



BARBARA MONTEIRO BAUTI

**QUALIDADE DA MADEIRA E SUA RELAÇÃO COM OS RENDIMENTOS E
CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTOS**

LAVRAS - MG

2023

BARBARA MONTEIRO BAUTI

**QUALIDADE DA MADEIRA E SUA RELAÇÃO COM OS RENDIMENTOS E
CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Orientador

LAVRAS - MG

2023

BARBARA MONTEIRO BAUTI

**QUALIDADE DA MADEIRA E SUA RELAÇÃO COM OS RENDIMENTOS E
CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 14 de fevereiro de 2023.

Ms. Fabíola Magalhães Mendes

Ms. Nayara Tamires da Silva Carvalho

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Orientador

LAVRAS - MG

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde e força diante aos desafios. Aos meus pais, pelo incentivo, apoio incondicional e por serem alicerce para minhas realizações. A minha irmã Victória pelo companheirismo e por fazer da minha rotina mais leve.

Aos meus amigos, agradeço pelos momentos vividos nos últimos anos, pelo suporte e por comemorarem comigo cada conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho, pelas oportunidades, incentivo e confiança durante minha formação acadêmica. À Universidade Federal de Lavras pela excelência em ensino.

Por fim, a todos que cruzaram minha trajetória na universidade e nas empresas que atuei, por contribuírem com minha construção profissional e pessoal, minha eterna gratidão.

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi analisar a qualidade da madeira e sua relação com os rendimentos gravimétricos e as características de qualidade do carvão vegetal em clones de eucaliptos. Para amostragem, foram utilizados clones de *Eucalyptus spp.* aos 6 anos de idade, provenientes de teste clonal plantados em espaçamento 6 m x 1 m, pertencentes a empresa APERAM BioEnergia, localizada no município de Itamarandiba, Minas Gerais, Brasil. Foram realizadas análises das propriedades físicas e químicas da madeira, além da carbonização e análise da qualidade do carvão produzido em laboratório. As análises da composição monomérica dos polissacarídeos foram realizadas no Laboratório de Análises REQUIMTE – Rede Química e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal. Os resultados obtidos mostraram que o clone 8 apresentou a maior densidade básica e menor consumo específico de madeira. Os clones 5 e 8 foram os destaques em relação aos rendimentos gravimétricos de carvão e carbono fixo, além da qualidade do carvão vegetal produzido. As associações mais importantes observadas entre as características da madeira e do carvão ocorreram entre o rendimento gravimétrico de carvão com o teor de lignina ($r=0,7562$) e o teor de holocelulose ($r=-0,7664$); o rendimento em líquido pirolenhoso com o teor de xilose ($r=-0,8065$); o rendimento em carbono fixo com o teor de extrativos em etanol ($r=0,8173$) e; o teor de cinzas do carvão com os teores de lignina ($r=0,6434$) e cinzas ($r=0,5761$) da madeira.

Palavras-chave: qualidade da madeira, carvão vegetal, carboidratos da madeira.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the wood quality and the relation with the yields and charcoal characteristics from six eucalypts clones. Ten *Eucalyptus spp.* clones at six years of age, from a clonal test established in a 6m x 1m spacing, belonging to APERAM Bio Energia, located in Itamarandiba, Minas Gerais, Brazil, were used. Physical and chemical wood characteristics, in addition to que carbonization and quality analysis of the charcoal produced in laboratory were available. The analyze of monomer composition of the polysaccharides were carried out at the REQUIMTE Analysis Laboratory – Network of Chemistry and Technology at Nova of Lisbon University, Caparica, Portugal. The results showed that clone 8 had the highest basic density and lowest specific wood consumption. Clones 5 and 8 were the highlights in relation to the gravimetric yields of charcoal and fixed carbon, in addition to the quality of the charcoal produced. The most important associations observed between wood and charcoal characteristics occurred between charcoal gravimetric yield with lignin content ($r=0.7562$) and holocellulose content ($r=-0.7664$); yield in pyroligneous liquid with the xylose content ($r=-0.8065$); yield in fixed carbon with the extractives in ethanol content ($r=0.8173$) and; charcoal ash content with lignin ($r=0.6434$) and wood ash ($r=0.5761$) contents.

Keywords: wood quality, charcoal, wood carbohydrate.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação dos materiais genéticos avaliados e valores das características de crescimento da árvore.	22
Tabela 2. Resumo da análise de variância para as características físicas da madeira.	27
Tabela 3. Teste de comparação múltipla da densidade básica e densidade relativa aparente.	28
Tabela 4. Resumo da análise de variância para o rendimento gravimétrico de carvão e em carbono fixo.	28
Tabela 5. Teste de comparação múltipla do rendimento gravimétrico e rendimento em carbono fixo do carvão.....	29
Tabela 6. Resumo da análise de variância para o rendimento do líquido pirolenhoso e rendimento dos gases não-condensáveis.....	29
Tabela 7. Teste de comparação múltipla de rendimento do líquido pirolenhoso e rendimento dos gases não-condensáveis.....	30
Tabela 8. Resumo da análise de variância para teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis.	30
Tabela 9. Teste de comparação múltipla dos teores de extrativos obtidos através de diferentes solventes.	31
Tabela 10. Resumo da análise de variância do teor de cinzas e densidade relativa aparente..	32
Tabela 11. Teste de comparação múltipla do teor de cinzas e densidade relativa aparente....	32
Tabela 12. Principais correlações observadas entre as características do carvão e da madeira	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1	Produção de carvão vegetal no Brasil	11
3.2	Densidade básica, características químicas e poder calorífico da madeira	12
3.3	Degradação térmica dos principais componentes químicos da madeira	15
3.4	Propriedades do carvão vegetal	18
4	MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1	Área de estudo e material biológico	21
4.2	Amostragem das árvores	22
4.3	Propriedades da madeira	23
4.4	Densidade básica	23
4.5	Análise química da madeira	23
4.6	Consumo específico de madeira	25
4.7	Composição monomérica dos polissarídeos	25
4.8	Carbonização em escala de laboratório	25
4.9	Qualidade do carvão vegetal produzido	26
4.9.1	Análise química imediata	26
4.9.2	Densidade relativa aparente	26
4.10	Análise dos dados	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material heterogêneo, possuindo diferentes tipos de células que são adaptadas à desempenharem funções específicas. São grandes as variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira entre espécies e dentro da mesma espécie em função principalmente da idade, fatores genéticos e ambientais. Dentro de uma mesma espécie pode-se citar, por exemplo, a ocorrência de variações significativas na altura do tronco e na direção da medula até a casca. Além disso, existe diferenças entre o cerne e o alborno, madeira de início e fim de estação de crescimento e, em escala microscópica, entre células individuais (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

As madeiras variam de árvore para árvore, bem como dentro de troncos individuais. Segundo Malan (1995) a variação no sentido radial é a mais importante fonte de variação. A extensão desta variação é, principalmente, determinada pela presença da madeira juvenil, sua proporção no tronco, suas características físicas, químicas e anatômicas. Todavia a elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil diminui com o passar do tempo e estão relacionadas principalmente com as dimensões celulares, a organização da parede celular e as características físicas e químicas da madeira.

De modo geral, Trugilho, Lima e Mendes (1996) relataram que a madeira apresenta uma rápida elevação dos valores de densidade, comprimento de fibra, etc., da fase juvenil até atingirem a maturidade, onde os valores permanecem mais ou menos constantes. Na fase juvenil a taxa de incorporação de biomassa é crescente, tendendo a se estabilizar, quando a madeira atinge a fase adulta. Essa taxa de variação da matéria seca sintetizada com a idade é chamada de ritmo de crescimento e depende dos fatores genéticos, edáficos e climáticos.

As principais espécies cultivadas no Brasil para uso energético pertencem ao gênero *Eucalyptus* (IBA, 2017). Esta ampla utilização se deve à adaptação destas espécies aos diferentes climas existentes no país e, conseqüentemente, devido a elevada produtividade e aos índices de qualidade da madeira que são adequados para atender as diferentes formas de utilização seja para o consumo doméstico, comercial ou industrial (FREITAS et al., 2015).

A utilização da madeira do eucalipto como lenha ou para produção de carvão vegetal é realizada tradicionalmente, mesmo sem se conhecer as características tecnológicas da madeira. Assim, os estudos que avaliam o potencial das espécies alternativas localizadas em áreas de manejo florestal, tendo em vista a sua utilização para produção energética, podem ser de grande valia para minimizar impactos ambientais e assegurar a sustentabilidade, além de proporcionar uma fonte de renda para produtores rurais, contribuindo para o desenvolvimento

socioeconômico e ambiental (SANTOS et al., 2013).

Assim, é indispensável determinar as propriedades físicas e químicas que se relacionam com o desempenho energético da biomassa tais como: densidade básica, teor de lignina, holocelulose, extrativos, cinzas e poder calorífico superior (SOARES et al., 2014; SANTOS et al., 2016).

Já se é sabido que o elevado conteúdo de lignina e a qualidade desta macromolécula podem contribuir para maiores rendimentos da fração sólida durante a pirólise (PEREIRA et al., 2013; ARAÚJO et al., 2016). E, que o teor de extrativos solúveis em etanol da madeira representa uma característica importante para a decomposição térmica do lenho, haja visto que a redução destes compostos diminui o rendimento do carvão vegetal e provoca deslocamento da curva termogravimétrica em direção a temperaturas mais altas (SEBIO-PUNHAL et al., 2012).

As propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas do carvão vegetal podem ser afetadas, principalmente, pelas características intrínsecas da matéria-prima que o originou, pelos parâmetros de carbonização (temperatura, tempo e taxa de aquecimento) bem como pelos sistemas de produção (BAILIS et al., 2013). Já, entre os parâmetros de pirólise, a temperatura influencia fortemente as características térmicas e químicas da fração sólida resultante (GHANI et al., 2013).

Apesar de existir diversos trabalhos na literatura que estudam sobre a influência das características físicas e químicas da madeira nos rendimentos e qualidade do carvão vegetal, ainda há uma grande lacuna quando se trata de estudos que visam conhecer o efeito dos carboidratos e extrativos obtidos em diferentes solventes, especialmente para a madeira de eucaliptos.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a qualidade da madeira e sua relação com os rendimentos gravimétricos e as características de qualidade do carvão vegetal em 10 clones de eucaliptos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Produção de carvão vegetal no Brasil

O Brasil destaca-se no setor mundial como maior produtor e consumidor de carvão vegetal com potencial de expandir a produção bem como o único país no mundo no qual este insumo tem uma aplicação industrial em grande escala tendo, como destino principal, a produção de ferro gusa, aço, ferro ligas e silício metálico (AMS, 2009; LOUREIRO et al., 2021).

Este fato é devido ao carvão vegetal ser uma ótima matéria-prima para a siderurgia brasileira, em razão do seu comportamento como combustível e redutor, por ser renovável e ambientalmente correto quando oriundo de florestas plantadas. Assim, visando alcançar o maior lucro financeiro se faz necessário o cultivo de árvores de rápido crescimento associado à redução do ciclo de corte para que atinjam rapidamente o tamanho ideal de comercialização.

No entanto, Loureiro et al. (2021) sugeriram que os materiais genéticos de crescimento rápido precisam ser avaliados quanto à qualidade da madeira e à produção do carvão vegetal salientando que as estratégias de geração de híbridos podem melhorar esses parâmetros e ainda produzir clones superiores.

Segundo Basso (2017) o Brasil responde por quase um terço da produção mundial de carvão vegetal, tal título se deve pela larga utilização do produto como agente redutor na obtenção de ferro-gusa haja visto que quase todo o carvão produzido é destinado a esse fim. Desse modo, a produção do carvão vegetal chegou a 3,6 milhões de toneladas em 2021, um aumento de 9,4% em relação à 2020 (Sindifer/Ibá).

Ressalta-se que o consumo do carvão vegetal está essencialmente concentrado no mercado interno sendo que os principais destinos são os setores de ferro-gusa e aço que consomem 72% do carvão vegetal produzido; de ferro-liga que utiliza 12%; seguido dos setores residencial (cocção e aquecimento residencial) com a comercialização para uso doméstico, principalmente na região sul do país, empregado geralmente no preparo do churrasco e; industrial (excluindo-se a siderurgia) com destaque para a produção de cimentos, química, indústria de alimentos e de cerâmicas (EPE, 2011; BRAND, 2015).

De acordo a IBA - Industria Brasileira de Árvores (2022), em 2021 o Brasil alcançou 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas, um aumento de 1,9% em relação à 2020. Com

isso, atingiu-se o maior nível de produtividade de eucalipto desde 2014, 38,9 m³/hectare/ano com uma área total de 7,53 milhões de hectares.

Para o IBA (2022), o insumo originado de árvores cultivadas, substitui aqueles de origem fóssil, diminuindo, por exemplo, a emissão de gases de efeito estufa (GEEs) na siderurgia, o que reforça o compromisso ambiental e beneficia outras indústrias.

Uma importante iniciativa adotada para que a siderurgia elimine o uso de florestas nativas para produção de carvão vegetal é o Pacto de Sustentabilidade em Minas Gerais, com a participação das empresas consumidoras de carvão vegetal, da Associação Mineira de Silvicultura (AMS), do Ministério Público e do Tribunal de Justiça do Estado. Sua proposta visa reduzir em 95% o consumo de carvão vegetal de matas nativas, em um prazo de nove anos.

O pacto embasou a elaboração do Projeto de Lei 2.771 em agosto de 2009, que foi sancionado pelo governador de Minas Gerais em setembro de 2009, originando o novo Código Florestal do Estado (Lei 18.365/09). Este estabelece regras de consumo de carvão vegetal para grandes consumidores que, entre 2009 e 2013, poderiam utilizar no máximo 15% de carvão ou lenha de mata nativa. Entre 2014 e 2018, o uso seria restrito a 10% e, a partir de 2018 o consumo total não poderá ultrapassar 5% de madeira proveniente de florestas nativas.

3.2 Densidade básica, características químicas e poder calorífico da madeira

Para caracterizar a madeira de espécies de *Eucalyptus* para as diversas finalidades, é necessário analisá-la anatomicamente (SHIMOYAMA, 1990), dado que as propriedades físicas e mecânicas da madeira estão intimamente relacionadas à composição do lenho e à estrutura bem como da organização de seus elementos (ESAU, 1974). Assim, a análise anatômica da madeira é fundamental para escolha mais rápida e precisa das possíveis utilidades da madeira de diferentes espécies ou clones.

A definição para melhor uso comercial da madeira é baseada, principalmente, na avaliação das propriedades do lenho. A densidade básica, grã, textura, dureza e cor são características bastante utilizadas na qualificação e classificação de madeiras (MORI et al., 2004). Destaca-se o uso da densidade básica na avaliação tecnológica da madeira (RODRIGUES et al., 2008), principalmente pela relação com outras propriedades físicas, mecânicas e energéticas do xilema secundário (DIAS et al., 2018) e pela facilidade de determinação em condição de laboratório e de campo (BATISTA et al., 2010).

Dentre as propriedades da madeira, a densidade básica é a propriedade física mais relevante a ser considerada e de maior influência na qualidade de seus derivados, pois está diretamente ligada às demais propriedades (ROSA, 2012; SCREMIN, 2012). Segundo Barcellos (2007), a densidade entre as espécies varia conforme as diferenças de espessura da parede celular, as dimensões das células, as inter-relações entre esses dois fatores e a quantidade de componentes presentes por unidade de volume.

Zanuncio et al. (2013) avaliaram materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia* e registraram relação inversamente proporcional da densidade básica com a umidade ($r = -0,944$) e taxa de secagem ($r = -0,761$). Assim, é possível inferir que: (i) árvores com elevada densidade básica apresentam menores taxas de secagem e (ii) que o entendimento da variação da densidade básica ao longo do fuste comercial de clones de *Eucalyptus* interfere principalmente no gerenciamento florestal.

A densidade básica está fortemente relacionada com a produção energética, ou seja, quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico (CARNEIRO et al., 2014). Adicionalmente, o potencial energético da madeira pode ser dimensionado com dados de densidade básica e teor de carbono elementar do xilema secundário (PROTÁSIO et al., 2014). A capacidade de estoque de carbono está relacionada à absorção do carbono atmosférico (CO_2) promovido pelas árvores que, em seu processo natural de fotossíntese, fixa o carbono em sua estrutura interna, culminando com a produção de biomassa e liberando oxigênio para o meio (LITTON et al., 2007; TRUGILHO et al., 2010; SILVA et al., 2015).

No tocante aos reflorestamentos, a produção de biomassa é maximizada em função do aumento da taxa de crescimento dos indivíduos. Sendo assim, é importante enfatizar que a quantificação do carbono estocado na biomassa em reflorestamentos com *Eucalyptus*, possui papel importante nesse modelo produtivo no contexto da sustentabilidade do setor florestal (LUNA et al., 2016). Nesse sentido, a maior quantidade estocada de carbono proporcionará maior geração de energia limpa (SANTOS et al., 2012). Gatto et al. (2011) verificaram em seu estudo que 64,7% do carbono estocado na parte aérea de árvores de *Eucalyptus sp.* se concentraram no caule.

A tendência da densidade básica é aumentar com a maturidade da árvore devido à composição química mais estável e maior concentração de carbono adquirida (OLIVEIRA, 2010; ROSA, 2012). Portanto, a densidade elevada implica em um menor volume de espaços vazios na madeira e, conseqüentemente, menos higroscopicidade (BARCELLOS, 2007).

A temperatura de ignição tem relação direta com a densidade, pois tendo menor volume de poros a circulação de oxigênio pela madeira é dificultada e há menos possibilidade de ignição, ou seja, entre peças com mesmas dimensões, a que possui a menor densidade será consumida no menor tempo (ROSA, 2012). Fato este que, segundo Scremin (2012), afeta a capacidade de produção da carvoaria em termos de rendimento gravimétrico de carvão vegetal. O teor de lignina presente na madeira é também outro fator que exerce bastante influência na qualidade do carvão vegetal. Contrariamente à densidade, a lignina tende a diminuir com a idade da árvore, pois é característica de madeiras jovens, que ainda não atingiram a estabilidade química (OLIVEIRA, 2010; ASSIS et al., 2012).

De acordo com Assis et al. (2012), madeiras que apresentam altos teores de lignina possuem maior estabilidade térmica, o que afeta positivamente o rendimento da carbonização devido à estabilidade de sua matriz aromática. Desse modo, para garantir uma boa produtividade de carvão vegetal com alto rendimento gravimétrico, aumento no teor de carbono fixo e na densidade aparente do carvão deve-se associar densidade básica elevada a altos teores de lignina em uma espécie vegetal (SANTOS, 2010).

Outra propriedade importante é o poder calorífico que está relacionado à quantidade de energia liberada (kcal) por unidade de massa (kg) da matéria, quando submetida ao processo de combustão. É influenciado diretamente pela umidade presente na madeira e sua composição química. A presença de água representa a redução do poder calorífico em razão da energia necessária para evaporá-la. Quanto à composição química, sabe-se que madeiras ricas em lignina, extrativos solúveis e compostos orgânicos apresentam elevado poder calorífico (SANTOS, 2010; SCREMIN, 2012).

O poder calorífico (PC) é uma das mais importantes propriedades do combustível sendo avaliado pela quantidade de energia na forma de calor liberado durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível, expresso em caloria por grama (cal g^{-1}) ou quilocaloria por quilograma (kcal kg^{-1}). No caso da madeira são encontrados valores que vão de $3.000 \text{ kcal kg}^{-1}$ até $5.400 \text{ kcal kg}^{-1}$ (BRITO; BARRICHELO, 1979).

Segundo Corder (1973), existem duas formas de expressar o PC de um combustível, sendo o poder calorífico superior e o inferior. No poder calorífico superior (PCS), a água formada durante a combustão na reação entre o hidrogênio e o oxigênio elementar da madeira, é condensada e seu calor latente é recuperado e, então, somado à energia mensurada, demonstrando o máximo potencial de fornecimento energético da madeira. Por isso, é o poder calorífico que está mais presente em diversos trabalhos de pesquisas, de forma a permitir a comparação entre diferentes fontes de energia. Já no poder calorífico inferior (PCI), o calor de

condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor. Em termos de pesquisa e comparação de combustíveis, Corder (1973) menciona que o PCS de resíduos vegetais varia de 4.500 a 5.000 kcal kg⁻¹.

As análises do PC, da quantidade de voláteis, de carbono fixo e de teor de cinzas também são parâmetros de grande importância para uso energético. O PC expressa a quantidade de calor liberado na queima completa de uma unidade de massa do combustível e é influenciado por teores de extrativos e lignina (SANTOS et al., 2011). De acordo com Brun et al. (2018), a maior quantidade de carbono fixo na madeira acarreta uma queima mais lenta, enquanto maiores teores de matérias voláteis propiciam uma degradação mais acelerada. As cinzas são formadas por materiais inorgânicos e não contribuem para o aumento do poder calorífico.

3.3 Degradação térmica dos principais componentes químicos da madeira

A celulose é o principal constituinte químico da madeira, constituindo de 40 a 45% da matéria seca da maioria das madeiras, localizada principalmente na parede secundária além de ser um polissacarídeo formado exclusivamente por unidades de β -D- anidroglicopiranoose, unidas por ligações glicosídicas do tipo β (1-4) (SJÖSTRÖM, 1993; ROWELL et al., 2005).

O polímero da celulose se decompõe a temperaturas compreendidas entre 260 e 350°C (SHAFIZADEH, 1984). Antal et al. (1998) afirmaram que a pirólise de diferentes substratos celulósicos pode ser descrita como uma reação irreversível, endotérmica, de etapa única, de primeira ordem, com energia de ativação da ordem de 238 kJ.mol⁻¹.

Para Rowell e LeVan-Green (2005), a celulose é mais estável à degradação térmica até cerca de 370°C e, em seguida, se decompõe quase que completamente em uma faixa de temperatura muito estreita. De acordo com os autores, a 300°C há rendimento de 28% de líquidos e 20% de resíduos sólidos. Com o acréscimo de 50°C na temperatura, o rendimento em líquidos aumenta para 38% e os resíduos sólidos decrescem para 8%. Neste mesmo estudo, a 500°C, o rendimento em líquidos permaneceu inalterado e o rendimento em resíduos sólidos foi reduzido para 2%.

Segundo Yang et al. (2007), a degradação térmica da celulose foi verificada em uma faixa de temperatura de 315 a 400°C, com a taxa de perda máxima de massa atingida a 355°C, devendo ser ressaltado que em temperaturas próximas a 400°C o resíduo sólido do processo foi de 6,5%. Este fato reflete a baixa contribuição da celulose no rendimento em carvão

vegetal na carbonização em fornos de alvenaria, que atingem temperaturas máximas superiores a 400°C, haja visto que a celulose seja o principal componente da madeira.

De acordo com Mesa Pérez (2004), os produtos da decomposição térmica da celulose são solúveis em água e aparecem quase totalmente no licor pirolenhoso, em sua maioria na fração aquosa denominada de ácido pirolenhoso e, um menor porcentual, fica em emulsão na fração oleosa formada pelos compostos insolúveis em água, conhecida como alcatrão.

Milosavljevic et al. (1996) constataram que a principal rota de degradação térmica da celulose é endotérmica, devido às reações de despolimerização e a volatilização dos produtos e, que essa condição reflete o calor latente requerido para a vaporização dos produtos de decomposição primária do licor pirolenhoso. Ainda segundo os autores, se conduzida no sentido de produzir carvão, que compete com a produção de licor pirolenhoso, a pirólise da celulose é exotérmica, sendo requeridas baixas taxas de aquecimento associadas a limitações na transferência de massa.

A celulose é um polímero de cadeias lineares que possuem grande tendência de formar ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, responsáveis pela formação das regiões cristalinas que garantem a alta estabilidade das moléculas de celulose (SJÖSTRÖM, 1993). Para Yang et al. (2007), a estrutura ordenada composta por cadeias lineares e desprovidas de ramificações garante estabilidade térmica desse componente da madeira.

Oliveira (2009) tratou termicamente madeiras de *Eucalyptus citriodora* e observou, assim como outros autores, a exemplo de Kubojima et al. (1998) e Bhuiyan et al. (2000), que há aumento da cristalinidade com a elevação da temperatura, até aproximadamente 200°C. De acordo com o que foi constatado nesses trabalhos, isso ocorre devido à degradação preferencial das regiões amorfas das moléculas de celulose, paralelamente à reorganização estrutural dessas regiões. Contudo, Kwon et al. (2009) ao estudarem as modificações na cristalinidade da madeira de *Quercus variabilis* em um sistema de pirólise com temperaturas variando de 250 a 500°C, constataram que quando a madeira é submetida a temperaturas superiores a 350°C, já não observa-se mais a estrutura cristalina da celulose, resultado de sua decomposição térmica.

As hemiceluloses representam, em média, 20 a 30% da massa seca da madeira (SJÖSTRÖM, 1993). São polímeros geralmente amorfos, de baixo peso molecular, constituídos de uma cadeia central de unidades repetitivas acrescida de cadeias laterais e ramificações (SJÖSTRÖM, 1993; ROWELL et al., 2005). A madeira das folhosas possui como principal hemicelulose o acetato de 4-O-metilglicuronoxilana, compondo de 15 a 30% da matéria seca, além de 2 a 5% de glicomananas (SJÖSTRÖM, 1993; ROWELL et al.,

2005).

As hemiceluloses são mais suscetíveis às reações químicas de degradação e menos tolerantes à ação do calor por causa da presença de hidroxilas expostas conectadas à sua cadeia principal, devido à condição amorfa (OLIVEIRA, 2009). As ramificações presentes nas hemiceluloses são facilmente removidas da cadeia principal e degradam-se em compostos voláteis, como CO, CO₂ e alguns hidrocarbonetos, em baixas temperaturas (YANG et al., 2007).

Müller-Hagerdorn et al. (2003) verificaram que os altos rendimentos em resíduo sólido indicam que a degradação térmica das hemiceluloses da madeira é diferente da degradação das xilanas isoladas ao procederem a análise termogravimétrica da madeira de *Carpinus betulus L.*, livre de extrativos e análise dos componentes isolados da madeira, celulose, lignina e xilanas.

As ligninas são macromoléculas tridimensionais, amorfas e ramificadas e, apresentam o fenilpropano como unidade básica, unidos por ligações éter (C-O-C) e carbono-carbono (C-C), entretanto não há nenhuma unidade repetidora definida (ROWELL et al., 2005).

De acordo com Sjöström (1993), a madeira de folhosas é constituída por 20 a 25% de lignina, embora a madeira de espécies que se desenvolvem em regiões tropicais possa ser constituída por porcentagens superiores a 30% de lignina. Como exemplo, pode-se citar o trabalho realizado por Gomide et al. (2005) no qual avaliaram dez clones de *Eucalyptus spp.* e verificaram teores de lignina que variaram de 27,5 a 31,7%.

As ligninas da madeira das angiospermas, grupo ao qual pertence o gênero *Eucalyptus*, são principalmente do tipo guaiacila-siringila, devido à copolimerização dos alcoóis coniferílico e sinapílico (ROWELL et al., 2005). Espera-se que maiores proporções de unidades guaiacila (G) em relação às unidades siringila (S), sejam desejáveis quando se pretende utilizar a madeira para produção de carvão, pois esse fato contribui para o maior rendimento gravimétrico em carvão (SANTOS, 2010; CASTRO, 2011; SOARES, 2011). Soares (2011) relata que a variação na porcentagem destas unidades determina os tipos de ligação presentes, as quais necessitam de diferentes quantidades de energia para se romper.

Como resultado da degradação térmica das ligninas, segundo Várhegyi et al. (1997), há formação de uma quantidade significativa de voláteis de baixo peso molecular, sendo estes constituídos pela clivagem de grupos funcionais que possuem variadas estabilidades térmicas, portanto, a cisão desses grupos ocorre em distintas temperaturas, além da formação de componentes monoméricos e oligoméricos. Os autores ainda descrevem que em temperaturas superiores a 300°C ocorrem reações para formação dos resíduos sólidos,

envolvendo o rearranjo do esqueleto de carbono e a liberação de gases.

3.4 Propriedades do carvão vegetal

O carvão vegetal pode ser retratado como um material sólido de cor negra, com densidade entre 180 e 300 kg m⁻³, friável, resultante da carbonização da biomassa (TROMPOWSKY, 2006). A carbonização é um processo de degradação térmica em ambiente com atmosfera controlada ou isenta de oxigênio e tem como objetivo aumentar o rendimento em carbono fixo no material, por meio da volatilização e da remoção dos outros componentes da madeira. É um produto de origem renovável e a sua combustão produz menos gases poluentes em comparação com combustíveis fósseis (ANTAL; GRENDI, 2003).

Durante a produção, o carvão sofre influência tanto da matéria-prima (madeira), como dos processos utilizados na carbonização. Em relação à madeira, características como o teor de extrativos, teor de lignina e a densidade básica são algumas das propriedades que afetam sua qualidade e rendimento. Com relação ao processo de produção, a taxa de aquecimento e a temperatura final de carbonização são fatores importantes e que também devem ser considerados (TRUGILHO et al., 2005).

A qualidade do carvão vegetal pode ser influenciada tanto pelas características da madeira, como pelas características do processo de carbonização. Essa qualidade é verificada por meio da análise de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, visto que tais propriedades devem se adequar ao emprego final do produto.

Uma vez que o carvão vegetal é composto basicamente por três frações distintas (carbono fixo, materiais voláteis e cinza, sendo a temperatura o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão), suas propriedades químicas podem ser investigadas por meio da análise imediata que consiste em determinar a porcentagem de cada uma dessas frações, bem como a umidade presente no mesmo (OLIVEIRA, 2012).

O carbono é o principal elemento combustível existente na biomassa, no carvão vegetal a sua medida é proporcionada indiretamente por meio do teor de carbono fixo. O carvão vegetal de uso siderúrgico deve apresentar teores de carbono fixo entre 70 e 80%. O consumo do termo redutor no processo de obtenção do ferro-gusa é diretamente influenciado pelo teor de carbono fixo presente no carvão vegetal (FREDERICO, 2009).

O rendimento em carbono fixo expressa uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de

hemiceluloses. É uma função direta do rendimento gravimétrico e do teor de carbono fixo presente na madeira (OLIVEIRA, 1988).

Os materiais voláteis são constituídos principalmente de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos. Para aplicação siderúrgica é desejável que o carvão vegetal tenha porcentagens inferiores a 25% de materiais voláteis, uma vez que altos teores de voláteis no carvão acarretam produção de fumaça acima dos limites desejáveis, além de reduzir a eficiência energética do carvão (COSTA, 2016).

As cinzas são os resíduos de óxidos minerais resultantes da combustão completa do carvão vegetal. Altos teores de minerais no carvão vegetal são indesejáveis quando o carvão é destinado à produção de ferro-gusa e ferro ligas. Para Castro et al. (2003) altos teores de cinzas influenciam na formação da escória final do alto forno, o que prejudica o escoamento. Além disso, os elevados teores de minerais podem gerar o problema da segregação, que é o acúmulo de resíduos ou impurezas no interior da peça de metal solidificado, resultando em variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas, o que favorece a quebra e a ocorrência de fissuras no metal solidificado (SILVA, 2019). De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2015), o carvão destinado à produção de ferro-gusa deve apresentar teor de cinzas inferior a 1%.

O PC do carvão vegetal é de aproximadamente $7100 \text{ kcal kg}^{-1}$, podendo variar para mais ou para menos conforme o teor de carbono fixo, além disso o poder calorífico é fortemente afetado pela temperatura final de carbonização (SANTOS, 2010).

A análise das propriedades físicas é essencial para especificar a qualidade do carvão vegetal. Dentre as propriedades físicas analisadas encontram-se a umidade, a densidade e a porosidade. A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vegetal depende, basicamente, da temperatura de carbonização e da umidade relativa do local ao qual está exposto (SANTOS, 2010). O alto teor de umidade influencia na capacidade energética do carvão vegetal, sendo inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a umidade do carvão menor é o seu PC.

A densidade do carvão vegetal é um aspecto que merece notoriedade, estando diretamente relacionada com o rendimento e produtividade do alto forno (BRITO, 1993). Uma maior densidade do carvão representa uma carga maior dentro do alto forno, isso representa um maior tempo de residência, o que resulta em uma redução do consumo específico de carvão por tonelada de ferro-gusa produzido.

De acordo com Barcellos (2007) o carvão vegetal é um material bastante poroso, podendo apresentar de 70 – 80% de porosidade. Matos e Rios (1982) ressaltaram que uma

porosidade apropriada favorece o aumento da permeabilidade e melhora a circulação dos gases no interior do alto forno. Desse modo, a velocidade das reações que ocorrem durante o processo de redução do minério de ferro é afetada pela porosidade da partícula (COSTA, 2016).

A resistência mecânica também se destaca como uma das mais importantes propriedades e pode ser considerada um dos principais entraves encontrados nos processos siderúrgicos em relação ao uso de carvão vegetal. Durante o processo de produção do ferro-gusa o carvão vegetal deve apresentar resistência mecânica suficiente para suportar a camada de minério de ferro, sem prejudicar a permeabilidade do leito (SILVA, 2019). Segundo Assis et al. (2016) uma das principais dificuldades da utilização do carvão vegetal como termo redutor do minério de ferro é a sua baixa resistência mecânica, quando comparado com o coque mineral.

Dentro desta característica, o fator de maior destaque é em relação a sua friabilidade e, sendo o carvão vegetal naturalmente um produto bastante friável, essa característica se agrava devido às operações de manuseio e transporte que este material sofre até alcançar o interior do alto forno (BRITO, 1993). A geração de finos ocorre naturalmente devido essa friabilidade do carvão vegetal, a qual é a propriedade associada à susceptibilidade do produto em se desfazer em finos quando submetido à abrasão, a queda e choques mecânicos. É afetada pela umidade, pelo diâmetro e pelo comprimento da madeira carbonizada (CARNEIRO et al., 2013; SILVA, 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

As análises das propriedades físicas e químicas da madeira, além da carbonização e análise da qualidade do carvão produzido foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Brasil. As análises da composição monomérica dos polissacarídeos foram realizadas no Laboratório de Análises REQUIMTE – Rede de Química e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal.

4.1 Área de estudo e material biológico

Neste estudo foram avaliados 10 clones de *Eucalyptus spp.* aos 6 anos de idade, provenientes de teste clonal plantado em espaçamento 6 m x 1 m, pertencentes a empresa APERAM BioEnergia, localizada no município de Itamarandiba, Minas Gerais, Brasil (Tabela 1). O município de Itamarandiba possui coordenadas geográficas 17,86°S de latitude e 42,86°W de longitude. A precipitação média varia de 1150 a 1450 mm, a temperatura média anual do município é de 20,1°C e o clima é tropical de altitude Cfa, (Koppen) com duas estações bem distintas. Os solos que predominam na região são luvisolos férricos, ferralsolos ácidos e arenossolos. A tipologia florestal que se destaca é o cerrado, desde os cerradões a campos, com pequenas ocorrências de matas semidecíduais e caducifólias, especialmente nos afloramentos com calcário (MULLER, 2005).

Tabela 1. Relação dos materiais genéticos avaliados e valores das características de crescimento da árvore.

Clone	Cruzamento		DAP* (cm)	Altura (m)	
				Total	Comercial
2042	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	13,39	23,07	21,40
2136	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	16,55	26,06	24,54
2037	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	15,25	25,40	23,72
2068	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	15,25	25,37	22,87
2115	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	15,39	23,63	21,03
2583	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. pelita</i>	14,67	22,60	21,37
2331	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	15,84	24,30	22,10
2630	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. pelita</i>	15,07	24,30	22,52
2034	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	13,20	23,03	21,23
1528	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	14,92	22,70	20,64

*DAP = diâmetro a altura do peito.

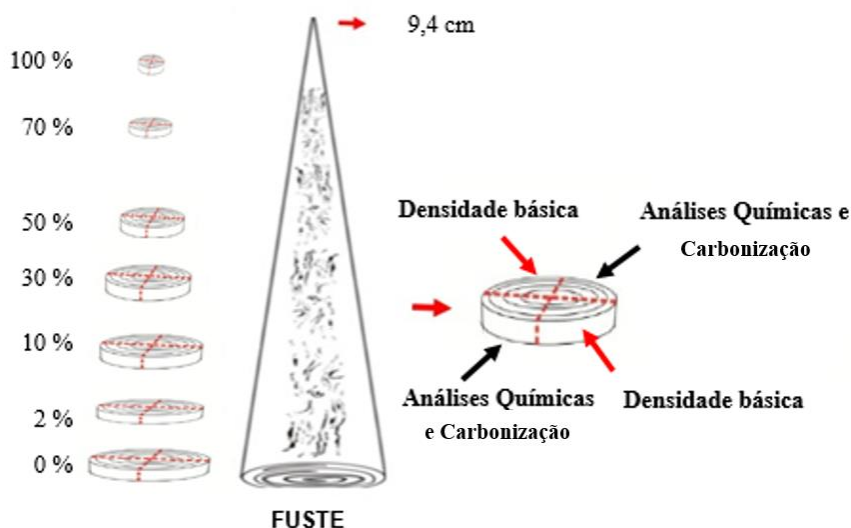
Fonte: Do autor (2023).

4.2 Amostragem das árvores

Foram selecionadas duas árvores de diâmetro médio por clone evitando efeito de borda e escolheu-se árvores sadias com o objetivo de representar da melhor forma os clones do estudo. Para cada árvore selecionada retirou-se discos de aproximadamente de 2,5 cm de espessura em sete posições longitudinais, ou seja, a 0%, 2%, 10%, 30%, 50%, 70% e 100% da altura comercial de cada árvore. A altura comercial foi definida até a circunferência de 9,4 cm (Figura 1).

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula, duas cunhas opostas destinadas à determinação da densidade básica e as outras duas cunhas opostas para as demais análises da madeira, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1. Amostragem nas árvores dos materiais avaliados.



Fonte: Do autor (2023).

4.3 Propriedades da madeira

Para a avaliação das propriedades físicas e químicas da madeira dos clones de *Eucalyptus spp.*, foram consideradas amostras compostas por materiais retirados de todas as posições longitudinais de amostragem, avaliando-se as seguintes características: densidade básica; teores de lignina solúvel, insolúvel e total; teor de extrativos em diferentes solventes; teor de holocelulose, composição monomérica dos polissacarídeos e consumo específico de madeira.

4.4 Densidade básica

A densidade básica da madeira foi determinada em cada posição de amostragem longitudinal do fuste das árvores. Foi adotado método de imersão em água descrito na norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), posteriormente, calculou-se a densidade básica média aritmética de cada árvore.

4.5 Análise química da madeira

Duas cunhas opostas por posição longitudinal foram transformadas em maravalhas, moídas e classificadas nas peneiras de 40 e 60 *mesh*. O material utilizado para as análises químicas molecular e carboidratos foi aquele que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retido na peneira de 60 *mesh*. Foi utilizada uma amostra composta das duas árvores em todas as análises químicas da madeira. Todas as determinações foram feitas com as amostras compostas em duplicadas.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma TAPPI T 211 om-93 (TAPPI, 2001), pela incineração a 525°C de 2,0 g de madeira seca, em que a quantificação dos resíduos foi em relação à massa seca inicial.

Os extrativos foram determinados por extrações sucessivas de Soxhlet com diclorometano (CH₂Cl₂), etanol (C₂H₅OH) e água (H₂O) durante 6h, 16h e 16h, respectivamente. Os solventes foram recuperados e o teor de extrativos foi determinado a partir da massa de resíduo após secagem a 105°C e relatado como a porcentagem das amostras originais (adaptado de Tappi 204 cm-97) (TAPPI, 2001). O teor de extrativos totais foi considerado como a soma dos extrativos obtidos nos três solventes.

O teor de lignina foi expresso pelos teores de lignina Klason, lignina solúvel em ácido e lignina total. O teor de lignina Klason foi determinado de acordo com TAPPI 222 om-02 (TAPPI, 2002).

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi obtido, de acordo com a metodologia proposta por Gomide e Demuner (1986) e o teor de lignina solúvel (Klason) em ácido sulfúrico foi determinado, de acordo com o método de Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi obtido pelo somatório dos teores de lignina solúvel e insolúvel.

O teor de holocelulose foi obtido por meio da equação 1.

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{Tlig} + \text{Text} + \text{Tcz}) \quad (1)$$

em que, Tlig: teor de lignina total (%); Tetx: teor de extrativos totais (%); Tcz: teor de cinzas (%).

Estas análises foram realizadas no Laboratório de Análises REQUIMTE – Rede de Química e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, utilizando uma amostra composta das duas árvores amostradas por clone.

4.6 Consumo específico de madeira

O consumo específico de madeira foi estimado conforme a equação 2.

$$CE = \frac{1}{DB \times \frac{RGC}{100}} \quad (2)$$

em que, CE = consumo específico de madeira (m³ madeira necessários para produzir 1 tcarvão), DB = densidade da madeira (t/m³) e RGC = rendimento gravimétrico de carvão (%).

4.7 Composição monomérica dos polissarídeos

O conteúdo dos monossacarídeos neutros (ramnose, arabinose, xilose, galactose, manose, glicose) foram quantificados na solução ácida remanescente da análise das ligninas, por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção amperométrica pulsada (HPLC-PAD), usando um sistema Dionex ICS-3000 (Dionex, Sunnyvale, CA). A separação foi realizada com colunas de troca aniônica Aminotrap mais Carbopac SA10 (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA), utilizando gradiente linear de soluções de NaOH e CH₃COONa como eluente em fluxo de 1,0 mL min⁻¹ (0±20 min 18 mM NaOH; 20±25 min 50 mM NaOH + 170 mM CH₃COONa; 25±40 min 50 mM NaOH + 170 mM CH₃COONa) a 30°C. Esta caracterização foi realizada no Laboratório de Análises REQUIMTE – Rede Química e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, utilizando uma amostra composta das duas árvores amostradas por clone.

4.8 Carbonização em escala de laboratório

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico (mufla) com a madeira previamente seca em estufa a 103±2°C. A temperatura inicial e final de carbonização foram de 100°C e 450°C respetivamente, taxa de aquecimento de 1,67°C min⁻¹ com tempo de residência de 30 minutos na temperatura máxima (Trugilho et al., 2001). Após as carbonizações os rendimentos gravimétricos de carvão, líquido pirolenhoso e gás não condensável foram determinados em relação a massa seca da madeira. O rendimento gravimétrico em carbono fixo foi obtido conforme a equação 3.

$$RCF = \frac{RGC \times TCF}{100} \quad (3)$$

onde, RCF = rendimento gravimétrico em carbono fixo (%), RGC = rendimento gravimétrico de carvão (%) e TCF = teor de carbono fixo (%).

4.9 Qualidade do carvão vegetal produzido

A qualidade do carvão vegetal produzido foi obtida por meio da determinação das análises da composição química imediata e da densidade relativa aparente.

4.9.1 Análise química imediata

Os teores de materiais voláteis e cinzas foram obtidos por meio do procedimento descrito na norma D1762-84 (ASTM, 2007), utilizando as frações das amostras retidas entre as peneiras de 40-60 *mesh*. O teor de carbono fixo foi obtido por diferença subtraindo-se de 100% o teor de materiais voláteis e o teor de cinzas.

4.9.2 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

4.10 Análise dos dados

Para a densidade básica e consumo específico de madeira, além dos rendimentos gravimétricos e qualidade do carvão produzido foi adotado o delineamento inteiramente casualizado, com 10 tratamentos (clones de *Eucalyptus spp.*) e 2 repetições (árvores). Para a comparação múltipla das médias e o agrupamento univariado dos clones de *Eucalyptus spp.* utilizou-se o teste Scott-Knott a 10% de significância.

Para a composição química molecular e monomérica dos polissacarídeos da madeira foi realizada a análise de correlação simples para estabelecer a sua relação com os rendimentos gravimétricos e qualidade do carvão vegetal produzido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância para a densidade básica e consumo específico de madeira encontra-se na Tabela 2. Verifica-se que ambas as características observadas apresentaram efeito de clone significativo.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para as características físicas da madeira.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO	
		Densidade Básica (g/cm ³)	Consumo específico (m ³ /t)
Clone	9	0,000582**	0,096144*
Resíduo	10	0,000098	0,027700
Total	19		
Média		0,508	5,695
CVe (%)		1,95	2,92

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade. ** e * significativo a 1% e 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

O valor médio encontrado para a densidade básica dos clones está de acordo com os valores citados na literatura para eucaliptos de idade próxima aos 6 anos. No estudo de De Assis e Zani Filho (1993), foram obtidos valores médios de densidade para *E. grandis*, aos 80 meses de idade, variando em uma amplitude de 0,436-0,535 g/cm³. Enquanto Trugilho (2009) obteve valor médio entre a densidade de 0,527 g/cm³ calculado através da média aritmética entre diferentes clones aos 6 anos.

O valor médio para consumo específico obtido no material de estudo foi de 5,695m³/t, sendo menor do que o encontrado na literatura para diferentes espécies. Loureiro et al. (2021) obtiveram valor médio para a estimativa de consumo específico de madeira de diferentes clones de *Corymbia spp.* de 6,44 m³/t. No estudo conduzido por Barros Junior (2020) com madeira de *Tachigali vulgaris*, espécie nativa da Amazônia, o valor médio de consumo específico obtido para plantios em espaçamento de 6 m² foi de 5,9 m³/t. Sabe-se que o consumo específico expressa a quantidade de madeira necessária para a produção de determinada quantidade de carvão vegetal, portanto, menores valores de consumo específico indicam a necessidade de um menor volume de biomassa para a produção de uma tonelada de carvão.

Na Tabela 3 encontra-se o resultado do teste de comparação múltipla para a densidade básica e o consumo específico de madeira.

Tabela 3. Teste de comparação múltipla da densidade básica e densidade relativa aparente.

Clone	Densidade Básica (g/cm ³)	Clone	Consumo específico (m ³ /t)
4	0,487a	8	5,17a
5	0,491a	7	5,56b
2	0,497a	6	5,61b
3	0,499a	1	5,65b
9	0,503a	5	5,68b
7	0,507a	10	5,76b
1	0,514b	9	5,87b
10	0,515b	2	5,87b
6	0,526b	3	5,88b
8	0,543c	4	5,88b

Valores médios seguidos de mesma letra e fonte na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Observa-se que os clones foram classificados em três grupos para a densidade básica e somente dois para o consumo específico de madeira. O clone 8 foi o de maior densidade básica (0,543g/cm³) e menor consumo específico de madeira (5,88m³/t). Assim, quanto menor o consumo específico mais interessante será do ponto de vista da carbonização da madeira, pois implica que será necessária menor quantidade de matéria prima para a geração do produto final.

Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados o resumo da análise de variância para os rendimentos gravimétricos de carvão (RGC) e em carbono fixo (RCF) e o teste de comparação múltipla realizado, respectivamente. O efeito de clone foi significativo tanto para o RGC como em RCF e essas duas características classificaram os clones em dois grupos distintos.

Tabela 4. Resumo da análise de variância para o rendimento gravimétrico de carvão (RGC) e em carbono fixo (RCF).

FV	GL	QUADRADO MÉDIO	
		RGC (%)	RCF (%)
Clone	9	1,283156***	0,930549***
Resíduo	10	0,462365	0,380855
Total	19		
Média		34,61	26,00
CVe (%)		1,96	2,37

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade. *** significativo a 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 5. Teste de comparação múltipla do rendimento gravimétrico de carvão (RGC) e em carbono fixo (RCF).

Clone	RGC (%)	Clone	RCF (%)
10	33,67a	2	25,08a
6	33,86a	6	25,36a
9	33,89a	10	25,57a
3	34,12a	1	25,67a
2	34,28a	4	25,74a
1	34,40a	7	25,93a
4	34,87b	9	26,04a
7	35,51b	5	26,58b
8	35,58b	3	26,81b
5	35,88b	8	27,26b

Valores médios seguidos de mesma letra e fonte na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

De maneira geral, foi possível observar elevados coeficientes de rendimento gravimétrico de carvão. Na pesquisa conduzida por Neves et al. (2011) foi possível observar valores médios de 30,89% e 32,08% para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal em dois diferentes locais de plantio de *Eucalyptus*. De Assis et al. (2012) ao analisarem os rendimentos de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em diferentes tratamentos, obtiveram valores médios de RGC de 31,63% e para RCF de 25,09%.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resumos da análise de variância dos rendimentos gravimétricos em líquido pirolenhoso (RLP) e gás não condensável (RGNC) e o teste de comparação múltipla realizado, respectivamente. Estas duas características apresentaram efeito de clone não significativo.

Tabela 6. Resumo da análise de variância para o rendimento do líquido pirolenhoso (RLP) e rendimento dos gases não-condensáveis (RGNC).

FV	GL	QUADRADO MÉDIO	
		RLP (%)	RGNC (%)
Clone	9	4,833831 ^{ns}	4,241501 ^{ns}
Resíduo	10	4,47070	4,121135
Total	19		
Média		46,91	18,48
CVe (%)		4,66	10,98

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade. ^{ns} não significativo a 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 7. Teste de comparação múltipla de rendimento do líquido pirolenhoso (RLP) e rendimento dos gases não-condensáveis (RGNC).

Clone	RLP (%)	Clone	RGNC (%)
4	44,60a	8	15,89a
5	44,75a	3	16,24a
7	46,18a	2	18,24a
6	46,24a	7	18,30a
1	46,93a	1	18,66a
9	47,34a	9	18,76a
10	47,41a	10	18,91a
2	47,47a	5	19,36a
8	48,52a	6	19,90a
3	48,64a	4	20,52a

Valores médios seguidos de mesma letra e fonte na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Arantes et al. (2013) utilizaram amostras de três diferentes classes diâométricas (14,2; 11,4 e 8,1 cm) do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e observaram valores médios de 33,68%, 34,35% e 35,07% para rendimento do líquido pirolenhoso, respectivamente. Para rendimentos em gases não condensáveis (RGNC) os valores observados pelos autores foram de 18,05%, 17,33% e 18,24% para as três classes respectivamente, médias essas próximas às obtidas no presente estudo, variando entre 15,89% e 20,52%.

Nas Tabelas 8 e 9 encontram-se o resumo da análise de variância para os teores de carbono fixo (TCF) e materiais voláteis (TMV) e o teste de comparação múltipla realizado, respectivamente. O efeito de clone foi significativo para as duas características com a classificação dos clones em dois grupos distintos.

Tabela 8. Resumo da análise de variância para teores de carbono fixo (TCF) e materiais voláteis (TMV).

FV	GL	QUADRADO MÉDIO	
		TCF (%)	TMV (%)
Clone	9	2,305087*	2,371511*
Resíduo	10	0,554400	0,589070
Total	19		
Média		75,14	24,30
CVe (%)		0,99	3,16

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade. * significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 9. Teste de comparação múltipla para os teores de carbono fixo (TCF) e materiais voláteis (TMV).

Clone	TCF (%)	Clone	TMV (%)
7	73,30a	6	22,95a
3	73,51a	4	23,22a
1	74,61a	5	23,29a
2	75,08b	8	23,98a
10	75,32b	10	24,02a
8	75,36b	9	24,10a
9	75,44b	2	24,36a
5	75,96b	1	25,12b
4	76,20b	7	25,99b
6	76,59b	3	26,01b

Valores médios seguidos de mesma letra e fonte na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Os valores de teores de carbono fixo (TCF) para os dez clones analisados, variaram entre 73,30% e 76,59%, com média 75,14%. Dos Reis et al. (2012) obtiveram valores de teores de carbono fixo entre 73,01% e 74,46% em seu estudo utilizando clone de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. No mesmo estudo também foi possível observar os teores de materiais voláteis com valores variando entre 25,15% e 74,46%. Segundo Brand (2010) e Nogueira e Lora (2003), citados por Dos Reis et al. (2012), combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a se queimar mais lentamente, requerendo longo intervalo de tempo para a queima total, quando comparados com combustíveis com baixo índice de carbono fixo.

Nas Tabelas 10 e 11 encontram-se o resumo da análise de variância para o teor de cinzas e densidade relativa aparente do carvão vegetal e o teste de comparação múltipla realizado, respectivamente. O efeito de clone foi não significativo e significativo, respectivamente, para o teor de cinzas e densidade relativa aparente. Os clones foram classificados em dois grupos distintos para a densidade relativa aparente.

Tabela 10. Resumo da análise de variância do teor de cinzas e densidade relativa aparente.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO	
		Teor de cinzas (%)	Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)
Clone	9	0,043031 ^{ns}	0,000911 [*]
Resíduo	10	0,021040	0000253
Total	19		
Média		0,56	0,352
CVe (%)		26,09	4,51

FV = fontes de variação, GL = graus de liberdade. ^{ns} e ^{*} não significativo e significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 11. Teste de comparação múltipla do teor de cinzas e densidade relativa aparente.

Clone	Teor de cinzas (%)	Clone	Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)
1	0,26a	4	0,311a
6	0,45a	3	0,338a
9	0,46a	1	0,338a
3	0,48a	7	0,343a
2	0,56a	2	0,352a
4	0,57a	9	0,354a
8	0,65a	10	0,363a
10	0,66a	5	0,368a
7	0,70a	8	0,376b
5	0,75a	6	0,384b

Valores médios seguidos de mesma letra e fonte na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 10% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2023).

Com base nos estudos de Brito et al. (1987) e Azevedo (2013), pode-se definir como ideais teores de cinzas inferiores a 1%, corroborando com o observado neste trabalho (Tabela 11). Baixos teores de cinzas contribuem para o aumento do poder calorífico do carvão, característica desejável no processo siderúrgico.

Os valores médios observados para a densidade relativa estão próximos aos observados por Botrel et al. (2007) e Arantes et al. (2013), variando de 0,336g/cm³ a 0,368g/cm³.

As correlações significativas entre os rendimentos gravimétricos da carbonização e a qualidade do carvão vegetal com as características avaliadas na madeira dos clones encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12. Principais correlações observadas entre as características do carvão e da madeira.

Característica do Carvão ¹	Característica da Madeira ¹	r
RGC	DCL	-0,6430*
RGC	ETA	0,7096*
RGC	LIGI	0,7562**
RGC	LIGT	0,7301**
RGC	HOLO	-0,7664**
RGC	XILO	0,6769*
RLP	AGU	0,5695*
RLP	XILO	-0,8065**
RLP	GLUCO	0,5649*
RCF	ETA	0,8173**
RCF	LIGI	0,6247*
RCF	LIGT	0,6660*
RCF	HOLO	-0,7403**
RCF	XILO	0,6848*
RCF	GLUCO	0,5620*
DRA	DB	0,6541*
DRA	CE	-0,5566*
TCZ	LIGI	0,6434*
TCZ	LIGT	0,6085*
TCZ	TCZ	0,5761*

** e * significativo a 1% e 5%.

¹ RGC (Rendimento Gravimétrico de Carvão), RLP (Rendimento Gravimétrico em Líquido Pirolenhoso), RCF (Rendimento carbono fixo), DRA (Densidade Relativa aparente do Carvão), TCZ (Teor de cinzas), DCL (Extrativos em Diclorometano), ETA (Extrativos em Etanol), LIGI (Lignina Insolúvel) LIGT (Lignina Total), HOLO (Holocelulose), XILO (Xiloses), AGU (Extrativos em Água), GLUCO (Glucose), DB (Densidade Básica), CE (Consumo Específico).

Fonte: Do autor (2023).

As características do carvão vegetal de rendimento em gás não condensável (RGNC), teor de materiais voláteis (TMV) e teor de carbono fixo (TCF) não apresentaram correlação significativa com nenhuma das características avaliadas na madeira.

Na Tabela 12 é possível verificar que o rendimento gravimétrico de carvão apresentou correlação positiva com o teor de extrativos em etanol (ETA), teor de lignina insolúvel (LIGI), teor de lignina total (LIGT) e teor de xiloses (XILO) presentes na madeira. A correlação positiva entre o rendimento gravimétrico do carvão, teor de lignina e demais constituintes da parede celular, pode ser explicada pela resistência térmica destes constituintes à degradação, o que favorece a produção do carvão vegetal.

Além disso, o RGC apresentou correlação negativa com o teor de extrativos em diclorometano (DCL) e teor de holocelulose (HOLO). Santos (2000) confirmou em seus estudos que quanto menor o teor de extrativos e lignina, maior o teor de holocelulose, o que pode explicar a correlação negativa entre esta característica da madeira e o RGC.

Em relação ao rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (RLP), este apresentou correlação negativa com o teor de xiloses (XILO), além de correlação positiva com o teor de glucose (GLUCO), açúcar fundamental da composição da celulose como substância química. Segundo Soares et al. (2014), o conjunto de substâncias que compõem o líquido pirolenhoso estão derivadas da lignina e extrativos. Deste modo, um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal poderia ser alcançado pela presença, em maior quantidade, de componentes originários da lignina e dos extrativos, durante a pirólise.

O rendimento em carbono fixo (RCF) apresentou correlação positiva com os teores de extrativos em etanol (ETA), lignina insolúvel (LIGI), lignina total (LIGT), xilose (XILO) e glucose (GLUCO), além de correlação negativa apenas com o teor de holocelulose (HOLO). No estudo de Santos (2008) foi constatado que quanto maior o teor de lignina menor será o teor de holocelulose. A diferença principal entre as correlações observadas para o rendimento gravimétrico de carvão e carbono fixo foi a correlação negativa do RGC com o DCL (diclorometano) e a correlação positiva do RCF com GLUCO, além da similaridade das correlações com HOLO.

A densidade relativa aparente do carvão (DRA) correlaciona-se positivamente com a densidade básica (DB) e negativamente com o consumo específico (CE) da madeira. O teor de cinzas do carvão (TCZ) apresentou valores de correlação positiva com o teor de lignina insolúvel (LIGI), teor de lignina total (LIGT) e teor de cinzas (TCZ) da madeira. Segundo Soares (2014), espera-se que a correlação entre o teor de cinzas da madeira com a do carvão vegetal seja positiva, visto que este componente não é afetado significativamente durante a pirólise, apenas aumenta a sua concentração na nova massa após o tratamento térmico.

6 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A densidade básica e o consumo específico de madeira classificaram os clones em três e dois grupos, respectivamente. O clone 8 foi o destaque com a maior densidade básica e menor consumo específico de madeira.
- Os rendimentos gravimétricos de carvão e carbono fixo classificaram os clones em dois grupos, enquanto os rendimentos de líquido pirolenhoso e gás não condensável não apresentaram efeito significativo de clone. Os clones 5 e 8 se destacaram em relação aos rendimentos de carvão e carbono fixo.
- Em relação a qualidade do carvão produzido os clones 5, 6 e 8 foram os de destaque.
- O rendimento gravimétrico do carvão correlacionou positivamente com o teor de lignina e negativamente com a fração total de carboidratos da madeira;
- Há correlação positiva entre rendimento em líquido pirolenhoso e o teor de xiloses presentes na madeira;
- O rendimento em carbono fixo apresentou elevada correlação com o teor de extrativos em etanol da madeira;
- O teor de cinzas do carvão vegetal correlacionou-se positivamente com os teores de lignina e cinzas da madeira.

REFERÊNCIAS

- AMS. ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Números do setor**. Belo Horizonte: AMS, 2009. Disponível em: www.silviminas.com.br. Acesso em: 22 ago. 2022.
- ANTAL, M. J.; VARHEGYI, G.; JAKAB, E. Cellulose pyrolysis kinetics: revisited. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 37, n. 4, p. 12671275, 1998.
- ARANTES, M. D. C. et al. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Cerne**, v. 19, p. 423-431, 2013.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**. 2009. 149 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- ARAÚJO, A. C. C. et al. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus spp*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.
- ASSIS, T. F.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. Melhoramento Genético do Eucalipto. In: SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M. (eds). **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Editora UFSM, Santa Maria, p. 225-247, 2017.
- ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.
- ASSIS; L. B. 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. 01039954, 2021.
- AZEVEDO, C. H. et al. Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.
- BAILIS, R. et al. Innovation in charcoal production: a comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 189–200, 2013.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- BAROTTO, A. J. et al. Functional relationships between wood structure and vulnerability to xylem cavitation in races of *Eucalyptus globulus* differing in wood density. **Tree Physiology**, v. 38, n. 2, 243-251, 2018.

BAROTTO, A. J. et al. Wood density and anatomy of three *Eucalyptus* species: implications for hydraulic conductivity. **Forest Systems**, v. 26, n. 1, p. 1-11, 2017.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira**. Piracicaba, SP, ESALQ, 1985. 125p.

BARROS JUNIOR, U. de O. **Tachigali vulgaris em plantios homogêneos na Amazônia: parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos**. 2020. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Belém, 2020.

BASCH, A.; LEWIN, M. The influence of fine structure on the pyrolysis of cellulose I: Vacuum pyrolysis. **Journal of Polymer Science and Polymer Chemistry**, v. 11, p. 30713093, 1973.

BASSO, S. **Análise do Carvão Vegetal para Uso Doméstico**. 2017. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BHUIYAN, M.T.R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity of Wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, v. 46, n. 6, p. 341- 436, 2000.

BOTREL, M. C. G. et al. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 31, p. 391-398, 2007.

BRAND et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) *Naudin* (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Sci. For., Piracicaba**, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. B. I. Influência da época de colheita da biomassa florestal sob sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, v. 38, v. 88, p. 619-628, 2010.

BRAND, M. A. et a. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015.

BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF**, v. 36, n. 1, p. 13-17, 1987.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. IPEF, Piracicaba, **Circular Técnica**, n. 181, 1993.

BROIDO, A.; JAVIER-SON, A.C.; BARRALL, E.D. Molecular weight decrease in the early pyrolysis of crystalline and amorphous cellulose. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 17, p. 3627-3635, 1973.

BRUM, S. S. et al. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Revista Química Nova**, v. 31, n. 5, 2008.

CARNEIRO, A. 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. 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.

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

COUTO, A. M. et al. Amostragens longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus sp.* **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 184-193, 2012.

DE ASSIS R. F.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus spp.* **IPEF**, v. 46, p. 76-85, 1993.

DE ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-291, 2012.

DIAS, A. C. C. et al. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 1, p. 37-44, 2018.

DOS REIS, A. A. et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, 2012.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 293 p.

FREDERICO, P. G. U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GATTO, A. et al. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 895-905, 2011.

IBA. Indústria Brasileira de Árvores (IBÀ). **Relatório Anual**. 2019. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>> Acesso em: 22 ago. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)**. 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=289&z=t&o=1&i=P>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

KIM, U. J.; EOM, S. H.; WADA, M. Thermal decomposition of native cellulose: Influence on crystallite size. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, p. 778-781, 2010.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. Vibrational properties of heat-treated Green Wood. **Journal of wood science**, v. 46, n. 1, p. 63-67, 1998.

KWON, U. J.; EOM, S. H.; WADA, M. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. **Wood Science and Technology**, v. 43, p. 487-498, 2009.

LIMA, M. D. R. et al. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. e3302, 2020.

LITTON, C.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, v. 13, n. 10, p. 2089-2109, 2007.

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. **Ci. Fl.**, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021.

LUNA, R. K. et al. Biomass, carbon stock and carbon dioxide removal across different girth classes of *Eucalyptus* species in Punjab: implication for *Eucalyptus* plantations. **Journal of Tree Sciences**, v. 35, n. 1, p. 13-20, 2016.

MALLAN, F. A. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: **Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria**, São Paulo, IPEF/IPT, Anais ..., São Paulo, IPEF/IPT, 05-06, abr., 1995. p.1- 19.

MORI, C. L. S. O. et al. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 123-132, 2004.

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. 319-319, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

OLIVEIRA, et al. – Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Sci. For.**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, A. C. et al. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 59-68, 2012.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Revista Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431439, 2010.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1228-1239, 2009.

TRUGILHO, P. F. et al. Variação radial e longitudinal do rendimento gravimétrico de carvão vegetal em clone de eucalipto. **Braz. J. of Develop.**, v. 5, n. 3, p. 25352541, 2019.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. UFV. 1996. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/18347#:~:text=Apesar%20do%20efeito%20da%20idade,estudado%20para%20o%20g%C3%AAnero%20Eucalyptus>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

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.

PEREIRA, J. C. D. et al. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PROTÁSIO, T. P. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

RODRIGUES, É. A. C. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v. 14, n. 2, p. 147-152, 2008.

ROSA, R. A. et al. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.

SANTOS, C. R. **Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa kraft-AQ**. 2000. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008.

SANTOS, R. C. 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. 221230, 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, R. C. et al. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 491-502, 2013.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, 2010.

SANTOS, R.C. 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. **Ciênc. Florest.**, v. 26, p. 657– 669, 2016.

SCREMIN, A. L. T. **Estudo energético e fisicoquímico do carvão vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. Guarapuava, 2012.

SANTOS, L. C. et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. *Revista Árvore*, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.

SILVA, C. A. et al. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus spp.* **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.

SJÖSTRÖM, E. Wood chemistry: fundamentals and applications. New York, Academic Press, Inc., 2ª ed., 1993. 293p.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, 2011.

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.

GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Rev. Árvore**, v. 29, p. 129–137, 2005.

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, p. 543-549, 2014.

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

TRUGILHO, P. F. et al. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 16, p. 33-40, 2010.

TRUGILHO, P. F. et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

TRUGILHO, P. F; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril l.*). **Scientia Agrária**, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulos, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 353-360, 2013.