira de origem, quanto pelo processo de carbonização. Portanto, o tempo de carbonização e a temperatura final

desencadeiam um aumento no teor de carbono fixo e uma redução do teor de material volátil, vale salientar que neste estudo foi utilizada a mesma marcha de carbonização para todos os clones analisados.

5.1.16. Estimativa da massa de carvão vegetal

Na tabela 8 estão apresentados os valores médios para o incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), estimativa de massa seca da madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e estimativa de massa de carvão vegetal ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), nos diferentes clones e idades estudados.

Tabela 8 - Valores médios para incremento médio anual, massa seca de madeira e massa de carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores

| Clone | Idade | IMA ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) ¹⁾ | MSM ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) ¹⁾ | MCV ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) ¹⁾ |
|---|-------|---|--|--|
| <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i> | 5 | 28,196 | 16 | 5,5 |
| | 6 | 36,721 | 22 | 7,3 |
| | 7 | 51,194 | 32 | 10,7 |
| <i>E. urophylla</i> | 5 | 58,523 | 26 | 8,9 |
| | 6 | 52,427 | 24 | 8,2 |
| | 7 | 48,731 | 24 | 8,0 |
| <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | 5 | 41,330 | 18 | 6,4 |
| | 6 | 39,949 | 20 | 6,8 |
| | 7 | 43,191 | 24 | 8,1 |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> | 5 | 53,024 | 25 | 8,9 |
| | 6 | 34,358 | 19 | 6,5 |
| | 7 | 40,985 | 22 | 7,7 |
| <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> | 5 | 53,618 | 25 | 8,8 |
| | 6 | 43,645 | 21 | 7,3 |
| | 7 | 56,663 | 28 | 9,7 |

Em que: IMA: Incremento médio anual (sem casca) em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$; MSM: Massa seca de madeira em $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$; MCV: Massa de carvão vegetal, em $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$.

De acordo com o IBÁ (2022) o potencial produtivo do Brasil é superior ao de outras regiões do mundo e em 2021 o incremento médio anual (IMA) foi de $38,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, neste estudo o IMA foi de $45,50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os valores de incremento médio anual estão próximos dos encontrados em outros estudos para o gênero de *Eucalyptus* (RAMOS et al., 2023).

O clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* teve a maior massa seca de madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) aos sete anos, em virtude do maior incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). O ganho médio de massa seca de madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e massa de carvão vegetal ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) deste foram maiores que 33% e 45% para as idades de seis e sete anos, respectivamente. O *Corymbia citriodora* x *C. torelliana* obteve uma massa de carvão vegetal quase 25% maior do que as massas produzidas pelos *Eucalyptus* na idade de sete anos, com exceção do *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* que teve a segunda maior massa de carvão, sendo apenas 10% menor que a do *Corymbia*, porém não atingiu a densidade básica recomendada para produção de carvão vegetal, de 500 kg m^{-3} . O clone *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* obteve a terceira maior massa de carvão vegetal e atingiu a densidade básica recomendada na idade de sete anos.

Nogueira et al. (2019) encontraram para os cruzamentos triplos os melhores valores de IMA aos seis anos, enquanto Santos et al. (2013) observaram um ganho de 43,4% de IMA quando comparado ao restante dos clones de *Eucalyptus* estudados. Segundo os autores, os materiais genéticos produzidos a partir de cruzamentos triplos, os chamados “*three-way-cross*” ou “*tricross*”, podem apresentar melhor adaptabilidade ao ambiente devido ao maior conjunto gênico de interesse em um único genótipo, isso o torna mais estável diante a mudanças ambientais. No presente estudo o clone *E. urophylla* x *E. camaldulensis* x *E. grandis*, *tricross*, teve ganho médio de massa seca de madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e massa de carvão vegetal ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) próximo de 18% da idade seis para sete anos.

6. CONCLUSÕES

As propriedades da madeira mais afetadas pela idade de corte foram, a densidade básica da madeira, relação cerne/alburno e teor de material volátil que aumentaram com o avanço da idade e os teores de cinza da madeira e do carvão vegetal que reduziram conforme aumentava a idade.

Aos cinco anos apenas o clone *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* poderia ser recomendado para produção de carvão vegetal, pois atende o desejado pela siderurgia, com a densidade básica acima de 500 kg m^{-3} . E a partir dos seis anos o *tricross*, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* também poderia ter sua idade de corte reduzida.

O clone *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* atingiu densidade básica recomendada para produção de carvão vegetal aos sete anos, o maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e a terceira maior massa de madeira e carvão vegetal por hectare.

Dentre os materiais avaliados o clone de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* aos sete anos apresentou melhor desempenho para utilização nas indústrias siderúrgicas, por apresentar maior densidade básica da madeira, maior densidade aparente do carvão vegetal, conseqüentemente maior massa de madeira e massa de carvão por hectare, respectivamente.

Entre as idades, a que obteve os maiores valores de densidade básica da madeira, teor de extrativos totais, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e massa seca de madeira e carvão vegetal foi a idade sete.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. N. F. et al. Heartwood variation of eucalyptus urophylla is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117743, 2020.
- ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philladelphia, 1982.
- BAUMHARDT NETO, R. Raio X. *Em: Técnicas de caracterização de polímeros*. Artliber ed. São Paulo. p. 41–60.
- BECKER, G. S. et al. Relations between wood variables and how they relate to tree size variables of tropical African tree species. **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 4, p. 1101–1112, 2012.
- BENITES, P. K. R. M. et al. Caracterização tecnológica da madeira de híbridos de eucalipto irrigados e fertirrigados. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1716–1728, 2018.
- BICHEL, A.; TELLES, T. S. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127714, 2021.
- BRAWNER, J. T. et al. Relationships between early growth and Quambalaria shoot blight tolerance in *Corymbia citriodora* progeny trials established in Queensland, Australia. **Tree Genetics & Genomes**, v. 7, n. 4, p. 759–772, 2011.
- BRAZ, R. L. et al. Caracterização Anatômica, Física e Química da Madeira de Clones de Eucalyptus Cultivados em Áreas Sujeitas à Ação de Ventos. **Revista Ciência da Madeira**. v. 5, n. 2, p. 127–137, 2014.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.
- BRITO, A. S. et al. Effect Of Planting Spacing In Production And Permeability Of Heartwood And Sapwood Of *Eucalyptus* Wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, 2019.
- BROWNING, B. L. **Methods of Wood Chemistry**. Interscien ed. New York.
- CACHOEIRA, J. N. et al. Mercado interestadual de carvão vegetal no estado do Tocantins. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 2, p. 258–265, 2019.
- CANAL, W. D. et al. Impact of Wood Moisture in Charcoal Production and Quality. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, 2020. a.
- CANAL, W. D. et al. Effect of age on heartwood / sapwood relationship, extractive content, and permeability of teak wood. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1698, 2020. b.
- CARNEIRO, A. de C. O. et al. Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375–381, 2014.

CARNEIRO, A. de C. O. et al. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 473, 2017. a.

CARNEIRO, A. de C. O. et al. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n. 3, p. 127–135, 2017. b.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 627–635, 2013.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of eucalyptus clones. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 551–560, 2016.

CHEN, H. et al. Comparative pyrolysis behaviors of stalk, wood and shell biomass: Correlation of cellulose crystallinity and reaction kinetics. **Bioresource Technology**, v. 310, p. 123498, 2020.

CLARK, D. A. et al. Field-quantified responses of tropical rainforest aboveground productivity to increasing CO₂ and climatic stress, 1997–2009. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, n. 2, p. 783–794, 2013.

COELHO, P. D. **Análise comparativa da idade de corte de plantações florestais com base em unidades volumétricas e gravimétricas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

COSTA, A. C. P. R. et al. Classification of commercial charcoal for domestic use by near infrared spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, v. 127, 2019.

COSTA, A. C. et al. Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8, n. 1, 2017. a.

COSTA, A. C. S. et al. Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 8, n. 1, p. 10–20, 2017. b.

COUTO, A. M. et al. Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, v. 34, n. 2, p. 531–538, 2023.

DADSWELL, H. E. *The Anatomy of Eucalypt Woods*. Melbourne, p. 1–28, 1972.

DELATORRE, F. M. et al. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL. *Em: Engenharia Florestal: Desafios, limites e potencialidades*. p. 639–653. 2020.

DEUS, D. A. De. et al. Lignina: uma importante tecnologia química da madeira. **E-Acadêmica**, v. 3, n. 3, p. e7233391, 2022.

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio**

agrossilvipastoril. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

FAN, J. et al. Effects of site conditions on growth and wood properties of *Populus* × *euramericana* cv. ‘74/76’. **Journal of Forestry Research**, v. 34, n. 2, p. 401–414, 2022.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Gruyter.

FIALHO, L. F. et al. 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. a.

FIALHO, L. de F. et al. Bio-coal production with agroforestry biomasses in Brazil. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 2019. b.

FIALHO, L. de F. et al. Application of univariate and multivariate statistical analyzes in clonal selection of *Eucalyptus* spp. for charcoal production. **Ciencia Florestal**, v. 32, n. 3, p. 1659–1683, 2022.

FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; RIBEIRO, G. B. D.; PERES, L. C.; CANDIDO, W. L.; ARAÚJO, M. A. R. Technical and economic viability of *Eucalyptus* sp. coppice for charcoal production. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1–8, 2020.

FIGUEIRÓ, C. G. et al. Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 3, p. 1–8, 2019.

FOELKEL, C. E. B. et al. Estudo comparativo das madeiras de *E. saligna*, *E. Paniculata*, *E. Citriodora*, *E. Maculata* e *E. Tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, n. 10, p. 17–37, 1975.

FONTE, A. P. N. et al. Propriedades físicas e químicas da madeira de cerne e alburno de *Cryptomeria japonica*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 3, p. 277–285, 2017.

FORNES, F. et al. Analysis of two biochars and one hydrochar from different feedstock: focus set on environmental, nutritional and horticultural considerations. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 40–48, 2015.

FROMM, Jorg. **Cellular Aspects of Wood Formation**. 1. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 20

GATTO, D. A. et al. Estimativa da idade de segregação do lenho juvenil e adulto por meio de parâmetros anatômicos para madeira de *Luehea divaricata* Mart. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 4, p. 535–540, 2008.

GOLDSCHIMID, O. **O ultraviolet spectra**. New York: Wiley Interscience: SARKANEN, K.; LUDWING, C. H. (Eds) Lignins, 1971.

GOMIDE, José Livio; DEMUNER, Braz José. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, v. 47, n. 8, p. 36–38, 1986.

- GOMINHO, J.; PEREIRA, H. The influence of tree spacing in heartwood content in *eucalyptus globulus* Willd. **Wood and Fiber Science**, v. 37, n. 4, p. 582–590, 2005.
- GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C. Caracterização tecnológica da madeira de *Acacia mangium* Willd em plantio consorciado com eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 286–295, 2012.
- HILL, K.; JOHNSON, L. Systematic studies in the eucalypts. 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea: Journal of plant systematics**, v. 6, p. 185–504, 1995.
- IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. RELATÓRIO ANUAL 2022. 2023. Disponível em: <chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- JARDIM, J. M. et al. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **O papel**, v. 78, n. 11, p. 122–129, 2017.
- KAČÍK, F. et al. Colour and Chemical Changes of Black Locust Wood during Heat Treatment. **Forests**, v. 14, n. 1, p. 73, 2022.
- KUMAR, R. et al. Effect of carbonization temperature on properties of natural fiber and charcoal filled hybrid polymer composite. **Composites Part B: Engineering**, v. 217, p. 108846, 2021.
- LEME, M. M. V. et al. Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 219–242, 2018.
- LENG, E. et al. In situ structural changes of crystalline and amorphous cellulose during slow pyrolysis at low temperatures. **Fuel**, v. 216, p. 313–321, 2018.
- LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. [s.l.]: Springer, Berlin, Heidelberg, 1992.
- LOCOSSELLI, G. M. et al. Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 52, p. 33358–33364, 2020.
- LOPES, E. D. et al. Physical and chemical properties of wood from *Eucalyptus* and *Corymbia* clones in different planting densities. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 2, 2023.
- LOPES, E. D. et al. Influência do espaçamento de plantio na produção energética de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **FLORESTA**, v. 47, n. 1, p. 95, 2017.
- LOUREIRO, B. A. et al. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.
- LOUREIRO, B. A. et al. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 2019.

LOURENÇO, A. et al. Cellulose Structural Changes during Mild Torrefaction of Eucalyptus Wood. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 2831, 2020.

LUBE, V. M. et al. Madeira juvenil x madeira adulta na produção de celulose. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 22, n. 1, 2013.

PEREIRA, B. L. C. et al. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal Correlations among the heart/sapwood ratio of eucalyptus wood, yield and charcoal properties. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217–225, 2013.

MALINOWSKI, L. R.; NAKASHIMA, T.; ALQUINI, Y. Caracterização Morfoanatômica das Folhas Jovens de *Eucalyptus globulus* Labill ssp. *bicostata* (Maiden et al.) J.B. Kirkpat. (Myrtaceae). **Latin American Journal of Pharmacy (formerly Acta Farmacéutica Bonaerense)**, v. 28, n. 5, p. 756–7561, 2009.

MARINI, L. J. et al. Estimativa da resistência à tração nas madeiras de dez espécies de eucalipto em função de parâmetros anatômicos e da densidade aparente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 4, 2022.

MARTIN, A. R. et al. Wood nitrogen concentrations in tropical trees: phylogenetic patterns and ecological correlates. **New Phytologist**, v. 204, n. 3, p. 484–495, 2014.

MASSUQUE, J. et al. Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, p. 527–535, 2021.

MASSUQUE, J. et al. Potential of charcoal from non-commercial *Corymbia* and *Eucalyptus* wood for use in the steel industry. **Renewable Energy**, v. 211, p. 179–187, 2023.

MASSUQUE, J. et al. Evaluating the Potential of Non-commercial *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. for Bioenergy in Brazil. **Bioenergy Research**, v. 1, p. 1–12, 2022.

MENESES, V. A. et al. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 101–116, 2015.

MENUCELLI, J. R. et al. Potential of *Hevea brasiliensis* Clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* Wood as Raw Materials for Bioenergy Based on Higher Heating Value. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 992–999, 2019.

MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacings. **Trees**, v. 23, n. 2, p. 367–372, 2009.

MOISÉS, V. B. R. et al. Estudo Comparativo Da Carbonização De Madeira E Arroz. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 16, n. Especial, 2019.

MOLINARI, L. V. et al. Clonal microplant production of *Corymbia maculata*: effect of chemical sterilisation, plant growth regulator, gas exchange, activated charcoal and lighting. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 85, n. 1, p. 40–48, 2023.

- MONTOYA, J. D. M. et al. Chemical composition and energy potential of woody species in dry forest: subsidies for sustainable forest management. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 1, p. 1–15, 2023.
- MOSIEJ, J. et al. Biomass Production in Energy Forests short rotation plantations. **Forests and Energy**, 2012.
- MOULIN, J. C. et al. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 199–208, 2015.
- MOUTINHO, V. H. P. et al. Characterization and statistical correlation between charcoal's physical and mechanical properties of eucalyptus and corymbia clones. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1095–1103, 2017.
- NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319, 2011.
- NEVES, T. A. et al. Qualidade da madeira de clones de Eucalyptus em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 2, p. 139–148, 2013.
- NOGUEIRA, T. A. P. C. et al. Estimativa de parâmetros genéticos em progênies de irmãos completos de eucalipto e otimização de seleção. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, 2019.
- NONES, D. L. et al. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de eucalyptus benthamii. **FLORESTA**, v. 45, n. 1, p. 57, 2014.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Carbonization temperature and charcoal properties at different positions in rectangular kiln. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1–8, 2020.
- OLIVEIRA NETO, S. N. et al. Produção e distribuição de biomassa em Eucalyptus camaldulensis Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 15–23, 2003.
- ORIGINLAB, CORPORATION. **ORIGIN (PRO)**. Northampton, MA, USA OriginLab Corporation, 2023.
- PAES, J. B. et al. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 10, n. 3, p. 437–442, 2015.
- PALMA, H. A. L. et al. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. **Cerne**, v. 16, p. 141–148, 2010.
- PARRY, M. A. J. Rubisco Activity: Effects of Drought Stress. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 833–839, 2002.
- PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 90–100, 2005.

- PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592, 2013. a.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545–557, 2016.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Correlations among the heart/sapwood ratio of eucalyptus wood, yield and charcoal properties. **Scientia Forestalis**, 2013. b.
- PEREIRA, K. D. et al. Função discriminante de Fisher para classificação do carvão vegetal de clones de Corymbia e Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, 2021.
- PRATIWI, J.; MANSUR, I.; WULANDARI, A. S. Application of kaliandra (*Calliandra calothyrsus* Meissn.) myco-seedcake to support energy forest establishment. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1359, n. 1, p. 012073, 2024.
- PROTÁSIO, T. de P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, 2011.
- PROTÁSIO, T. de P. et al. Selection of Eucalyptus clones for the charcoal and bioenergy production by univariate and multivariate techniques. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 97, p. 15–028, 2013.
- PROTÁSIO, T. de P. et al. Influence of Extractives Content and Lignin Quality of Eucalyptus Wood in the Mass Balance of Pyrolysis Process. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 1, p. 175–189, 2021.
- PROTÁSIO, T. de P. et al. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de Eucalyptus spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 465–477, 2014.
- PROTÁSIO, T. de P. et al. Classificação de clones de Eucalyptus por meio da relação siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, 2017.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 11 set. 2023.
- RAMOS, D. C. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de Eucalyptus com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, p. e48302, 2023.
- REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. *Em: Embrapa Floresta*. Colombo: Embrapa Florestas, 2013. p. 255.
- REIS, A. A. Dos et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus urophylla em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277–290, 2012.
- RESENDE, R. T. et al. Air-drying of eucalypts logs: Genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 316–324, 2018.

RIBEIRO, G. B. de D. et al. Economic viability of four charcoal productive systems from minas gerais state. **Revista Árvore**, v. 44, 2020.

RODRIGUES, Thaisa; BRAGHINI JUNIOR, Aldo. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, p. 104670, 2019.

SANCHEZ, D. GRANADOS; LOPEZ-RIOS, G. F. Fitogeografia e ecología do gênero Eucalipto. **Rev. Chapingo ser. ciência. para. ambiente**, v. 13, n. 2, 2007.

SANTANA, W. M. S. et al. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal Eucalyptus. **CERNE**, v. 18, n. 1, p. 1–8, 2012.

SANTOS, R. C. Dos et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221–230, 2011.

SANTOS, R. C. et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657–669, 2016.

SANTOS, G. A. et al. Adaptabilidade de híbridos multiespécies de Eucalyptus ao Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 759–769, 2013. a.

SANTOS, G. A. et al. Adaptabilidade de híbridos multiespécies de Eucalyptus ao Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 759–769, 2013. b.

SCHULZ, H. R. et al. Avaliação de propriedades termoquímicas e físico-mecânicas de três espécies florestais de rápido crescimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, 2020.

SEGAL, L. et al. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.

SETTE JUNIOR, C. R. et al. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de Eucalyptus grandis W. Hill. ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 979–990, 2010.

SHAHVERDI, M. et al. The Impact of red heartwood on drying characteristics and mass transfer coefficients in beech wood. **Austrian Journal of Forest Science**, v. 130, n. 2, p. 85–101, 2012.

SIEBENEICHLER, E. A. et al. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de Eucalyptus cloeziana. **Revista Ciência da Madeira**. v. 8, n. 2, p. 82–94, 2017.

SILVA, P. H. Da et al. Avaliação da eficiência técnica de clones de eucalipto em escala comercial: uma abordagem empregando Data Envelopment Analysis (DEA). **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 421, 2020.

- SILVA, R. C. Da et al. Avaliação dos índices de qualidade energética do fuste e do galho do clone de eucalyptus spp. *Em: Tecnologia de Produtos Florestais: pesquisas e desenvolvimento*. Editora Científica Digital, 2022. p. 69–81.
- SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product yields and characterization. *Energy*, v. 172, p. 509–516, 2019.
- SILVA, M. M.; FERREIRA, V. de O. Análise comparativa do clima de Araçuaí, Pedra Azul e Itamarandiba, na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha. *Caderno de Geografia*, 2011.
- SILVA, W. A. S. **Avaliação da influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- SINDIFER. Anuário Estatístico – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. 2022. Disponível em: <http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>. Acesso em: 11 out. 2023.
- SLOT, M.; WINTER, K. The Effects of Rising Temperature on the Ecophysiology of Tropical Forest Trees. *Em: Springer, Cham*, 2016. p. 385–412.
- SOARES, V. C. et al. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. *Cerne*, v. 21, n. 2, p. 191–197, 2015.
- SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 38, n. 3, p. 543–549, 2014.
- STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de Eucalyptus viminalis para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. *Boletim de Pesquisa Florestal*, v. 16, n. 16, p. 55–59, 1988.
- TAMBARUSSI, E. V. et al. Are tree breeders properly predicting genetic gain? A case study involving Corymbia species. *Euphytica*, v. 214, n. 8, p. 150, 2018.
- TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta, USA: TAPPI Standard Method, 1996. a.
- TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta, USA: Cd-Rom, 1996. b.
- TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, USA: TAPPI Standard Method, 1996. c.
- TIENNE, D. L. da C. et al. Influência do espaçamento no ângulo das microfibrilas e comprimento de fibras de clone de eucalipto. *Revista forestal latinoamericana*, v. 24, n. 1, p. 67–83, 2009.
- VALE, A. T. Do; DIAS, I. S. SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, v. 20, n. 1, p. 137–145, 2010.

VEGA, M. et al. Modelling wood property variation among Tasmanian Eucalyptus nitens plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 491, p. 119203, 2021.

VIDAURRE, G. et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469–480, 2011.

VITAL, Benedito Rocha. **Métodos de determinação da densidade da madeira** Viçosa - MG, 1984. p. 21.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Chemical and energetic characterization of eucalyptus grandis × eucalyptus urophylla clones subject to wind damage. **Revista Árvore**, v. 43, n. 4, 2019.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Anatomical, ultrastructural, physical and mechanical wood properties of two-year-old eucalyptus grandis × eucalyptus urophylla clones. **Revista Árvore**, v. 42, n. 2, 2018.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 369–374, 2014.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. Van. **Wood Variation its Causes and Control**. Berlin, Heidelberg.