



PIETRO EMANUEL VILLELA SOARES

**EFEITO DA IDADE NA DENSIDADE BÁSICA, ENERGÉTICA E PODER
CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA EM CLONES DE EUCALIPTO**

LAVRAS / MG

2022

PIETRO EMANUEL VILLELA SOARES

**EFEITO DA IDADE NA DENSIDADE BÁSICA, ENERGÉTICA E PODER
CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA EM CLONES DE EUCALIPTO**

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

Dra. Danielle Gomes Marconato
Coorientadora

LAVRAS / MG

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Soares, Pietro Emanuel Villela.

Efeito da idade na densidade básica, energética e poder
calorífico superior da madeira em clones de eucalipto / Pietro
Emanuel Villela Soares. - 2022.

37 p.

Orientador(a): Paulo Fernando Trugilho.

Coorientador(a): Danielle Gomes Marconato.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,
2022.

Bibliografia.

1. Qualidade da Madeira. 2. Modelos de Regressão. 3.
Identidade de Modelos Lineares. I. Trugilho, Paulo Fernando. II.
Marconato, Danielle Gomes. III. Título.

PIETRO EMANUEL VILLELA SOARES

**EFEITO DA IDADE NA DENSIDADE BÁSICA, ENERGÉTICA E PODER
CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA EM CLONES DE EUCALIPTO**

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 8 de setembro de 2022

Ms. Fabíola Magalhães Mendes

Ms. Nayara Tamires da Silva Carvalho

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

Dra. Danielle Gomes Marconato
Coorientadora

LAVRAS / MG

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Deus que eu acredito e que se fez presente em todos os momentos da minha vida até aqui, me protegendo e me guiando.

Agradeço aos meus pais, Luiz Marcelo e Maria Rita, por serem a minha maior fonte de incentivo, por não medirem esforços para meu sucesso e por serem meu porto seguro mesmo de longe. Nada que eu construí seria possível sem o apoio dos dois.

Agradeço ao restante da minha família por torcer por mim e por contribuir direta ou indiretamente com minhas conquistas na graduação.

Agradeço aos meus amigos de Pouso Alto, que estão comigo desde a infância, sempre me apoiando e se fazendo presentes da forma que é possível.

Agradeço aos amigos que fiz em Lavras, fundamentais para que eu conseguisse passar por todas as fases difíceis da graduação e, também, por comemorarem comigo cada vitória.

Agradeço ao Mateus, a pessoa mais companheira que eu pude ter ao meu lado durante esses longos anos de universidade, nos piores e nos melhores momentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Paulo Fernando Trugilho, que esteve comigo desde o começo da graduação, auxiliando em toda a minha formação acadêmica.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciências Florestais, ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa, à Terra Júnior Consultoria Agropecuária e à Gerdau Aços Longos S/A, por contribuírem com o profissional e a pessoa que eu me tornei.

Por fim, agradeço imensamente à minha melhor amiga Mariana Freitas Andrade Vilela, uma das principais razões que me fizeram escolher estudar na UFLA e que, mesmo em outro plano espiritual, viveu intensamente comigo todas as experiências maravilhosas até o presente momento. Hoje, vivo por mim e por ela o sonho de me tornar Bacharel em uma das melhores universidades federais do Brasil.

A todos, minha eterna gratidão, respeito e admiração.

RESUMO

O objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito da idade nas características de qualidade da madeira de três clones de *Eucalyptus urophylla* em seis idades diferentes (12, 24, 36, 48, 60 e 72 meses). A densidade básica (DB) e o poder calorífico superior (PCS) foram determinados por meio dos procedimentos NBR 11941 e ASTM E711-87 respectivamente, enquanto a densidade energética (DE) foi calculada pelo produto destas duas características. Doze modelos de regressão foram ajustados por clone para avaliar o efeito da idade nas três características estudadas. A seleção do melhor modelo foi com base na significância da regressão pelo teste F, na significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, pelo coeficiente de determinação ajustado, coeficiente de variação e análise gráfica dos resíduos. Nos modelos selecionados foi utilizado o teste para a falta de ajustamento para verificar a adequação dos modelos ao fenômeno estudado. A análise de identidade de modelos lineares foi utilizada para verificar a igualdade dos modelos de mesma forma nos materiais genéticos. A DB e DE tenderam a aumentar com a idade para os três clones estudados, o que não ocorreu com o PCS, o qual ainda apresentou efeito inverso para o clone 3. De modo geral, o PCS não apresentou muita variação com a idade, especialmente para os clones 1 e 2. Para a DB e DE os modelos selecionados foram o cúbico raiz para os clones 1 e 3, e o cúbico para o clone 2. Para o PCS o modelo linear simples melhor se ajustou aos dados somente para o clone 3. O teste de identidade de modelos lineares mostrou que, para a DB, é possível utilizar uma equação comum para os clones 1 e 3, enquanto para a DE o mesmo não foi possível.

Palavras-chave: Qualidade da Madeira. Modelos de Regressão. Identidade de Modelos Lineares.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the age effect on wood quality characteristics of three clones of *Eucalyptus urophylla* at six different ages (12, 24, 36, 48, 60 and 72 months). Basic density (BD) and higher heating value (HHV) were determined through the procedures NBR 11941 and ASTM E711-87 respectively, while the energy density (ED) was calculated by the product of these two characteristics. Twelve regression models were adjusted for each clone to evaluate the age effect on the three characteristics studied. The selection of the best model was based on the significance of the regression by the F test, the significance of the regression coefficients by the t test, the adjusted coefficient of determination, the coefficient of variation and the graphic analysis of the residuals. In the selected models, the test for lack-of-fit was used to verify the adequacy of the models to the phenomenon studied. The analysis of identity of linear models was used to verify the equality of the same-shape models in the genetic materials. BD and ED tended to increase with age for the three clones, but it did not occur with HHV, which still had an inverse effect for clone 3. In general, HHV did not show much variation with age, especially for clones 1 and 2. For BD and ED, the selected models were the cubic root for clones 1 and 3, and the cubic for clone 2. For HHV, the simple linear model best adjusted only for clone 3. The linear models' identity test showed that, for BD, it is possible to use a common equation for clones 1 and 3, while for ED the same was not possible.

Keywords: Wood Quality. Regression Models. Linear Models Identity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização dos municípios de Curvelo e Felixlândia	22
Figura 2. Amostragem no Fuste das Árvores	23
Figura 3. Densidade básica da madeira em função da idade e gráfico de dispersão dos resíduos	28
Figura 4. Densidade energética da madeira em função da idade e gráfico de dispersão dos resíduos.....	29
Figura 5. Poder calorífico superior em função da idade e gráfico de dispersão dos resíduos.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação do material genético utilizado.....	22
Tabela 2. Análises das características da madeira.....	23
Tabela 3. Modelos de regressão testados para avaliar o efeito da idade.....	24
Tabela 4. Valores médios encontrados para densidade básica, densidade energética e poder calorífico superior para os três clones estudados aos 72 meses de idade.....	25
Tabela 5. Modelos ajustados para densidade básica, energética e poder calorífico superior para os três clones em estudo.....	26
Tabela 6. Teste de identidade de modelos lineares para a densidade básica e energética.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVO	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 <i>Eucalyptus</i>: aspectos gerais e suas florestas	13
3.2 Características gerais da madeira de eucalipto	16
3.3 O efeito da idade	19
4 METODOLOGIA.....	22
4.1 Material biológico, amostragem e cubagem das árvores	22
4.2 Análises das características da madeira	23
4.3 Análises dos dados	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
6 CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a área de plantios de *Eucalyptus* spp. é de 7,47 milhões de hectares e continua em processo de expansão. Cerca de 18,4% desses plantios são destinados à produção de carvão vegetal para o abastecimento dos fornos siderúrgicos, sendo este setor o maior consumidor e produtor desse insumo. Há uma crescente demanda pela utilização da biomassa para uso industrial, principalmente para o abastecimento de caldeiras e para a geração de energia na forma direta ou para a redução do minério de ferro (IBA, 2021).

Os Estados de Minas Gerais (27,6%), São Paulo (18,1%), Mato Grosso do Sul (15,1%), Bahia (7,8%), Rio Grande do Sul (6,6%), Paraná e Santa Catarina (3,6% cada) seguem como principais produtores de áreas plantadas com árvores para fins comerciais no país. Considerando os três estados com maior concentração de eucalipto, em Minas Gerais, a maior parte da produção é destinada para a produção de carvão vegetal, e em São Paulo e Mato Grosso do Sul, para papel e celulose (RODRIGUES *et al.*, 2021).

Nos últimos anos as áreas de eucalipto da Bahia e Espírito Santo tiveram o ritmo de expansão estabilizado; São Paulo e Minas Gerais continuam a se manter como os estados onde ocorre a maior área plantada de eucalipto e iniciou-se a emergência de novos espaços de eucaliptocultura no sul do Brasil, nos estados de Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina (CHAVES *et al.*, 2021). Atualmente, o Sul do Brasil tem a maior produção de lenha baseada na silvicultura, seguido pelo Sudeste (BICHEL; TELLES, 2021).

Uma das principais fontes de energia de biomassa utilizadas é o carvão vegetal, que, quando comparado ao carvão mineral, apresenta inúmeras vantagens por oferecer, em sua constituição química, baixos teores de minerais, sendo praticamente isento de enxofre e fósforo (NEVES *et al.*, 2011; ASSIS *et al.*, 2012). Além disso, o carvão vegetal é um agente de dupla finalidade, ou seja, gera energia (calor) para o sistema e reduz o minério de ferro (SANTOS *et al.*, 2011), além de ser um recurso renovável.

Entretanto, o carvão vegetal é altamente variável em qualidade, uma vez que a madeira e os processos utilizados na pirólise influenciam diretamente a qualidade do carvão. A homogeneidade desse biocombustível é fundamental para o processo de redução do minério de ferro e produção de ferro-gusa e aço de melhor qualidade. Dessa forma, pesquisas relacionadas ao estudo de clones de *Eucalyptus* spp. para a produção de bioenergia e de carvão vegetal para a siderurgia são muito importantes (PROTÁSIO *et al.*, 2014).

A madeira é um material biológico bastante heterogêneo, considerando-se sua composição química e anatômica, como também suas propriedades físicas e mecânicas. Sua qualidade e produção sofrem influência de diversos fatores, assim como o efeito do material genético, o local de plantio, a interação entre o material genético e o ambiente, a idade e o espaçamento empregado (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

As diferenças entre as madeiras de eucalipto de uma mesma espécie ocorrem, principalmente, em função de fatores genéticos, ambientais e da idade da árvore. Alguns estudos (TRUGILHO *et al.*, 1996) mostram que a idade da madeira influencia o seu potencial para a produção de celulose e papel, já que seus parâmetros de qualidade são fortemente influenciados pelas características físicas, químicas e anatômicas da madeira. Para a produção de bioenergia a idade tem efeito similar, sendo importante entender sobre características como a densidade básica, densidade energética e o poder calorífico para avaliar parâmetros qualitativos da madeira, sendo que, quando pensa-se na produção com finalidade energética, madeiras com maiores valores para essas características são melhores para geração de energia.

Trugilho *et al.* (1996), ao estudar a influência da idade nas características físico-químicas da madeira de *Eucalyptus saligna*, conclui que o comprimento, largura, espessura da parede celular e diâmetro do lúmen das fibras aumentam com a idade na faixa de 12-48 meses. Nesta mesma faixa de idade o teor de lignina, de extrativos e de cinzas decresce, enquanto o teor de holocelulose e a densidade básica aumentam. Apesar de existir tendência de estabilização na variação das dimensões celulares das fibras e nas características químicas e, também, pelo fato do material ser ainda muito jovem, os autores sugerem continuar a avaliação dessa espécie em idades mais avançadas, para verificar o grau de variação nas características físico-químicas e anatômicas da madeira, identificando a idade onde ocorre a estabilização de todas essas variáveis.

2 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da idade na densidade básica, energética e poder calorífico superior da madeira em três clones de *Eucalyptus urophylla*.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 *Eucalyptus*: aspectos gerais e suas florestas

O gênero *Eucalyptus* foi introduzido no Brasil em 1904 por Edmundo Navarro de Andrade, com o intuito de ser utilizado no setor madeireiro como carvão e dormentes, devido, principalmente, ao seu rápido crescimento (MARTINI, 2004). O gênero contém aproximadamente 900 espécies, as quais são originárias da Austrália, Indonésia e Papua Nova Guiné (BROOKER; KLEINING, 2006).

A inserção e o plantio do eucalipto ocorriam em propriedades rurais com finalidades bastante distintas e pontuais. Pequenos produtores o cultivavam como fonte de extração de madeira para uso próprio na construção de cercas. Não menos usual era a destinação do eucalipto para ocupar espaços na propriedade cuja terra era pouco fértil, pedregosa, com declives acentuados (DE VECHI; MAGALHÃES JÚNIOR, 2018).

Pertencente à família das *Myrtaceae*, que é responsável pela maior parte das espécies plantadas no mundo, por meio do subgênero *Symphyomyrtus*, o qual se divide em nove seções, possuindo entre elas as espécies mais cultivadas, como *Eucalyptus grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla* e *E. pellita*; Seção Exsertaria: *E. camaldulensis*, *E. exserta* e *E. tereticornis* e Seção Maidenaria: *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. smithii* e *E. nitens* (MORAES, 2013).

Os *Eucalyptus* spp. cobrem a maior área dos reflorestamentos no mundo. O grande número de espécies deste gênero, a grande plasticidade ecológica e a sua excelente produção tornaram-no matéria prima de inúmeras indústrias florestais, o que permitiu o rápido avanço no conhecimento silvicultural e tecnológico de muitas espécies (FINGER *et al.*, 1993).

O Brasil apresenta condições edafoclimáticas extremamente favoráveis de clima e de solo ao plantio do eucalipto, o que lhe confere rápido crescimento, atingindo os mais altos índices de produtividade do mundo. O nível de qualidade alcançado pela tecnologia florestal brasileira se faz materializado pela grande variedade de material genético selecionado que já foi produzido e pelas altas taxas de produtividades observadas em várias regiões do país (MORAES, 2013).

Os plantios florestais no Brasil se destacam quando o assunto é produtividade, com alto volume de produção anual de madeira por área e ciclo curto. As mudanças climáticas podem ter sido fatores que impactam na queda de produtividade média por ano no plantio de eucalipto de 38,6 m³ ha⁻¹, em 2019, para 36,8 m³ ha⁻¹ em 2020 (IBÁ, 2021).

Em 2020, a área total de árvores plantadas totalizou 9,55 milhões de hectares, um recuo de 1,4% em relação a 2019 (9,69 milhões de hectares). Os estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina continuam sendo os maiores detentores de florestas plantadas no país (IBÁ, 2021), tornando o Brasil o país líder em produtividade florestal com suas florestas plantadas de eucalipto.

Atualmente, inúmeras espécies e clones pertencentes aos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, com destaque para as espécies de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e seus híbridos, possuem grande notoriedade na produção de madeira e carvão vegetal. Assim, diversas pesquisas têm sido publicadas com o objetivo de melhoria na classificação e seleção de materiais genéticos superiores para tal finalidade (NEVES *et al.*, 2011; SOARES *et al.*, 2014; PROTÁSIO *et al.*, 2015). Segundo Loureiro (2022), esses estudos possuem grande importância, pois evidenciam a alta correlação das propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira em relação ao rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Sabe-se que o principal polo de consumo de carvão vegetal, com mais de 40% das empresas, encontra-se no estado de Minas Gerais. O setor de árvores cultivadas tem participação em 94% da produção de carvão vegetal. O consumo do produto de fonte renovável caiu de 4,23 para 4,19 milhões de toneladas em 2020, com relação ao ano anterior. Porém, a maioria das 180 principais unidades produtoras de porte médio e grande de ferro-gusa, ferro-liga e aço no Brasil utilizam o carvão vegetal em seu processo de produção (IBÁ, 2021).

O plantio de eucalipto ao redor do mundo tem causado grandes discussões pelos impactos ambientais causados em meio a sua inserção, no entanto, não há consenso sobre a cultura (MEIRELLES; CALAZANS, 2006). Em alguns momentos seu plantio é defendido, em outros, condenado. Contudo, o plantio dessa espécie vem ganhando espaço e sendo aperfeiçoado com pesquisas tecnológicas de melhoramento genético e de manejo.

Principalmente no que diz respeito às plantações florestais, torna-se mesmo imperativo que todo o esquema de manejo seja estruturado com base em conceitos modernos de manejo ecossistêmico. Manejo cujo objetivo continue a ser, evidentemente, a produção de madeira para o abastecimento industrial, mas agora preocupado, também, com a manutenção da diversidade estrutural e funcional ao longo de toda a paisagem florestal, protegendo a qualidade da água e a diversidade do meio aquático nos lagos, nos cursos d'água e nos rios (LIMA, 1993).

Além disso, segundo Foelkel (2016), uma floresta plantada de eucalipto consegue sequestrar entre 10 a 16 toneladas de carbono atmosférico por hectare/ano, o que equivale a 35 a 60 toneladas de gás carbônico/ha/ano. Em sete anos, idade em que geralmente se realiza a colheita, essa floresta teria sequestrado entre 70 a 112 toneladas de carbono atmosférico ou 255

a 410 toneladas de gás carbônico. No entanto, de acordo com o mesmo autor, ao ser queimada, libera parte desse estoque de carbono de novo para a atmosfera, trata-se, portanto, de um carbono renovável e não fóssil acumulativo.

O eucalipto é considerado uma das melhores alternativas para a produção de carvão vegetal devido à rusticidade, produtividade, densidade e, também, pelas características da madeira que garantem, segundo a literatura, um carvão facilmente renovável e de boa qualidade, sendo que, com reflorestamentos de eucalipto planejados e manejados adequadamente, é possível produzir árvores de troncos retos, uniformes e madeira com densidade adequada para diversos fins (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

A madeira de eucalipto começou a se destacar na indústria de produtos sólidos como fonte de matéria prima de usos múltiplos. A utilização da madeira em diferentes segmentos (construção civil, celulose e papel, serraria, chapas e compensados, energia, entre outros) pode ser explicada pela variedade das características tecnológicas da madeira de diversas espécies de eucalipto encontradas no Brasil. Com isso, pode-se dizer que o eucalipto é a espécie florestal plantada mais importante do país (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

De acordo com Soares *et al.* (2006) o eucalipto configura-se como um forte gerador de biomassa por apresentar rápido crescimento e fácil adaptação a diferenciados tipos de solo e clima. Contudo, os autores chamam a atenção para a necessidade de contínuos estudos para o melhor aproveitamento do potencial de produção de biomassa.

Brito (2007) relata que o uso da madeira para fins energéticos sofre influência do nível de desenvolvimento do país, da disponibilidade de florestas, de questões ambientais e da sua competição econômica com outras fontes energéticas. Conforme destaca o autor, evidencia-se o uso da madeira para energia nos países em desenvolvimento, pois, muitas vezes, nesses locais, ela é um componente de vital importância no suprimento de energia primária, com destaque para o uso doméstico e industrial. O autor complementa também que, conceitualmente, a madeira pode ser denominada de lenha quando utilizada como energia, podendo servir como combustível nos processos de geração de energia térmica, mecânica e elétrica.

Observa-se, ainda, que o seu destino como lenha soma mais da metade do volume total de madeira mundialmente consumida para todas as finalidades e pode-se destacar que tanto a madeira quanto seu derivado, o carvão vegetal, são essenciais para o preparo de alimento para um enorme número de famílias e comunidades em diversas regiões do planeta (BRITO, 2007).

Segundo Simioni *et al.* (2018) a utilização do eucalipto como fonte renovável de suprimento de lenha passa a ser uma questão prioritária no cenário nacional, tendo em vista o esgotamento de recursos florestais nativos e as implicações ambientais decorrentes. Além disso,

as espécies do gênero *Eucalyptus* são reconhecidas pelo seu rápido crescimento, elevada produtividade e ampla adaptabilidade ambiental, além da contribuição para diminuição da pressão sobre a exploração de ecossistemas nativos (WINK *et al.*, 2013).

Além das propriedades da madeira, deve-se considerar o crescimento ou incremento volumétrico nos programas de seleção de clones de *Eucalyptus*. O incremento volumétrico tem relação direta com a estimativa de massa seca, afetando, assim, a produtividade energética e, por consequência, a classificação dos clones (CARNEIRO *et al.*, 2014).

3.2 Características gerais da madeira de eucalipto

Como já se sabe, a madeira de eucalipto pode ser utilizada como matéria-prima no setor de celulose e papel, serrarias, indústrias de painéis e chapas de madeira, usinas de preservação e produção de carvão vegetal e bioenergia (SANTOS *et al.*, 2012).

Neste sentido, ações e projetos de pesquisa que tenham por objetivo avaliar as características energéticas de diferentes espécies lenhosas, de forma sustentável, são fundamentais para o desenvolvimento desta importante área. As principais características utilizadas para qualificar energeticamente um material são o poder calorífico, teor de umidade, densidade básica e energética da madeira, análise imediata (teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo), além dos teores de lignina, holocelulose e extrativos (CASTRO *et al.*, 2013).

Para a produção de carvão vegetal, por exemplo, preferem-se madeiras com maiores densidades e maiores teores de lignina, tais características devem ser consideradas e associadas às de crescimento volumétrico, para a seleção de materiais genéticos superiores (CASTRO *et al.*, 2013). Sabe-se que essas propriedades são influenciadas por diferentes fatores, como: o genótipo (G), ambiente (A) e interação (G x A), além da idade (TRUGILHO *et al.*, 2017). Por essas razões, pesquisas têm sido realizadas na tentativa de encontrar clones mais promissores para produção de carvão vegetal (NEVES *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2014; TRUGILHO *et al.*, 2017), além de outras formas de utilização.

De acordo com Loureiro *et al.* (2021) a maior parte dos estudos tem sido realizada com madeira das espécies do gênero *Eucalyptus* e de seus clones que, na atualidade, possuem baixa densidade básica. O desafio é encontrar materiais genéticos de alta densidade básica e que possam produzir carvão vegetal de boa qualidade. Nesse sentido, as espécies do gênero *Corymbia* vêm se destacando para produção de carvão vegetal. O gênero vem se destacando pelo alto incremento volumétrico e densidade básica da madeira desejáveis.

Para definir o uso comercial da madeira, avalia-se as propriedades do lenho. Assim, a densidade básica, textura, grã, dureza e cor são características utilizadas de forma recorrente na qualificação e classificação de madeiras ((NEVES *et al.*, 2011). Segundo Trugilho (2017), durante os testes para avaliar a viabilidade do uso da madeira na produção de energia, deve-se considerar várias características, tais como composição química e densidade básica.

Sabe-se que o potencial energético da madeira é influenciado por fatores como o material genético, idade, local de plantio e interações entre esses fatores (NEVES *et al.*, 2011). Em florestas energéticas, tanto o material genético quanto o espaçamento de plantio podem interferir na qualidade da madeira (MAGALHÃES *et al.*, 2020), podendo, dentre outros, influenciar na densidade básica (MOULIN *et al.*, 2017) e no poder calorífico da madeira (PAULINO, 2012).

Quando se considera a utilização da biomassa florestal para geração de energia por meio da queima direta, prioriza-se o uso de madeiras com maior poder calorífico, pois essa propriedade está relacionada ao rendimento energético (QUIRINO *et al.*, 2005), que, por sua vez, está relacionado à sua constituição química (SILVA *et al.*, 2015; JESUS *et al.*, 2017). Além disso, a elevada densidade básica da madeira é um dos parâmetros de qualidade considerados relevantes para a geração de energia pela queima direta.

Assim, quanto maior a densidade básica, maior a quantidade de energia estocada por metro cúbico de madeira (CARNEIRO *et al.*, 2014), ou seja, existe relação direta entre a densidade e a quantidade de energia produzida.

Destaca-se a utilização da densidade básica na avaliação tecnológica da madeira (RODRIGUES *et al.*, 2008), principalmente pela sua relação com outras propriedades físicas, mecânicas e energéticas do xilema secundário (DIAS *et al.*, 2018) e, também, pela facilidade de determinação tanto em condição de laboratório quanto em campo (BATISTA *et al.*, 2010).

A densidade básica varia de diversas formas, como entre espécies botânicas, entre árvores da mesma espécie, entre indivíduos do mesmo clone e até ao longo do fuste de uma mesma árvore (COUTO *et al.*, 2012). Barroto *et al.* (2017) encontraram valores de densidade básica diferentes entre *Eucalyptus grandis* (0,421 g cm⁻³), *Eucalyptus globulus* (0,545 g cm⁻³) e *Eucalyptus vicinais* (0,665 g cm⁻³). Barroto *et al.* (2018) reportaram variação intraespecífica de densidade básica (0,650 g cm⁻³ e 0,590 g cm⁻³) em dois materiais genéticos de *Eucalyptus globulus*.

Sabe-se que densidade básica está diretamente relacionada com a produção de energia, sendo que quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico (CARNEIRO *et al.*, 2014). O potencial energético da madeira é dimensionado

com dados de densidade básica e teor de carbono elementar do xilema secundário (PROTÁSIO *et al.*, 2014). O estoque de carbono relaciona-se à absorção do carbono atmosférico (CO₂) promovido pelas árvores que, durante a fotossíntese, fixam o carbono em sua estrutura interna, produzindo biomassa e liberando oxigênio para o meio (TRUGILHO *et al.*, 2017).

A densidade básica é considerada o elemento referencial para a seleção de espécies indicadas para produção de energia, sendo citada por muitos autores como índice de qualidade da madeira, pois influencia outras propriedades da mesma e dos produtos que são gerados, já que a madeira mais densa apresenta como características a produção de carvão com densidade mais elevada, por exemplo (SANTOS, 2010).

O aumento de densidade da madeira é acompanhado pelo aumento da espessura da parede das fibras, pela redução do seu lume e pelo aumento no seu comprimento, à medida que os teores de lignina e de extrativos se elevam, a densidade aumenta proporcionalmente. O uso de madeiras com baixa densidade para a produção direta de energia na forma de calor implica em queima rápida e menor produção de energia por unidade de volume, ao contrário do observado para madeiras com maiores densidades. Porém, densidades elevadas implicam em dificuldade de iniciar a queima do material (VALE *et al.*, 2001).

De acordo com Pereira *et al.* (2016), a densidade energética se refere à quantidade de energia liberada por volume, sendo útil conhecer a densidade a granel e o poder calorífico para o melhor entendimento sobre a densidade energética do material. A densidade energética também é um parâmetro importante a ser determinado, pois interfere, por exemplo, no volume de biomassa consumida no processo de queima e no tamanho do silo de armazenamento de biomassa de uma máquina, quando se associa a quantidade de energia necessária e as características do material.

Normalmente a densidade energética aumenta à medida que diminui o tamanho da partícula, devido ao fato de os espaços vazios entre essas partículas serem menores, desta forma, quanto maior a densidade a granel, maior a massa que pode ser transportado ou armazenado em recipiente de volume fixo, minimizando, assim, custos de transporte e armazenamento, por exemplo (OBERNBERGER; THEK, 2004; MANI *et al.*, 2006).

Em estudo realizado com pellets de madeira, Garcia *et al.* (2013) relataram que os materiais foram secos e comprimidos, apresentando umidade padronizada (abaixo de 12%), e, conseqüentemente, uma maior densidade energética, possibilitando transporte mais fácil e com menor custo (STHAL, 2008). O teor de umidade é um parâmetro importante porque afeta diretamente no balanço energético da densificação, pois quanto menor o teor de umidade, maior será a produção de calor por unidade de massa (VALE *et al.*, 2000).

O poder calorífico é uma das mais importantes propriedades do combustível. É 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 ou quilocaloria por quilograma. No caso da madeira, são encontrados valores que vão de 3.000 kcal kg⁻¹ até 5.400 kcal kg⁻¹ (BRITO; BARRICHELO,1982).

A análise do poder calorífico, quantidade de voláteis, carbono fixo e teor de cinzas também são parâmetros importantes para uso energético. O poder calorífico expressa a quantidade de calor liberado na queima completa de uma unidade de massa do combustível e é influenciado pelos teores de extrativos e lignina (SANTOS *et al.*, 2011). Segundo 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 O efeito da idade

De acordo com Loureiro (2022) a idade é uma variável importante do manejo florestal por estar relacionada ao crescimento e à produtividade do povoamento, portanto, sendo parâmetro fundamental quando se pensa em florestas com finalidade energética. Além disso, a idade pode colaborar no planejamento e na composição dos custos da madeira, além de servir como base para avaliar o potencial produtivo do sítio.

Há complexidade na escolha da idade de corte de um povoamento já que, de maneira geral, as empresas a estipulam considerando apenas a produtividade florestal. Porém, não se deve desconsiderar a rotação, o tipo de crescimento da espécie em questão, a vinculação com planos globais de abastecimento, o aumento em valor devido ao ganho em qualidade da madeira e o uso de diferentes taxas de juros (RODRIGUEZ; BUENO; RODRIGUES, 1997).

De acordo com Jankowsky (1979) o período de juvenilidade é variável, podendo ser superior a 10 anos em alguns *Eucalyptus* plantados na Austrália. Segundo Tomazello Filho (1987) e Malan (1995), em áreas de rápido crescimento, a madeira juvenil é de importância considerável, pois ela pode constituir grande proporção do tronco. De acordo com Koga (1988), o lenho juvenil é formado nos primeiros anos na região próxima da medula, sua duração é variável, podendo ocupar 85% do tronco em uma árvore de 15 anos e cerca de 10% aos 30 anos.

O efeito da idade sobre as características anatômicas e físico-químicas já é bem conhecido. Normalmente, a densidade básica tende a aumentar com a idade (VITAL *et al.*,

1994). Espécies que possuem maior densidade básica tenderão a apresentar maior densidade energética da madeira e são, portanto, mais propícias como combustível para ser utilizado na geração direta de energia (PROTÁSIO *et al.*, 2013). Em contrapartida, o teor da lignina tende a diminuir com a idade, pois as espécies mais jovens tendem a possuir uma maior proporção de madeira juvenil, que é mais rica em lignina do que a madeira madura.

O aumento do comprimento das fibras em função da idade é resultado do aumento do comprimento das células que as originam, denominadas de iniciais fusiformes. A estabilização do comprimento das fibras, para inúmeras espécies de eucaliptos somente irá ocorrer quando as células do câmbio atingirem comprimento máximo, iniciando a formação da madeira adulta (TOMAZELLO FILHO, 1987). Diferenças significativas, embora pequenas, foram encontradas no comprimento das fibras entre árvores, enquanto diferenças na largura são pequenas e não significativas (MALAN, 1995).

O espaçamento de plantio, embora possa interferir na qualidade da madeira, ainda requer estudos para comprovar a sua influência sobre estes parâmetros (BERGER, 2000). Em idades jovens, variando de um a três anos, tanto Moulin *et al.* (2017) quanto Magalhães *et al.* (2020) encontraram maiores valores de densidade básica em espaçamentos maiores. No entanto, Sereghetti *et al.* (2015) não encontraram diferença na densidade básica da madeira de eucalipto, aos doze meses de idade, em função do espaçamento.

Trugilho, Lima e Mendes (1996) relatam que a madeira apresenta 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 árvore 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.

O consumo de energia no refino é maior para madeiras mais velhas, bem como o índice de rasgo, sendo que para esta propriedade, no trabalho de Morais (2008), a amostra de polpa oriunda de madeira de cinco anos de determinado clone se desviou da tendência, apresentando os maiores valores. A resistência ao rasgo é influenciada pelo número total de fibras na ruptura da folha, pelo comprimento e espessura das fibras e pela resistência das ligações inter-fibras. Portanto, madeiras mais velhas deveriam de fato produzir maiores resistências ao rasgo já que elas possuem fibras mais compridas e espessas (TRUGILHO *et al.*, 1996).

Morais (2008) concluiu que a propriedade de resistência à passagem de ar apresentou tendência de diminuição com o aumento da idade para os dois clones (A e B) estudados pelo autor. A drenabilidade das polpas, ou seja, a resistência à drenagem de uma suspensão aquosa

de fibras, medida pelo grau Shopper Riegler tendeu a diminuir com o aumento da idade da madeira, mas somente para o clone A. Para o clone B, os resultados apresentaram-se de maneira irregular entre as idades avaliadas, não sendo possível estabelecer qualquer tipo de correlação.

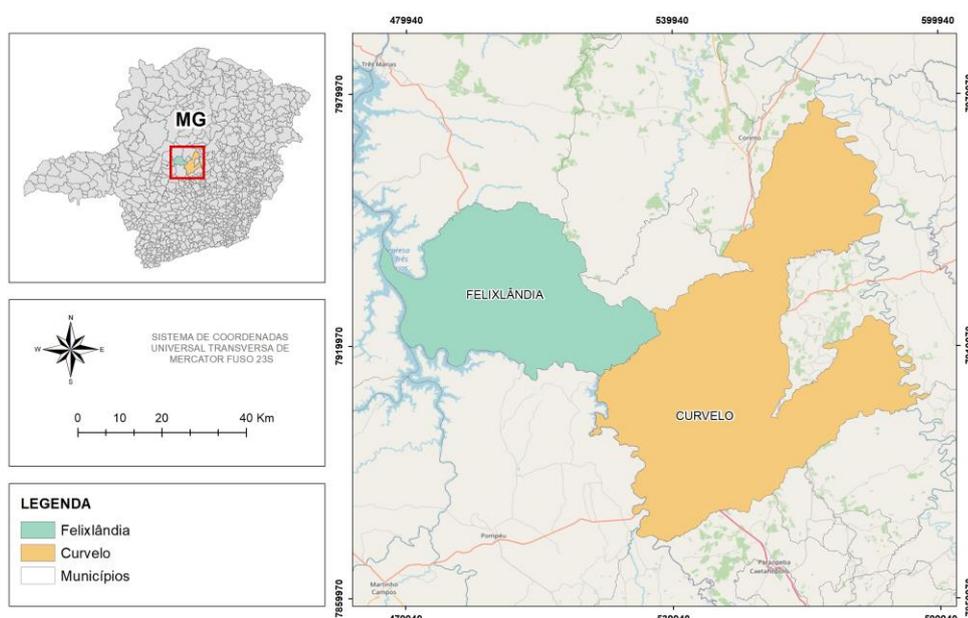
Apesar da existência de extensa informação na literatura sobre o efeito da idade sobre as características da madeira e de seus produtos, é imperativo que se faça mais trabalhos, especialmente com materiais clonais, visando o estabelecimento de modelos estatísticos mais robustos para o melhor entendimento da variação e do comportamento de propriedades importantes dessa matéria prima.

4 METODOLOGIA

4.1 Material biológico e amostragem das árvores

Para a realização da pesquisa foram utilizadas madeiras de três clones de *Eucalyptus urophylla*, provenientes de plantios comerciais pertencentes à empresa Plantar, localizados nos municípios de Curvelo e Felixlândia (Figura 1), estado de Minas Gerais, sendo que a identificação do material genético utilizado ocorreu de acordo com a Tabela 1.

Figura 1. Mapa de localização dos municípios de Curvelo e Felixlândia



Fonte: IBGE (2022)

Tabela 1. Identificação do material genético utilizado

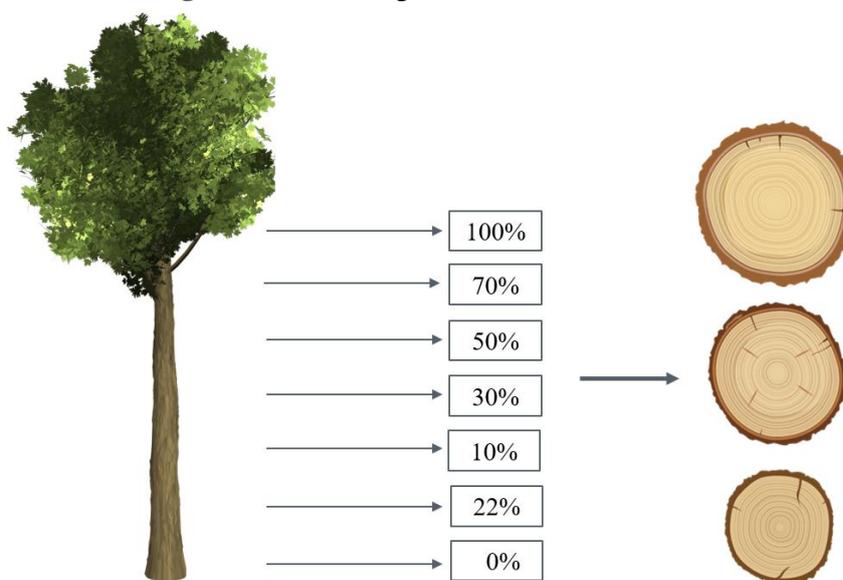
Clone	Idade (anos)	Município
1	1,4,5 e 6	Curvelo
1	2 e 3	Felixlândia
2	1 a 6	Curvelo
3	1 e 2	Felixlândia
3	3 a 6	Curvelo

Fonte: Loureiro (2022)

Cinco árvores de diâmetro médio por idade foram selecionadas aleatoriamente para o estudo, totalizando 90 árvores. De cada árvore foram retirados sete discos correspondentes a 0, 2, 10, 30, 50, 70 e 100% da altura comercial do tronco (Figura 2) (DOWNES *et al.*, 1997),

definidos até diâmetro mínimo de 4,0 cm com casca. Em todos os discos, retiraram-se duas cunhas opostas, utilizadas para a determinar a densidade básica da madeira e as cunhas restantes usadas para a retirada de amostras para determinar o poder calorífico superior (PCS) da madeira. A densidade básica média da árvore foi considerada a média aritmética de todas as posições longitudinais de amostragem, enquanto o PCS médio da madeira foi obtido de amostra composta de material proveniente de todas as posições longitudinais de amostragem.

Figura 2. Amostragem no Fuste das Árvores



Fonte: Do Autor (2022)

4.2 Análises das características da madeira

Para determinar a densidade básica (DB), o poder calorífico superior (PCS) e a densidade energética (DE) da madeira, foram adotados os procedimentos indicados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Análises das características da madeira

Análises	Procedimentos
Densidade básica (DB)	NBR 11941 (ABNT, 2003)
Poder calorífico superior (PCS)	ASTM E711-87 (ASTM, 2004)
Densidade energética (DE)	$DE = \frac{DB \times PCS}{1000}$

Fonte: Loureiro (2022)

4.3 Análises dos dados

Para a análise dos dados foram testados 12 modelos de regressão simples e múltiplos que estão apresentados na Tabela 3. A seleção do melhor modelo foi baseada na significância da regressão pelo teste F, na significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, ambos em nível de 1% de probabilidade, pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), coeficiente de variação do modelo e análise gráfica dos resíduos.

Foi utilizado o teste para a falta de ajustamento, conforme a metodologia proposta por Hoffmann e Vieira (1977), para verificar se os modelos selecionados são adequados ou não ao fenômeno estudado. Os modelos foram ajustados por clone e, quando a forma dos modelos selecionados foi a mesma para todos os materiais genéticos, foi utilizada a análise de identidade de modelos lineares para verificar a sua igualdade, conforme o procedimento de Graybill (1976). Os modelos foram ajustados utilizando-se do software Sistema de Análises Estatísticas (SAEG) versão 5.0, pacote REGREAMD1.

Tabela 3. Modelos de regressão testados para avaliar o efeito da idade

Modelo	Equação do Modelo
Linear	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$
Quadrático	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \varepsilon_i$
Cúbico	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \beta_3^3 + \varepsilon_i$
Raiz Quadrada	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{X_i} + \beta_2 X_i + \varepsilon_i$
Potencial	$Y_i = \beta_0 \cdot X_i^{\beta_1} + \varepsilon_i$
Exponencial	$Y_i = \beta_0 \cdot \beta_1^{X_i} + \varepsilon_i$
Hiperbólico 1	$Y_i = \beta_0 + \frac{\beta_1}{X_i} + \varepsilon_i$
Hiperbólico 2	$Y_i = \frac{1}{(\beta_0 + \beta_1 X_i)} + \varepsilon_i$
Logarítmico (e)	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(X_i) + \varepsilon_i$
Logarítmico (10)	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log(X_i) + \varepsilon_i$
Log Recíproco	$\log(Y_i) = \beta_0 + \frac{\beta_1}{X_i} + \varepsilon_i$
Cúbico Raiz	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i^{0,5} + \beta_2 X_i + \beta_3 X_i^{1,5} + \varepsilon_i$

Fonte: SAEG (2007)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta, respectivamente, os valores médios encontrados para densidade básica (g cm^{-3}), densidade energética (Gcal m^{-3}) e poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) para os três clones estudados dos 12 aos 72 meses de idade. É possível observar que, para os três clones, tanto a densidade básica quanto a densidade energética aumentaram com o aumento da idade. Para o poder calorífico superior não houve tendência clara de variação com a idade dos clones, exceto nos clones 2 e 3, onde, aparentemente, ocorreu decréscimo do valor com a elevação da idade.

Tabela 4. Valores médios encontrados para densidade básica, densidade energética e poder calorífico superior para os três clones estudados aos 72 meses de idade

Densidade Básica (g cm^{-3})			
Idade (meses)	DB - Clone 1	DB - Clone 2	DB - Clone 3
12	0,480	0,457	0,464
24	0,464	0,447	0,496
36	0,528	0,441	0,529
48	0,548	0,489	0,552
60	0,591	0,519	0,582
72	0,554	0,534	0,540
Densidade Energética (Gcal m^{-3})			
Idade (meses)	DE - Clone 1	DE - Clone 2	DE - Clone 3
12	2,239	2,118	2,154
24	2,149	2,068	2,319
36	2,459	1,996	2,403
48	2,572	2,243	2,524
60	2,751	2,362	2,632
72	2,599	2,444	2,463
Poder Calorífico Superior (kca kg^{-1})			
Idade (meses)	PCS - Clone 1	PCS - Clone 2	PCS - Clone 3
12	4.661	4.638	4.647
24	4.630	4.627	4.671
36	4.657	4.527	4.543
48	4.691	4.590	4.575
60	4.657	4.552	4.525
72	4.689	4.579	4.559

Fonte: Do autor (2022)

O efeito do aumento da idade das árvores sobre a qualidade do lenho, incluindo suas propriedades físicas, é relatado na literatura por inúmeros autores, como Tomazello Filho (1985), Trugilho *et al.* (1996) e Silva *et al.* (2004). Sette Júnior *et al.* (2012) relatam que o

aumento da densidade do lenho ocorre em função das alterações do meristema cambial e das exigências mecânico-fisiológicas resultantes do processo de desenvolvimento das árvores à medida que é formado o lenho adulto no tronco das árvores de eucalipto.

Sabe-se que densidade da madeira é uma característica bastante relevante, sendo um dos principais índices de qualidade da madeira, pois está correlacionada diretamente com a produção de massa seca, com as propriedades físico-mecânicas e pode ser facilmente determinada (PALERMO *et al.*, 2004), além de se relacionar com a qualidade dos produtos (SANTOS, 2010). Assim, a densidade da madeira é um dos índices mais utilizados para caracterização da biomassa, sendo que madeiras mais densas apresentam maior poder calorífico por unidade de volume (PEREIRA, 2000).

A idade das árvores interfere consideravelmente, pois diversas transformações ocorrem na madeira à medida que envelhece, podendo-se citar variações nas suas composições químicas, físicas e anatômicas. A idade de uma floresta é fator muito importante para uma empresa, uma vez que há mudança nas propriedades da madeira com o aumento da sua idade (CARNEIRO *et al.*, 2014), o que conseqüentemente afeta a idade de sua colheita.

A Tabela 5 apresenta os modelos selecionados, de acordo os critérios pré-estabelecidos, que melhor se ajustaram aos dados por característica avaliada.

Tabela 5. Modelos ajustados para densidade básica, energética e poder calorífico superior para os três clones em estudo

Densidade Básica			
Clone	Modelo Ajustado	R² ajustado (%)	CV (%)
1	$Y_i = 1,5151 - 0,607775X_i^{0,5} + 0,11051X_i - 0,00615016X_i^{1,5}$	88,12	3,00
3	$Y_i = 0,899665 - 0,286095X_i^{0,5} + 0,0584865X_i - 0,00349826X_i^{1,5}$	87,17	2,74
Comum 1 e 3	$Y_i = 1,20017 - 0,0442877X_i^{0,5} + 0,0837849X_i - 0,00478449X_i^{1,5}$	85,08	3,14
2	$Y_i = 0,53344 - 0,00885371X_i + 0,000242928X_i^2 - 0,00000166268X_i^3$	76,09	3,87
Densidade Energética			
Clone	Modelo Ajustado	R² ajustado (%)	CV (%)
1	$Y_i = 7,29319 - 2,96213X_i^{0,5} + 0,537044X_i - 0,0298185X_i^{1,5}$	87,79	3,15
2	$Y_i = 2,49569 - 0,0427952X_i + 0,00113054X_i^2 - 0,00000757525X_i^3$	67,59	4,83
3	$Y_i = 3,60476 - 0,980937X_i^{0,5} + 0,2064X_i - 0,0125269X_i^{1,5}$	84,23	2,66
Poder Calorífico Superior			
Clone	Modelo Ajustado	R² ajustado (%)	CV (%)
3	$Y_i = 4671,4 - 2,01905X_i$	36,09	1,19

R² = coeficiente de determinação; CV = coeficiente de variação

Fonte: Do autor (2022)

O modelo que melhor se ajustou aos dados, tanto para a densidade básica quanto densidade energética, foi o cúbico raiz para os clones 1 e 3, enquanto o modelo cúbico para o

clone 2. Como nos clones 1 e 3 os modelos selecionados foram de mesma forma (Tabela 5) para a densidade básica e energética, optou-se em realizar a análise de identidade de modelos lineares e testar a igualdade das equações de regressão. A Tabela 6 apresenta o resultado do teste de identidade de modelos lineares para a densidade básica e energética. O teste de identidade de modelos lineares mostrou que as equações são iguais e podem ser substituídas por uma comum para estes dois clones somente para a densidade básica da madeira.

Tabela 6. Teste de identidade de modelos lineares para a densidade básica e energética

FV	GL	QM Densidade Básica	QM Densidade Energética
Parâmetros (β)	8	2,098038	44,84684
Parâmetros (θ)	4	4,195227	89,65474
Redução (H_0)	4	0,000849ns	0,038943*
Resíduo	52	0,000229	0,005044
Total	60	-	-

ns = não significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade

Fonte: Do autor (2022)

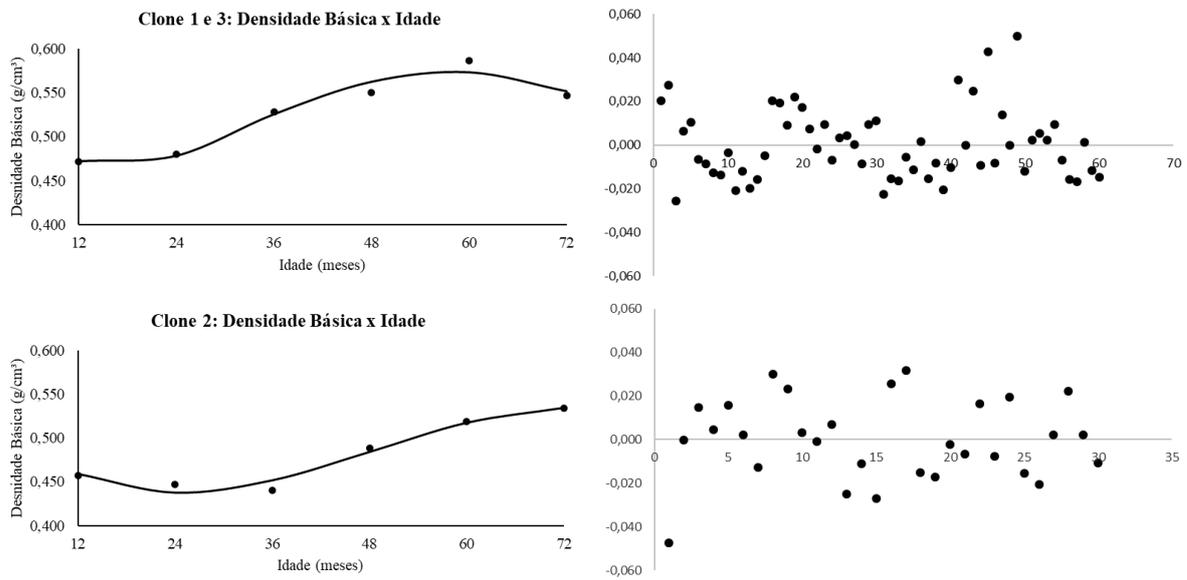
Para o poder calorífico superior os modelos ajustados foram não significativos e apresentaram sempre baixos valores de coeficiente de determinação (R^2), indicando que esta característica sofreu pouco efeito da idade na madeira dos clones. Somente no clone 3 o modelo linear simples apresentou significância da regressão, baixo coeficiente de variação, porém com R^2 de baixa magnitude.

A Figura 3 apresenta a relação funcional observada entre a densidade básica da madeira e a idade dos clones, além do gráfico de dispersão dos resíduos. É possível observar que os clones 1 e 3 mostram tendência aparente de estabilidade no valor da densidade básica nos 72 meses de idade, enquanto o clone 2 continua apresentando tendência de aumento. Os gráficos de dispersão residual mostram que os modelos de regressão apresentam pequena variabilidade, indicando que podem ser usados para estimar com precisão os valores de densidade básica da madeira. Este resultado indica que os clones 1 e 3 podem ser colhidos precocemente (até 60 meses) e o clone 2 deveria ser colhido em idade mais avançada (acima de 72 meses).

De modo geral, houve tendência de aumento da densidade básica da madeira com a idade das árvores. Este fato está associado às modificações progressivas nas estruturas celulares que compõem o lenho, especialmente pelo aumento da espessura da parede celular e diminuição

da largura do lume (RESQUIN *et al.*, 2019; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; LOUREIRO, 2022), o que influenciou diretamente na densidade energética (Figura 4).

Figura 3. Densidade básica da madeira em função da idade e gráfico de dispersão dos resíduos

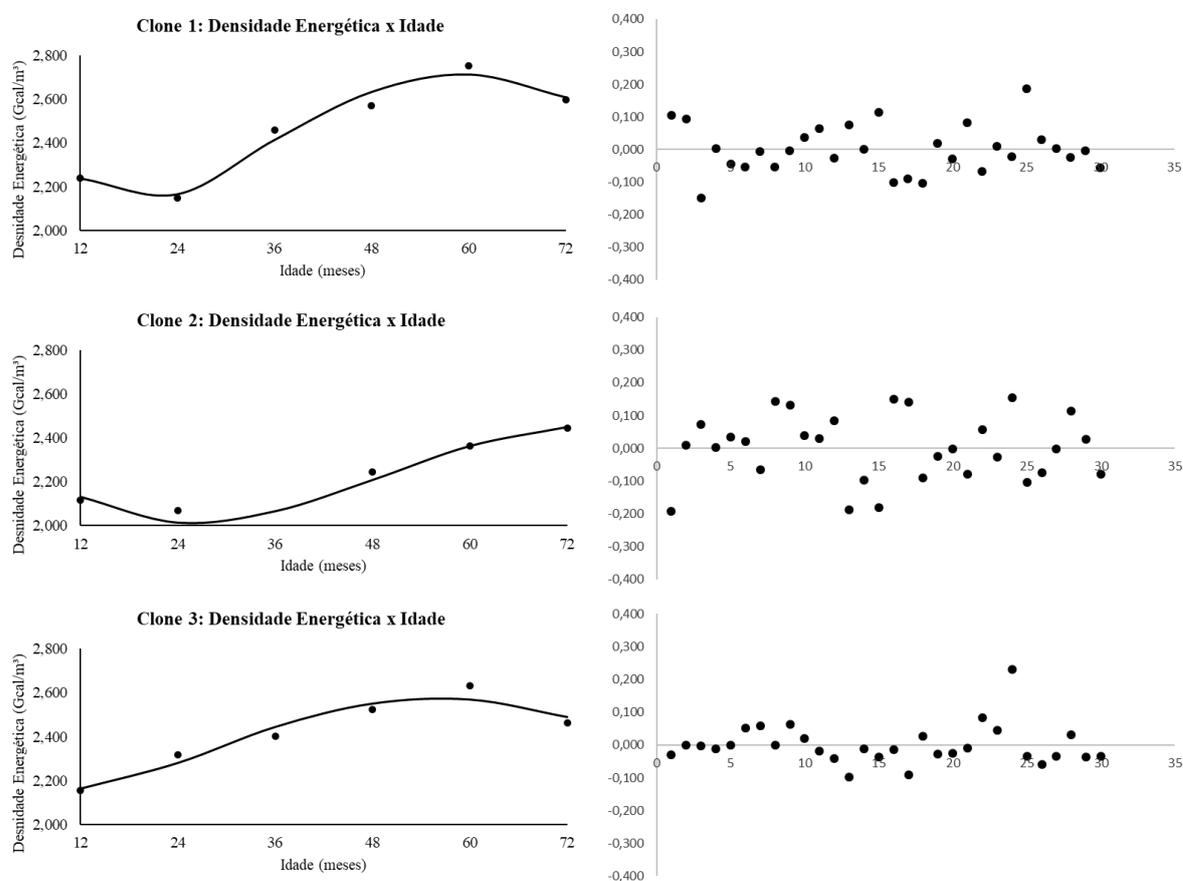


Fonte: Do autor (2022)

Com relação a densidade energética, Zaghi Neto (2016) relata que ela está positivamente correlacionada com a massa específica (ME), observa-se que quanto maior sua ME, maior será sua densidade energética. Jesus *et al.* (2017) relatam que a densidade energética se relaciona à energia contida em dado volume de madeira. Neves *et al.* (2011) ressalta que é desejável a madeira de elevada densidade energética, devido à maior massa do carvão vegetal produzido para um mesmo volume.

A Figura 4 mostra que os clones 1 e 3 apresentam comportamento semelhante em relação a tendência da densidade energética e que os dois tendem aparentemente à estabilização nos 72 meses de idade, enquanto o clone 2 possui comportamento similar ao apresentado para a densidade básica de sua madeira, ou seja, de continuar apresentando tendência de aumento com a idade. Os gráficos de dispersão residual mostram que os modelos de regressão apresentam pequena variabilidade, o que indica poderem ser usados para estimar com precisão os valores de densidade energética da madeira.

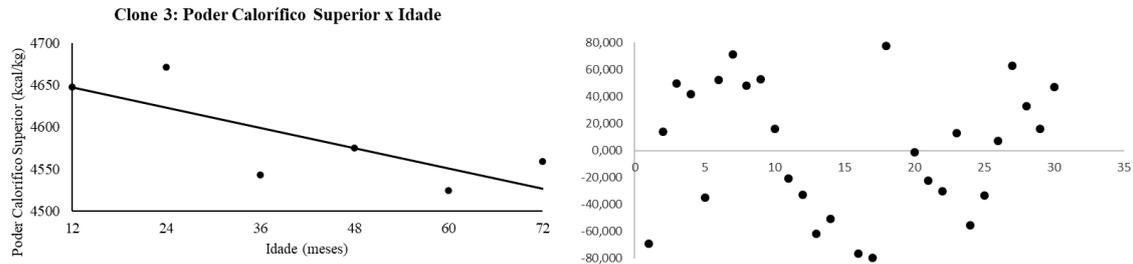
Figura 4. Densidade energética da madeira em função da idade e gráfico de dispersão dos resíduos



Fonte: Do autor (2022)

Para a produção de bioenergia, são recomendáveis maiores valores de densidade básica e energética da madeira, uma vez que há relação direta entre essas propriedades e a produção de energia. Esse fator afeta os custos da operação, pois madeira de alta densidade gera carvão de alta densidade, reduzindo o custo de transporte e fornece maior rendimento, por exemplo (SANTOS *et al.*, 2012).

A Figura 5 mostra a relação funcional entre o poder calorífico superior e a idade da madeira. É possível verificar que o poder calorífico superior apresentou tendência de redução com a idade da madeira, que ocorreu segundo o modelo linear simples para o clone 3. O gráfico de dispersão dos resíduos mostra que o modelo de regressão apresenta pequena variabilidade, o que indica poder ser usado para estimar os valores de poder calorífico superior da madeira, porém o seu coeficiente de determinação é considerado baixo (36,09%).

Figura 5. Poder calorífico superior em função da idade e gráfico de dispersão dos resíduos

Fonte: Do autor (2022)

Com relação ao poder calorífico superior, Carneiro *et al.* (2014) relataram em seus estudos que houve efeito da idade sobre o poder calorífico superior da madeira e diferença considerável entre clones de *Eucalyptus* spp. em todas as idades. No presente trabalho, somente o clone 3 apresentou tendência de redução com a idade, os outros dois clones não tiveram tendência de variação significativa.

Oliveira *et al.* (2010) avaliaram um clone de *Eucalyptus pellita* na idade de 5 anos (4.630 kcal kg⁻¹) e Santos (2010) estudou quatro clones híbridos de *Eucalyptus* spp. aos 7 anos (entre 4.274 kcal kg⁻¹ e 4.585 kcal kg⁻¹). Santana (2009) observou pouca influência da idade nessa variável e obteve valor médio de 4.610 kcal kg⁻¹ de um clone de *Eucalyptus grandis* dos 3 aos 7 anos. De acordo com Santana *et al.* (2012), há pouca influência da idade no PCS e esta característica apresenta pequena variação dentro de uma mesma espécie, o que também foi observado neste trabalho, pois a variação entre o menor e maior PCS foi de 4% (4.525 a 4.691 kcal kg⁻¹ nos clones 3 e 1 respectivamente).

6 CONCLUSÃO

A densidades básica (DB) e energética (DE) tenderam a aumentar com a idade para os três clones estudados, enquanto para o poder calorífico superior (PCS) este mesmo efeito não ocorreu. De modo geral, o PCS não apresentou muita variação com a idade, especialmente para os clones 1 e 2, apenas o clone 3 apresentou tendência de diminuir com a idade.

Para a DB e DE, os modelos selecionados foram o cúbico raiz para os clones 1 e 3, e o cúbico para o clone 2. Para o PCS o modelo linear simples melhor se ajustou aos dados somente para o clone 3.

O teste de identidade de modelos lineares mostrou que, para a DB, é possível utilizar uma equação comum para os clones 1 e 3, enquanto para a DE isto não foi possível.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.
- ASSIS, M. R. *et al.* Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.
- ASTM. American Society for Testing Materials. **E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM, 2004. 8 p.
- BICHEL, A.; TELLES, T. S. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 313, 127714, 2021.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.
- BROOKER, M. I. H.; KLEINIG, D. A. **Field Guide to Eucalyptus**. Southeastern Australia, 3 ed. vol. 1. Melbourne: Bloomings, 2006, 356 p.
- CARNEIRO, A. C. O. *Et al.* Potencial energético da madeira de *Eucalyptus sp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.375-381, 2014.
- CASTRO, F. N. M. *et al.* **Potencial energético da madeira de eucalipto**. 2013. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1727&subject=E%20. Acesso em: 24 ago. 2022.
- CHAVES, E., SANTOS, C. V. DOS, RAMOS, P. V., INDA JUNIOR, A. V., CANER, L. Propriedades físicas de um Argissolo após 17 anos de florestamento com *Eucalyptus spp.* **Research, Society and Development**, 10 (5), e58610514424. 2021.
- DE VECHI, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, C. A. O. Aspectos positivos e negativos da cultura do eucalipto e os efeitos ambientais do seu cultivo. **Revista Valore**, v.3, n.1, p. 495-507, 2018.
- DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H.; MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, L. R.; MUNERI, A. **Sampling Eucalyptus for wood and fibre properties**. Melbourne: CSIRO, 1997. 132 p.
- FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; KLEIN, J. E. M. Produção de florestas de *eucalyptus grandis hill ex maiden* em segunda rotação, conduzidas com um broto por touça e submetidas a interplântio. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 185-201, 1993.

FOELKEL, C. E. B. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 2016. Disponível em:

http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44_Geracao_Calor_Vapor_Eletricidade.pdf. Acesso em: 14 set. 2022.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 24, n. 135, p. 14-16, 2013.

GRAYBILL, F.A. **Theory and application of linear model**. Massachusetts: Duxburt Press, 1976. 704p.

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise de regressão uma introdução à econometria**. 2. ed. São Paulo: Hicitec, 1977. 379 p.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual Ibá 2021**. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes>. Acesso em: 24 ago. 2022.

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

LIMA, W. de P. **Impacto Ambiental do Eucalipto**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Edusp, SP, 2ª ed. 1993, 302 pág.

LOUREIRO, B. A. **Potencial energético da madeira de *Eucalyptus urophylla* em função da idade e de diferentes materiais genéticos**. Tese (doutorado). Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras – UFLA. Lavras/MG. 2022. 81p.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ci. Fl.**, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021.

MAGALHÃES, L. G. S.; LIMA, A. P. L.; LIMA, S. F.; SORATTO, D. N.; MARTINS, S. M.; SANTOS, I. F. F. Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.4, p.19435-19445, 2020.

MANI S, TABIL LG, SOKHANSANJ S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**; v.30, p.648–54, 2006.

MARTINI, A. J. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 332f. Dissertação (Mestrado em História Social) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MEIRELLES, D.; CALAZANS, M. **H2O para celulose x água para todas as línguas**. Vitória: FASE, p. 1- 96, 2006.

MORAES, C. B. **Variabilidade genética em progênies de polinização aberta de Eucalyptus urophylla para tolerância ao frio**. 2013. 90 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

MORAIS, P. H. D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica. Viçosa/MG. 2008.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; OLIVEIRA, J. G. L.; CAMPINHOS, E.; GOMES, F.; VIDAURRE, G. B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n.1, e00073914, 2017.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OBERNBERGER I, THEK G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**; v.27, p.653–69, 2004.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIRA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, P. B. M. de *et al.* Avaliação energética da madeira de clones de Eucalyptus spp. **Anais... III CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**. Florianópolis. 2017. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/galao-proceedings--cbctem--61322.pdf. Acesso em: 24 ago. 2022.

PALERMO, G. P. M. *et al.* Determinação da densidade da madeira de Pinus elliottii Englm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, v.11, n.1, p.1-6, 2004.

PAULINO, E. J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantios de eucalipto**. Dissertação. Mestrado em Manejo Florestal. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. 2012.

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. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de Eucalyptus grandis e Eucalyptus urophylla. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 801- 816, 2015.

PROTASIO, T. P. *et al.* Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, abr.-jun., 2014.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, mar. 2013.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; CASNATI, C. R. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 438, p. 63-74, 2019.

RODRIGUES, G. S. S. C., ROSS, J. L. S., TEIXEIRA, G., SANTIAGO, O. R. P. L., FRANCO, C. **Eucalipto no Brasil: expansão geográfica e impactos ambientais**. Uberlândia: UFU. 2021. 178p.

SAEG. Sistema para Análises Estatísticas. **Versão 9.1**. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes - UFV, 2007.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com enfoque energético**. 2009. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

SANTANA, W. M. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, 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**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

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

SANTOS, S. de F. de O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 309-321, 2012.

SETTE JUNIOR, C. R.; OLIVEIRA, I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SILVA, J.C.*et al.* Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill exMaiden. **Revista Floresta**, v.34, n.1, p.13-22, 2004.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. A.; DEBONI, T. L.; PASSOS, B. M. Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: o caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de Itapeva – SP. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 310-323, 2018.

SOARES, T. S. et al. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, n. 8, p. 1-9, 2006.

SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

STAHL, M. **Improving Wood Fuel Pellets for Household Use**. Faculty of Technology and Science Environmental and Energy Systems, Doctoral Thesis. Sweden, 2008, 91p.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Revista IPEF**, n.29, p.37-45, 1985.

TRUGILHO, P. F. **Energia da biomassa florestal**. 2017. Disponível em: <https://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Palestras/Palestra-05.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2022.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v.2, n.1, p.15, 1996.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M. de; VEIGA, R. A. de A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* HillEx-Maiden e acacia mangium Willd em diferentes níveis de adubação. **Revista Cerne**, v.6, n.1, p.83-88, 2000.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 89-95, 2001.

WINK, C.; REINERT, D. J.; MÜLLER, I.; REICHERT, J. M.; JACOMET, L. A idade das plantações de *Eucalyptus* sp. influenciando os estoques de carbono. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 333-343, 2013.

ZAGHI NETO, B. **Caracterização química e energética da madeira de quatro clones de eucalipto**. Trabalho de Curso. Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT. Sinop/MT. 2016.