



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Fatores de conversão para madeira em metros cúbicos, empilhada e cavaqueada em plantios de eucalipto sob diferentes espaçamentos

Thais Gabrielle Ferreira do Nascimento Pereira

Brasília, setembro de 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Fatores de conversão para madeira em metros cúbicos, empilhada e cavaqueada em plantios de eucalipto sob diferentes espaçamentos

Thais Gabrielle Ferreira do Nascimento Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Brasília-DF, setembro de 2024



Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Engenharia Florestal – EFL

FICHA CATALOGRÁFICA



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thais Gabrielle Ferreira do Nascimento Pereira

TÍTULO: Fatores de conversão para madeira em metros cúbicos, empilhada e cavaqueada em plantios de eucalipto sob diferentes espaçamentos

GRAU: Engenharia Florestal

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Thais Gabrielle Ferreira do Nascimento Pereira

gabithaisxferreira@gmail.com

Aos meus pais, Aldeni Ferreira do Nascimento e
Edvaldo Pereira dos Santos, dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Aldeni Ferreira do Nascimento e Edvaldo Pereira dos Santos, por todo apoio incondicional e por me proporcionarem todas as condições necessárias para eu pudesse seguir meus objetivos e sonhos.

Às minhas irmãs Grazielle e Raissa, por estarem ao meu lado diariamente e por nunca permitirem que eu desistisse.

Aos meus sobrinhos Biel e Dudu, por trazerem novo sentido à minha vida, tornando meus dias mais felizes e leves com todo carinho e alegria que me proporcionam.

Ao meu orientador Dr. Éder Pereira Miguel, expresso minha profunda gratidão pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo desta jornada, pela paciência, e sobretudo, pela amizade.

Aos dedicados funcionários da Fazenda Água Limpa, que me auxiliaram de forma incansável durante dos trabalhos de campo.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão às minhas queridas amigas Giovanna, Jéssica e Joyce, que me acompanharam ao longo de toda a graduação. Com sua amizade incondicional, apoio constante e palavras de incentivo, vocês transformaram cada desafio em uma oportunidade de crescimento e tornaram essa jornada muito mais leve e significativa. Cada conquista que alcancei teve ainda mais valor por ter o privilégio de contar com a presença e a força de vocês ao meu lado.

Por fim, a todos os professores do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, suas contribuições foram essenciais para minha formação acadêmica.

RESUMO

Thais Gabrielle Ferreira do Nascimento Pereira (PEREIRA, T. G. F. N.) **Fatores de conversão para madeira em metros cúbicos, empilhada e cavaqueada em plantios de eucalipto sob diferentes espaçamentos.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Esse trabalho teve como objetivo desenvolver fatores de conversão para madeira cúbica, empilhada e cavaqueada em plantios de eucalipto sob diferentes espaçamentos. Foram cubadas 59 árvores pelo método de Smalian, em um povoamento híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com 10 anos de idade em 12 espaçamentos distintos. Os resultados mostraram que o fator de forma variou de 0,39 a 0,47, com tendência de aumento conforme a área vital disponível crescia. O fator de empilhamento variou de 1,32 a 1,46, enquanto o fator de cubicação oscilou entre 0,68 e 0,76. O fator de cavaqueamento apresentou valores 2,18 a 3,54, sendo que nos espaçamentos mais amplos esse fator tende a ser menor em função da maior produção de cerne. Esse estudo também revelou que espaçamentos menores, como 0,50 m², resultaram em maior produção por hectare, enquanto espaçamentos maiores, como 41,25 m², permitiram um aumento significativo na biomassa individual. A análise do teor de umidade do cavaco em campo indicou que espaçamentos mais adensados tendem a perder umidade mais rapidamente, com valores variando entre 34,06% e 39,23%. Essa diferença influencia diretamente a eficiência da biomassa como fonte energética. Concluiu-se que o espaçamento afeta diretamente a produtividade e a qualidade da madeira. Espaçamentos menores são mais eficientes para produção volumétrica por hectare, enquanto espaçamentos maiores favorecem o crescimento individual das árvores e a produção de biomassa. A escolha adequada do espaçamento pode otimizar a produção de cavacos e biomassa, com implicações diretas para a silvicultura e o manejo florestal.

Palavras-chave: Biomassa; Fator de forma; Produtividade; Teor de umidade.

ABSTRACT

Thais Gabrielle Ferreira do Nascimento Pereira (PEREIRA, T. G. F. N.). **Conversion factors for wood in cubic meters, stacked and chipped, in eucalyptus plantations under different spacings**
Monograph (Forestry Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

The objective of this study was to develop conversion factors for cubic, stacked, and chipped wood in eucalyptus plantations under different spacing arrangements. A total of 59 trees were measured using the Smalian method in a 10-year-old clonal hybrid stand of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* across 12 distinct spacing configurations. Results indicated that the form factor ranged from 0.39 to 0.47, with a tendency to increase as the available growing space expanded. The stacking factor varied from 1.32 to 1.46, while the cubic factor ranged between 0.68 and 0.76. The chipping factor showed values from 2.18 to 3.54, with wider spacings exhibiting lower values due to increased heartwood production. The study also revealed that smaller spacings, such as 0.50 m², resulted in higher yield per hectare, while larger spacings, such as 41.25 m², led to a significant increase in individual biomass. Field analysis of chip moisture content indicated that denser spacings tend to lose moisture more rapidly, with values ranging from 34.06% to 39.23%. This variation directly impacts the efficiency of biomass as an energy source. It was concluded that spacing directly affects wood productivity and quality. Smaller spacings are more efficient for volumetric production per hectare, while larger spacings favor individual tree growth and biomass production. Proper spacing selection can optimize chip and biomass production, with direct implications for silviculture and forest management.

Keywords: Biomass; Form factor; Productivity; Moisture content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Posições de medição do diâmetro ou a circunferência das seções são medidos conforme os métodos de cubagem absoluta.	14
Figura 2. Mapa de localização da área de estudo, na Fazenda Água Limpa no Parque Way – Distrito Federal.	18
Figura 3. Coleta de dados. a) medição do CAP com auxílio de fita métrica; b) marcação de árvore com spray; e c) medição da altura de árvore cubada com o auxílio de fita métrica.	20
Figura 4. Amostragem para cubagem da pilha de madeira.	21
Figura 5. Empilhamento da madeira por fileira (espaçamento).	22
Figura 6. a) medição da circunferência dos toretes com auxílio de uma suta; b) pesagem dos toretes com o auxílio de uma balança; c) diminuição no tamanho dos toretes com auxílio de cunhas, marretas e motosserra.	23
Figura 7. Cavaqueamento da madeira. a) utilização da caixa para medir 1 m ³ de cavaco; b) trator com o picador acoplado; c) pilha de cavaco.	23
Figura 8. a) pesagem dos discos com auxílio da balança; b) estufa para secagem dos discos; c) discos secos após atingirem valor de peso constante.	24
Figura 9. Perfil do fuste das árvores em diferentes espaçamentos até o diâmetro mínimo de ± 4 cm. Onde: 12 = 41,25 m ² de área vital; 11 = 28,03 m ² de área vital; 10 = 19 m ² de área vital; 9 = 12,86 m ² de área vital; 8 = 8,96 m ² de área vital; 7 = 5,86 m ² de área vital; 6 = 3,94 m ² de área vital; 5 = 2,64 m ² de área vital; 4 = 1,76 m ² de área vital; 3 = 1,17 m ² de área vital; 2 = 0,77 m ² de área vital; e 1 = 0,50 m ² de área vital; DAP = diâmetro à altura do peito a 1,30 metros; hc = altura comercial com diâmetro ± 3 centímetros.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espaçamento de plantio, área por planta e densidade de árvores para 12 tratamentos (espaçamentos) no delineamento tipo “leque”.	19
Tabela 2 . Apresentação dos valores calculados para os fatores de forma, empilhamento, cubicação e cavaqueamento para os 12 espaçamentos da área de estudo.....	26
Tabela 3. Parâmetros produtivos: IMA, Volumes e Peso nos 12 espaçamentos da área de estudo.	28
Tabela 4. Teor de umidade da madeira.	29
Tabela 5 – Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo geral	10
2.2	Objetivos específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Eucalipto.....	11
3.2	Espaçamento.....	12
3.3	Volume.....	13
3.3.1	Cubagem rigorosa	14
3.3.2	Xilômetro.....	15
3.3.3	Fator de forma.....	15
3.3.4	Fator de empilhamento.....	16
3.3.5	Modelos volumétricos	16
3.4	Cavaco.....	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1	Área de estudo	18
4.2	Amostragem.....	20
4.3	Cubagem.....	20
4.4	Cavaqueamento.....	22
4.5	Secagem de discos	23
4.6	Estudo da forma do fuste.....	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6	CONCLUSÃO	32
7	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um recurso natural, sustentável e renovável. Sua utilização em diferentes áreas como na produção de biomassa, construção civil e indústria moveleira, possui alta relevância para o desenvolvimento econômico de um local (SILVA et al., 2017). É um recurso de alta produtividade e com taxas de investimentos positivas, gera alta competitividade no mercado interno e externo (PINTO JÚNIOR et al., 2014). Atualmente estima-se que estejam plantadas 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas, destinadas a fins industriais no Brasil, com destaque para os plantios de pinus com 1,9 milhões de hectares e eucalipto com cerca de 7,6 milhões de hectares (IBÁ, 2023).

Na economia brasileira o setor florestal desempenha um papel muito importante, pois contribui na produção de bens e serviços, agrega valor aos produtos florestais, gera emprego e renda, investimentos e pesquisa e favorece o desenvolvimento de novas técnicas (MOREIRA e OLIVEIRA, 2017).

No Distrito Federal, os plantios de eucalipto ocupam áreas pequenas e o seu mercado florestal é influenciado pelo estado de Goiás. A lenha corresponde a 26,3% da produção florestal do DF, sendo o principal produto comercializado. Apesar da produção de eucalipto nessa região ser incipiente, há perspectivas de desenvolvimento e avanço. O aumento na produtividade desse gênero é evidente ao longo dos anos no país, no ano de 2014 registrou-se a marca de $35,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, oito anos depois, em 2022 a produção de eucalipto alcançou $32,7 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$, enquanto o maior estado com a maior produção média alcançou $42,4 \text{ m}^3/\text{há}/\text{ano}$ (IBÁ, 2023).

Dentre os fatores que contribuem para a posição de destaque do eucalipto no Brasil, além dos investimentos governamentais e não governamentais (MOTA, 2017) o mais importante é determinado pela alta produtividade, ótimas condições climáticas e edafoclimáticas, vasta extensão territorial, incentivo a programas de melhoramento genético que são essenciais para o desenvolvimento de materiais de alta qualidade para os plantios florestais (BERGER et. al., 2002; AQUINO, 2017; FERNANDES et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2020).

A madeira de eucalipto possui diversas características que a tornam atrativas para diferentes aplicações. Além do rápido crescimento apresenta uma boa resistência mecânica, sendo muito utilizada na construção civil, para produção de estruturas e móveis, pois apresenta boa durabilidade e resistência natural a pragas e fungos quanto na indústria de papel e celulose, devido as suas fibras curtas e uniformes (LONGUE JÚNIOR e COLODETTE, 2013), além de ser utilizada na produção de produtos sólidos de madeira na forma de cavacos.

Os cavacos de madeira possuem destaque no setor de produtos sólidos no mercado internacional, sendo considerado produto com maior consumo. A transformação da madeira de eucalipto em cavacos é importante devido a sua ampla gama de aplicações na indústria, pois promove a utilização sustentável de recursos naturais gerando uma redução no impacto ambiental (UCELLA-FILHO et al., 2022).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver fatores de conversão para madeira em metros cúbicos, empilhada e cavaqueada em plantios de eucalipto sob diferentes espaçamentos.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Desenvolver fatores de conversão de madeira sólida para madeira empilhada em plantios de eucalipto em diferentes espaçamentos.
- ✓ Determinar fatores de conversão de madeira em metros cúbicos e empilhada para volume de madeira cavaqueada em função dos diferentes espaçamentos;
- ✓ Analisar a influência do espaçamento na produtividade e na qualidade da madeira, considerando a variação de fatores como o teor de umidade e a biomassa individual e por hectare;
- ✓ Avaliar a relação entre o espaçamento e a eficiência da biomassa como fonte energética.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Eucalipto

Pertencente à família Myrtaceae e nativo da Austrália, o gênero *Eucalyptus* possui mais de 700 espécies conhecidas, além de muitas variedades e híbridos desenvolvidos (SANTOROSA et al., 2014; BATISTA, 2017). A introdução do eucalipto no Brasil ocorreu no início do século XX, impulsionada pela crescente industrialização de São Paulo, o aumento da população e a expansão das ferrovias, que demandavam grandes quantidades de madeira para uso energético (RODRIGUES et al., 2021).

Entre as florestas plantadas, a produção de eucalipto no Brasil é o gênero com maior quantidade de espécies cultivadas, onde 76% correspondem a área de cultivos florestais, com cerca de 7,6 milhões de hectares da área total destinada ao plantio, os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo são os principais produtores de florestas plantadas no território nacional (IBÁ, 2023).

A utilização de clones de árvores, favoreceu o crescimento produtivo nacional em relação ao mercado exterior (PALUDZYSZYN FILHO, 2014). As espécies de clones mais utilizadas no Brasil são *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* (SILVA, 2005). Na eucaliptocultura a análise do material genético é um fator de extrema importância, pois os clones se comportam de maneiras distintas no ambiente conforme as características edafoclimáticas.

A Embrapa Florestas é responsável pelo programa de melhoramento genético de eucalipto no Brasil, realiza a identificação de características genéticas, assim como processos de recombinação natural ou controlada e identifica indivíduos excepcionais para lançamentos de novas variedades comerciais (PALUDZYSZYN FILHO & SANTOS, 2012).

Há registros de diferentes climas no extenso território nacional, a escolha do clone adequado deve ser considerada para supor limitações nutricionais e estresses hídricos. Atualmente os indivíduos são selecionados de acordo com a presença de características favoráveis para o plantio, a pré-seleção ocorre por meio de marcadores moleculares que estão

relacionados a comportamentos ecofisiológicos desejáveis, como taxa fotossintética, padrão de crescimento radicular, potencial hídrico celular, abertura de estômatos, arquitetura da copa e queda de folhas (GRATTAPAGLIA et al., 2009; STAPE, et. al., 2014).

O estresse hídrico presente nas regiões de clima tropical é o principal fator limitante da produtividade do eucalipto. Em áreas com esse estresse o plantio comercial de *E. grandis*, *E. urophylla* e *E. cloeziana* são favorecidos (STAPE et al., 2010).

A biomassa sólida vem sendo utilizada para produzir biocombustíveis, a base da sua composição são resíduos agrícolas e florestais. Analisando o valor energético, a utilização da madeira sempre foi considerada uma fonte de energia acessível e com ótimo custo, podendo ser empregada na produção de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007). A biomassa antes de ser destinada à produção de energia é necessária uma pré-avaliação para definir o potencial de combustão (BORGES, 2015).

Diante do grande consumo de combustíveis fósseis, a utilização da madeira de eucalipto como fonte de energia surge como fonte alternativa e atrativa do ponto de vista social, econômico e ecológico por ser uma fonte renovável o que favorece o seu uso e contribui para a diminuição das emissões dos gases de efeito estufa (SORDI et al., 2005).

3.2 Espaçamento

O estudo do espaçamento visa determinar as necessidades específicas de cada sítio florestal, identificando qual o material genético é mais adequado e para diferentes finalidades, considerando as diversas respostas às variações no espaçamento entre os plantios (STAPE et al., 2010; BENIN et al., 2014; FERREIRA et al., 2014; MORTE, 2020). O espaçamento é crucial para estabelecer plantios florestais, pois está diretamente relacionado aos aspectos silviculturais, tecnológicos e econômico dos povoamentos (AQUINO, 2017).

A escolha do espaçamento está associada à área vital do indivíduo arbóreo, determina o crescimento diamétrico, volume e altura do tronco, bem como a taxa de sobrevivência. Interfere também na idade de corte, na qualidade da madeira resultante e em outras práticas silviculturais aplicadas, e, por fim, tem implicações diretas nos custos associados à produção florestal (ELOY

et. al., 2010; PEREIRA, 2015; DE ASSIS LEAL et al., 2016; LOPES et al., 2017; PROFÍRIO, 2018; CÔRREA et al., 2020).

O espaçamento ideal é aquele que otimiza a produtividade, melhora a qualidade, reduz o tempo de crescimento e minimiza os custos associados ao cultivo, conforme os objetivos específicos pretendidos (TONINI, 2003; CHIES, 2005; LELES et al., 2011; AQUINO, 2017).

3.3 Volume

O volume representa a quantidade de espaço ocupado pela madeira, geralmente expressa em metros cúbicos ou metros estéreos, é considerado uma medida biofísica de florestas (MENDES, 2018). Entender esse parâmetro é essencial para compreender aspectos críticos da distribuição espacial e temporal das florestas (MIURA et al. 2010).

Para garantir erros menores e conseqüentemente pequenos prejuízos financeiros para as partes interessadas, a madeira deve passar por um processo rigoroso de quantificação volumétrica. Diante disso, a determinação do volume é a variável mais significativa para os gestores florestais, pois é responsável por estimar o volume de madeira em pé e realizar prognoses do crescimento florestal (CAMPOS; LEITE, 2013).

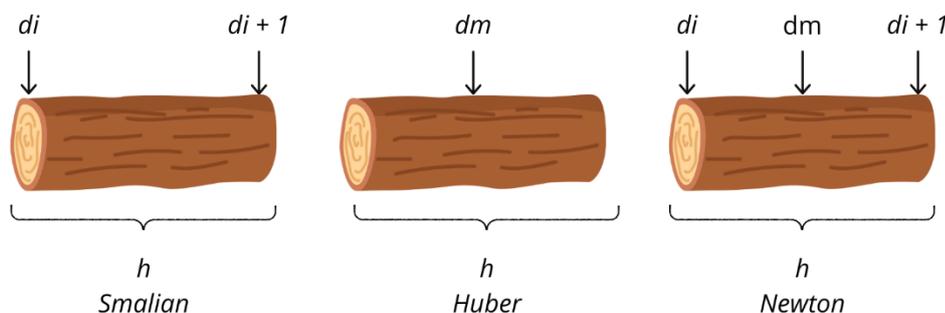
A utilização de equações volumétricas representa uma das principais ferramentas para a avaliação quantitativa da produção em comunidades florestais, desempenhando um papel fundamental no estabelecimento de práticas de manejo sustentável em plantações florestais (LEITE; ANDRADE, 2003). Essas equações estabelecem uma correlação significativa entre os volumes das árvores e variáveis de fácil medição dentro do povoamento, como a altura e o diâmetro a 1,30 metros do solo (DAP).

Existem diferentes métodos disponíveis para estimar a produção volumétrica de uma floresta. Os métodos mais utilizados fazem o uso do fator de forma, o quociente de forma e a aplicação de modelos volumétricos desenvolvidos a partir de dados obtidos através de cubagem rigorosa de árvores derrubadas ou árvores cubadas enquanto em pé (SOARES et al., 2006). O emprego de modelos volumétricos é considerado o método mais eficaz para quantificar o volume de um povoamento florestal (GUIMARÃES & LEITE, 1996).

Com as dimensões do fuste de uma árvore não são regulares ao longo de seu comprimento, não é possível calcular o volume por meio de fórmulas geométricas simples. Devido ao afinamento natural ocasionado com o aumento da altura, há presença de diferentes formas geométricas na extensão do tronco (DA SILVA; NETO, 1979; CAMPOS; LEITE, 2013). Para contornar o problema citado métodos destrutivos foram desenvolvidos, onde há necessidade de abate do indivíduo para realizar a mensuração. A cubagem rigorosa e a medição por xilômetro são os principais métodos destrutivos, pois realizam medições diretas da árvore (SOARES et al., 2012).

3.3.1 Cubagem rigorosa

As fórmulas de Huber, Smalian e Newton, são bastante utilizadas dentro do manejo florestal e são considerados métodos absolutos, pois o comprimento das seções não está relacionado ao comprimento total do fuste (CABACINHA, 2003; CARDOSO, 2016). Cabe ressaltar que os dados utilizados na cubagem possuem altíssima correlação entre o diâmetro e a forma da árvore (CAMPOS; LEITE, 2013). O cálculo consiste em medições do diâmetro em todo o fuste, através de seções, onde em cada seção o volume é obtido através de fórmulas e ao final é somado (LEITE; ANDRADE, 2003).



Onde: d_i = diâmetro da base da tora; d_{i+1} = diâmetro do topo da tora; d_m = diâmetro no meio da tora.

Figura 1. Posições de medição do diâmetro ou a circunferência das seções são medidos conforme os métodos de cubagem absoluta.

Fonte: Thais Gabrielle (2024).

A fórmula de Smalian é a escolha mais frequente para estimar o volume no contexto brasileiro (FLORIANO, 2021). É considerado o método oficial para determinar o volume durante transporte de toras no Brasil (IBAMA, 2015).

3.3.2 Xilômetro

A xilometria é um método preciso para calcular o volume da madeira, que envolve a medição do deslocamento de água pelo princípio de Arquimedes, é o único método que fornece o valor paramétrico, ou seja, o volume real (MACHADO et al., 2006; SOUZA et al., 2017). Quando uma tora de madeira é inserida em um tanque de água nivelado, ocorre um deslocamento de água que pode ser cuidadosamente medido para determinar o volume (MACHADO et al., 2006; LIMA et al., 2016). No entanto, sua aplicação é limitada e restrita, devido ao consumo excessivo de tempo e por ser uma atividade onerosa (SANQUETA et al., 2014).

Existem métodos não invasivos, como cálculos baseados em fator de forma, quociente de forma e equações de regressão, que são considerados estimativas de volume e não representam seu volume real. Portanto, é necessário utilizá-los com atenção devido à sua precisão (SOARES, 2012). Os principais métodos incluem:

3.3.3 Fator de forma

As variações presentes na forma do tronco são ocasionadas pela redução dos diâmetros da base ao topo da árvore (FIGGER, 1992). Conhecida também como “forma da árvore ou taper” responsável pela variação do volume da árvore em relação à espécie, diâmetro à altura do peito, idade, manejo e sítio (TREVISAN, 2006).

A aplicação do fator de forma é considerada simples, o cálculo é determinado multiplicando o fator de forma, pela área transversal média da árvore pela sua altura (SANQUETTA et al., 2017; NICOLETTI et al., 2021). Este valor consiste em um valor médio calculado pela razão entre o volume real do indivíduo arbóreo e o volume de um cilindro (DA SILVA; NETO, 1979; THAINES et al., 2010; SOARES et al., 2012).

A utilização do fator de forma é necessária pois características das árvores, como o diâmetro, comprimento, espessura da casca, empilhamento e espaçamento afetam os cálculos de volume, a falta de um fator pode gerar estimativas grosseiras nos valores de volume (BARROS, 2006). O seu uso corrige a conicidade entre o volume da madeira e o volume do cilindro (THAINES et al., 2010; NICOLETTI et al., 2021) e sua aplicação é recomendada por idade, classe diamétrica, devido as variações de forma (KOHLENER, 2013).

3.3.4 Fator de empilhamento

O fator de empilhamento, é um fator que converte o volume sólido (m^3) para volume estéreo (st), e pode ser definido pela razão entre o volume empilhado em estéreo e o volume sólido (com ou sem casca) obtido através da cubagem (PAULA NETO et al., 1993; SOARES et al., 2006; BERTI, 2019).

Aspectos como, características das árvores, entre elas diâmetro, comprimento da tora, espessura da casca, idade, espécie, conicidade etc., características do povoamento como, espaçamento, sítio e fatores climáticos, e fatores humanos e operacionais, interferem no fator de empilhamento (COUTO; BASTOS, 1988; REZENDE; PAULA NETO, 1991; PAULA NETO et al., SOARES et al. 2006; FOELKEL, 2015; BERTI, 2019).

Diferentes autores ressaltam que o uso de um fator de empilhamento médio em diferentes situações, pode causar erros significantes na estimativa do volume estéreo. Isso ocorre devido à grande variação das características da madeira e esses fatores podem resultar em erros substanciais nas medições (PAULA NETO et al., 1993; BATISTA; COUTO, 2002; SOARES et al. 2006; BERTI, 2019).

3.3.5 Modelos volumétricos

São modelos que consistem em expressões matemáticas que empregam variáveis dendrométricas de fácil obtenção para estimar a variável de interesse. Os modelos são gerados por meio da análise de regressão, envolve o processo de ajuste gráfico de uma curva que se ajusta de maneira otimizada aos dados, de modo a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores reais e os valores estimados (DA SILVA; NETO 1979).

Nos últimos anos, no Brasil, os modelos volumétricos amplamente adotados incluíram o de Schumacher e Hall, Stoate, Spurr, Meyer, Naslund, Ogava, takata e Honer. No entanto, entre esses modelos, Schumacher e Hall, que é um modelo não linear, e os modelos lineares de Spurr e Meyer, destacam-se por fornecer estimativas mais precisas em povoamentos florestais brasileiros, e são, portanto, os mais frequentemente aplicados (ANDRADE et al. 2017).

3.4 Cavaco

Cavaco de madeira é um conjunto de pequenos pedaços de madeira, denominados também como *woodchips*, possui características favoráveis a geração de energia térmica em fornos e caldeiras quando comparados com a madeira em tora, isso ocorre devido a maior área de contato superficial e maior reatividade do material (PEREIRA, 2017).

Dentre seus usos potenciais, destacam-se a aplicação no processo de polpação química para obtenção da polpa celulósica (ZANÃO et al., 2019; ROBLES et al., 2020), energia (MIRANDA et al., 2017; PEDIŠIUS et al., 2021) e fabricação de painéis reconstituídos de madeira (BELINI et al., 2008; LI et al., 2011).

A obtenção desse material ocorre por meio do processo de picagem da madeira, os tamanhos podem variar de acordo com o ajuste do picador ou fatiador, além das características da madeira sujeita ao processo. Existem várias classes granulométricas para os cavacos, essas classes estão associadas ao tipo do picador, ao ângulo do corte das facas, à espécie da árvore, à densidade da madeira, à umidade e à presença de contaminantes (LIPPEL, 2021).

A identificação da classe granulométrica dos cavacos é essencial para garantir que as características necessárias para a sua aplicação sejam alcançadas. Para cada tipo de uso é fundamental que os cavacos atendam a requisitos específicos de qualidade, sendo a granulometria um dos fatores mais cruciais. Além disso, a determinação da densidade, umidade e composição química também desempenha um papel importante para ajudar a definir a adequação dos cavacos de madeira para fins específicos (UCELLA-FILHO et al., 2022).

A utilização do cavaco de madeira de eucalipto mostra-se como uma alternativa de energia renovável para a produção energética mundial (PERERIRA, 2017). Os biocombustíveis estão ganhando força em relação aos combustíveis fósseis e há destaque para esses resíduos florestais que são gerados em grande quantidade nos processos de colheita (CORTEZ, et al., 2009). O Brasil tem destaque, devido ao território extenso e o clima que garante vantagens ao país nesse setor (WESLER, et al, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em um plantio de eucalipto na Fazenda Água Limpa (FAL) (Figura 2), localizada no Distrito Federal, cerca de 20 km na região Sul da cidade de Brasília. A Fazenda possui uma área total de 4.500 hectares. Está inserida na Área de Proteção Ambiental das Bacias do Gama e Cabeça do Veado, e abriga em seu território a Área de Relevante de Interesse Ecológico (ARIE) Capetinga/Taquara. A sua vegetação predominante é composta por tipologias do bioma Cerrado, com destaque ao cerrado *sensu stricto*.

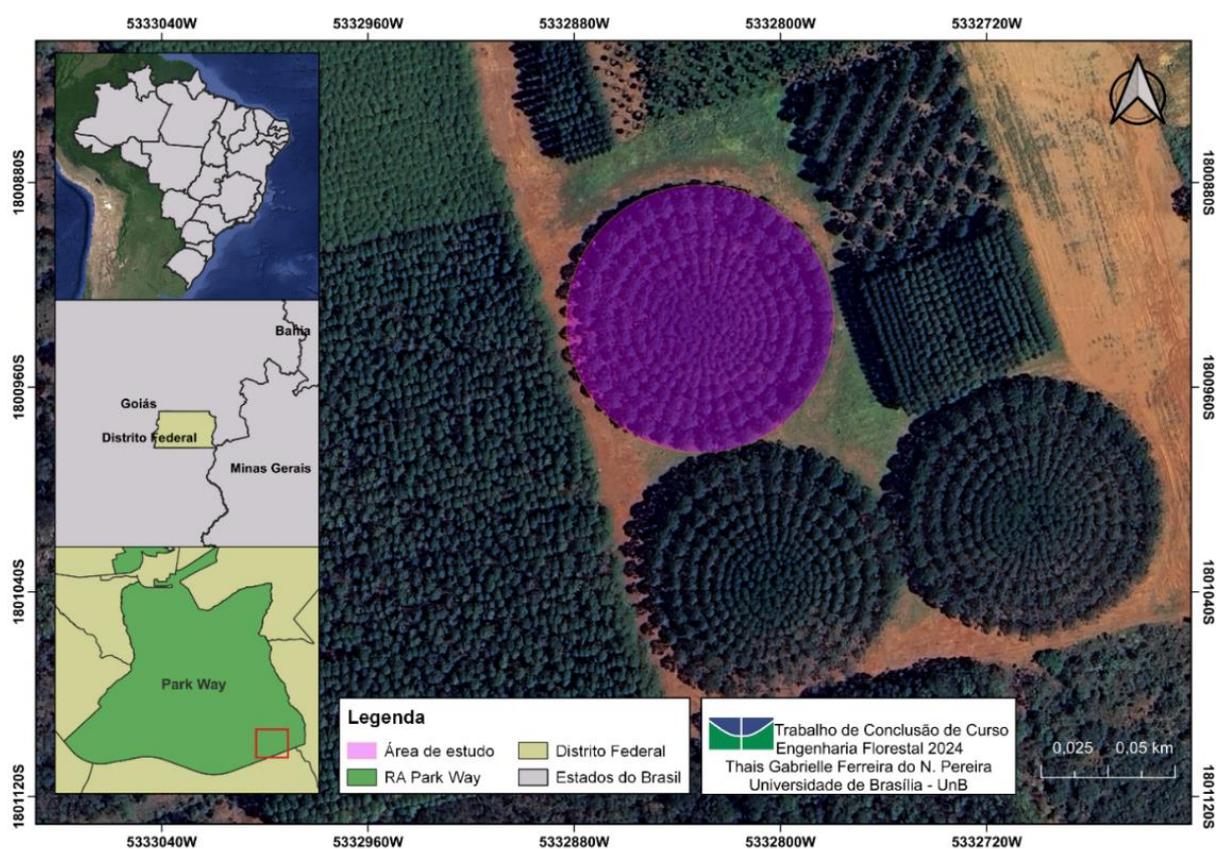


Figura 2. Mapa de localização da área de estudo, na Fazenda Água Limpa no Parque Way – Distrito Federal. Fonte: Thais Gabrielle (2024).

A altitude média da região é de 1.100 m, com vegetação primária natural do tipo Cerrado *stricto sensu* e apresenta solo predominantemente Latossolo Vermelho distrófico. O clima é

Aw, conforme a classificação de Koppen, com temperaturas de mínima e máxima que variam entre 12 e 28,5°C, e apresenta 1.500 mm de precipitação pluvial média por ano, com estação seca definida entre julho e setembro (GATTO et al., 2014).

O híbrido clonal utilizado no plantio foi *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, comercialmente conhecido como clone EAC 1528, implantado em 11 de dezembro de 2013 (AQUINO, 2017). Os dados foram provenientes de um experimento organizado em um delineamento do tipo “leque” (NELDER; 1962). Esse tipo de delineamento é caracterizado pela definição dos seguintes parâmetros: raio inicial r_0 , a razão da progressão geométrica dos raios ou fator de espaçamento (α), o ângulo entre os raios (θ) e a áreas (A_i) entre as árvores.

Tabela 1. Espaçamento de plantio, área por planta e densidade de árvores para 12 espaçamentos no delineamento tipo “leque”.

Tratamento		Espaçamento (entre árvores x entre raios)	Área vital (m ²)	Densidade (árvores.ha ⁻¹)
	Borda Interna	0,66 x 0,49	0,32	31.250
	1	0,80 x 0,63	0,50	20.000
	2	0,96 x 0,80	0,77	12.987
Adensados	3	1,17 x 1,00	1,17	8.547
	4	1,41 x 1,25	1,76	5.681
	5	1,71 x 1,54	2,64	3.787
	6	2,07 x 1,91	3,94	2.538
	7	2,50 x 2,34	5,86	1.706
Intermediários	8	3,03 x 2,87	8,69	1.150
	9	3,66 x 3,51	12,86	777
	10	4,43 x 4,28	19,00	526
Amplios	11	5,37 x 5,22	28,03	357
	12	6,49 x 6,35	41,25	242
	Borda Externa	7,85 x 7,72	60,68	164

Fonte: Adaptado de Aquino (2017).

4.2 Amostragem

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos através da medição da circunferência à altura do peito (CAP) de todos os indivíduos do plantio com fita métrica (Figura 3a), organizados em 12 espaçamentos (arcos) totalizando 398 medições. A partir do CAP o diâmetro acima do peito (DAP) foi calculado e em seguida as árvores, de cada arco, foram agrupadas em cinco classes de diâmetro.

Para cada classe diamétrica uma árvore representativa foi escolhida e identificada com a utilização de spray (Figura 3b), para posteriormente ser cubada, totalizando 59 árvores. Após o abate realizou-se a medição da altura total com auxílio com uma trena de 100 metros (Figura 3c), sendo a medida obtida da base até o topo da árvore.

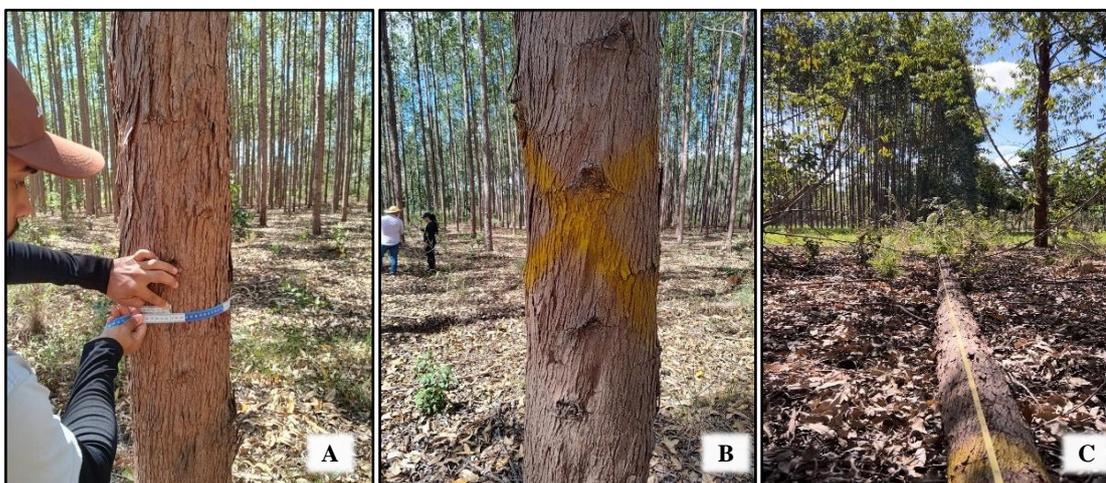


Figura 3. Coleta de dados. **a)** medição do CAP com auxílio de fita métrica; **b)** marcação de árvore com spray; e **c)** medição da altura de árvore cubada com o auxílio de fita métrica.

4.3 Cubagem

A cubagem rigorosa foi realizada pelo método de Smalian, com secções em toretes de 1,10 metros de comprimento. O volume de cada torete foi determinado em função da área basal das extremidades e do comprimento da tora. Cada árvore cubada teve seu volume determinado pela Equação 1.

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i + V_c \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$$V_i = \text{Volume das secções intermediárias} \Rightarrow V_i = \frac{(g_i + g_{i+1})}{2} * l_i$$

$$V_c = \text{Volume do cone} \Rightarrow V_c = \frac{1}{3} g_n * l_n$$

Posteriormente a madeira foi pesada com o auxílio de uma balança e empilhada. Foram geradas 12 pilhas de madeira, uma pilha para cada arco, realizada de forma manual e com ajuda de uma retroscavadeira. A partir de cada pilha foram obtidos o volume estéreo (st), o fator de empilhamento e o fator de cubicação, Equação 2, 3 e 4 respectivamente.

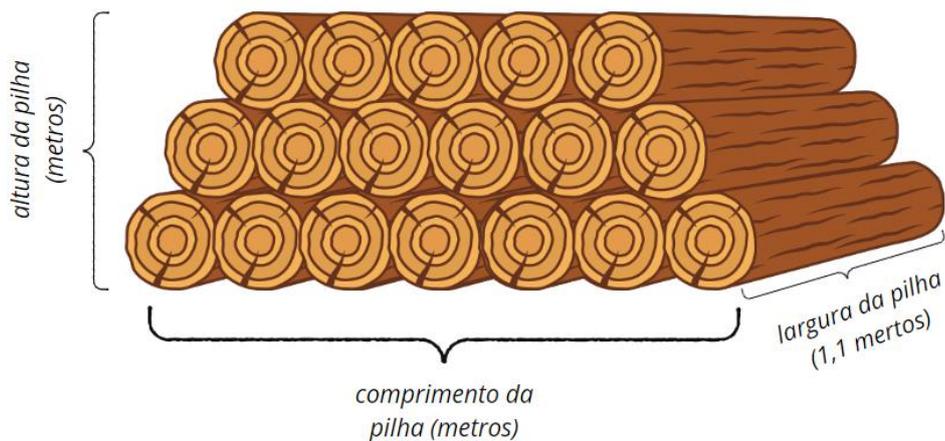


Figura 4. Amostragem para cubagem da pilha de madeira.
Fonte: Thais Gabrielle (2024).

$$V_{st} = 1,1 * C * H \quad (\text{Equação 2})$$

$$\text{Fator de empilhamento} = \frac{\text{Volume estéreo}}{\text{Volume sólido}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\text{Fator de cubicação} = \frac{\text{Volume sólido}}{\text{Volume estéreo}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

V_{st} é o volume estéreo (em metros cúbicos); C é o comprimento da pilha de madeira (em metros); H é a altura da pilha (em metros); e a largura da pilha igual ao comprimento das toras (1,1 metros).

O volume estéreo foi utilizado para quantificar o volume de madeira empilhada, incluindo o espaço entre as toras. O fator de empilhamento (F_e) realiza a conversão do volume sólido em volume estéreo e o fator de cubicação (F_c) é o inverso ao fator de empilhamento (OLIVEIRA et al., 1999).

4.4 Cavaqueamento

Após o empilhamento dos toretes por fileiras, as pilhas ficaram no local secando durante 90 dias, 15 de maio a 12 de agosto, para serem cavaqueadas após a secagem, conforme apresentado na Figura 5.

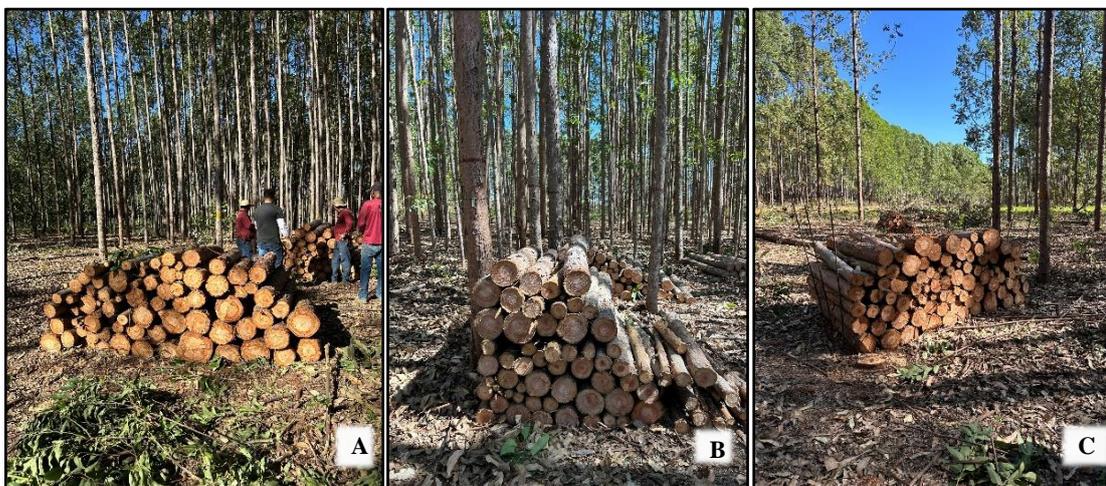


Figura 5. Empilhamento da madeira por fileira (espaçamento).

Os toretes foram novamente medidos com suta, pelo método de Smalian (Figura 6a) e pesados com o auxílio da balança (Figura 6b), dessa forma o metro cúbico de cada fileira foi calculado e separado para a transformação em cavaco.



Figura 6. a) medição da circunferência dos toretes com auxílio de uma suta; b) pesagem dos toretes com o auxílio de uma balança; c) diminuição no tamanho dos toretes com auxílio de cunhas, marretas e motosserra.

Para medir 1m^3 de madeira cavaqueada fez-se o uso de uma caixa d'água de mil litros (1m^3) (Figura 7a). Tirou-se todas as medidas da caixa e dessa forma foi possível calcular a quantidade de cavaco gerado em cada fileira. Ainda em campo, retirou-se uma amostra em forma de disco de uma árvores de cada fileira para realizar o cálculo de teor de umidade do cavaco em campo.



Figura 7. Cavaqueamento da madeira. a) utilização da caixa para medir 1m^3 de cavaco; b) trator com o picador acoplado; c) pilha de cavaco.

4.5 Secagem de discos

Em laboratório as amostras foram pesadas, com o auxílio de uma balança eletrônica (Figura 8a) e posteriormente foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 97°C até a obtenção de massa constante (Figura 8b). Com base nos dados de massa seca foi possível determinar o teor de umidade que o cavaco se encontrava em campo, conforme Equação 5.

$$TU = 100 - \left(\frac{Mf}{Mi * 100} \right) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

TU é o teor de umidade; Mf é massa obtida no último dia de pesagem dos discos (massa constante); e Mi é a massa obtida no primeiro dia de pesagem dos discos.

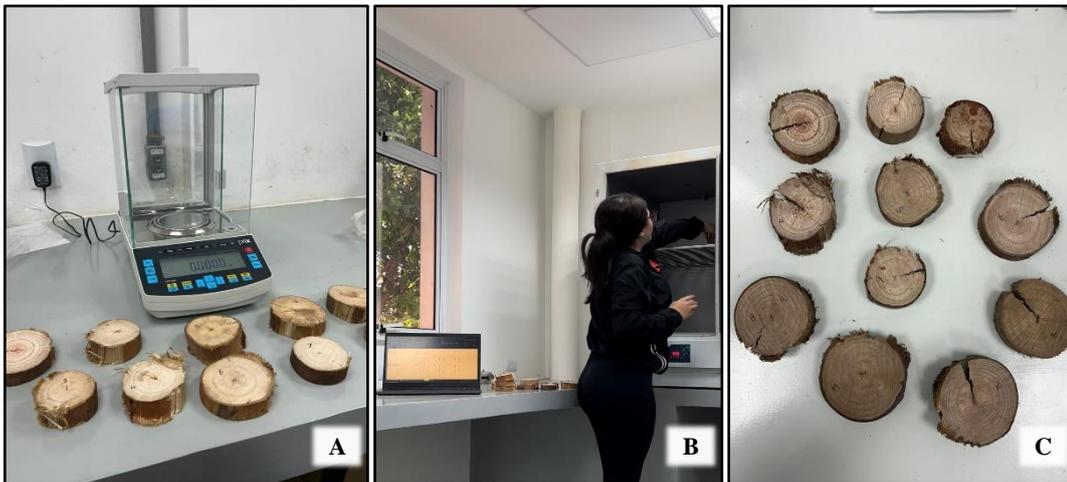


Figura 8. a) pesagem dos discos com auxílio da balança; b) estufa para secagem dos discos; c) discos secos após atingirem valor de peso constante.

4.6 Estudo da forma do fuste

Foi utilizado o modelo de afilamento polinomial proposto por Shöepfer (1966) (Equação 6) para obter as estimativas do diâmetro ao longo do fuste das árvores nos diferentes espaçamentos. O modelo foi ajustado no Microsoft Excel, e as medidas de precisão analisadas foram diâmetro e altura.

$$\frac{di}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

di = diâmetro com casca (cm) na altura h_i (m); DAP = Diâmetro a 1,30 m do solo (cm); h = altura total (m); h_i = altura (m) no diâmetro di ; β_i = parâmetros a serem estimados.

Optou-se pelo ajuste do polinômio do quinto grau, por ser um modelo muito utilizado nas ciências florestais (KOHLENER et al., 2013; VENDRUSCOLO et al. 2016; SOUZA et al., 2016; COSTA et al., 2016). Este modelo é amplamente empregado em inventários florestais, especialmente quando o objetivo é quantificar múltiplos produtos e avaliar a forma do tronco em diferentes idades e espaçamentos (CERQUEIRA et al., 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão identificadas as fileiras, o espaçamento, a área vital em metros quadrados, a quantidade de árvores por hectare, árvores remanescentes, a taxa de sobrevivência dos indivíduos por fileira, DAP e altura média e os valores obtidos para fator de forma, fator de empilhamento, fator de cubicação e fator de cavaqueamento para cada espaçamento.

Os valores dos fatores de forma, observados nos 12 espaçamentos, variaram entre 0,39 e 0,47. Há uma tendência de aumento nos fatores de forma à medida que a área vital disponível também aumenta. O fator de forma é um método amplamente utilizado para obtenção de estimativas rápidas de volume. Contudo sua utilização exige cautela, especialmente quando não é adaptado para características específicas, como espécies, idade, espaçamento e condições do sítio florestal (MIRANDA et al., 2015).

Para os fatores de empilhamento é possível identificar uma leve variação entre os espaçamentos, variando entre 1,32 e 1,46. Os fatores de empilhamento não apresentaram uma tendência clara, mas é possível observar menores fatores nos maiores espaçamentos, ocasionados consequentemente com o aumento dos valores diamétricos (PAULA NETO, F. et al., 1993). Dessa forma, quanto maior o espaçamento, maior será o volume de madeira em estéreo necessário para formar um metro cúbico de madeira sólida, devido ao aumento na quantidade de espaços vazios na pilha (PAULA NETO, F. et al., 1993).

Já o fator de cubicação apresentou valores entre 0,68 e 0,76, apresentando uma relação inversa ao fator anteriormente analisado. Observa-se uma tendência de incremento no valor do fator de cubicação com o aumento do espaçamento. Esse comportamento está de acordo com os padrões descritos por Finger (1992), que relatam um aumento no fator de cubicação à medida que a classe de diâmetro se eleva (BARROS, 2006). Este fator, assim como o fator de empilhamento, é utilizado como coeficiente de conversão entre o volume de madeira empilhada e o volume sólido, e vice-versa. Além disso, o fator de cubicação (F_c) pode ser interpretado como um fator de forma da pilha, já que ajusta o volume aparente para volume sólido (FINGER, 1992; BARROS 2006).

Tabela 2 . Apresentação dos valores calculados para os fatores de forma, empilhamento, cubicação e cavaqueamento para os 12 espaçamentos da área de estudo.

Fileira	Espaçamento	Área vital m ²	Árvores ha ⁻¹	Árvores Rem.	Taxa de Sobrev.	DAP méd.	Altura méd.	Fator de forma	Fator emp.	Fator de cub.	Fator de cav.
1	0,80 x 0,49	0,50	20.000	9.189	45,95	10,95	19,17	0,42	1,46	0,68	3,54
2	0,96 x 0,80	0,77	12.987	9.828	75,68	12,11	19,54	0,43	1,39	0,72	3,53
3	1,17 x 1,00	1,17	8.547	6.237	72,97	12,57	20,41	0,40	1,39	0,72	3,06
4	1,41 x 1,25	1,76	5.681	5.374	94,59	12,55	20,02	0,39	1,45	0,69	3,17
5	1,71 x 1,54	2,64	3.787	3.685	97,30	14,16	22,19	0,43	1,42	0,71	2,82
6	2,07 x 1,91	3,94	2.538	2.400	94,59	15,19	22,14	0,43	1,37	0,73	2,80
7	2,50 x 2,34	5,86	1.706	1.568	91,89	16,61	23,43	0,45	1,44	0,69	2,79
8	3,03 x 2,87	8,96	1.150	1.119	97,30	17,35	23,18	0,47	1,36	0,74	2,71
9	3,66 x 3,51	12,86	777	756	97,30	19,58	23,96	0,45	1,32	0,76	2,62
10	4,43 x 4,28	19,00	526	483	91,89	21,75	23,88	0,46	1,40	0,71	2,34
11	5,37 x 5,22	28,03	357	337	94,59	23,94	23,88	0,44	1,39	0,72	2,41
12	6,49 x 6,35	41,25	242	222	91,89	26,87	24,11	0,45	1,36	0,74	2,18

Em que: Árvores ha^{-1} = Árvores por hectare; Árvores Rem. = Árvores Remanescentes; Taxa de Sobrev. = Porcentagem da Taxa de Sobrevivência por parcela; DAP méd. = DAP médio por parcela; Altura méd. = Altura média por parcela, Ff = Fator de forma; Fe = Fator de empilhamento; Fc = Fator de cubicação; e Fcav = Fator de cavaqueamento.

A partir do cálculo das dimensões da caixa d'água utilizada para quantificar o volume de cavaco, foi possível desenvolver o fator de cavaqueamento, que variou entre 2,18 e 3,54. Observou-se uma redução no valor desse fator à medida que o espaçamento aumentava, o que pode ser explicado pelo crescimento do diâmetro e a maior formação de cerne. Esse fator é fundamental para o correto dimensionamento de galpões destinados ao armazenamento de cavaco, pois otimiza o uso do espaço.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, observa-se que os tratamentos mais adensados resultaram na menor produção volumétrica média por indivíduo. Entretanto, esses espaçamentos apresentam maior produção volumétrica por hectare, em volume cúbico, estéreo e cavaqueado, em função da maior quantidade de árvores por unidade de área.

Com o aumento do espaçamento é possível observar o aumento no volume por indivíduo, devido à maior área útil disponível por planta. Esse fator contribui diretamente na qualidade e na quantidade da produção individual (REINER et al., 2011; LIMA et al., 2013; SEREGHETTI et al. 2015; CORRÊA et al., 2020), uma vez que o espaçamento maior promove o crescimento e o desenvolvimento amplo de cada árvore.

Nos espaçamentos mais adensados, como nas Fileiras 1, 2, 3, 4 e 5 observa-se uma maior produção de volume (m^3) por hectare em razão do maior número de árvores por unidade de área. Esse resultado, do aumento do volume por hectare com a diminuição do espaçamento, com destaque para o tratamento 1 ($0,50 m^2$) está de acordo com outros autores (OLIVEIRA et al. 2009, FERREIRA et al. 2014, SEREGHETTI et al. 2015; CORRÊA et al., 2020). O volume estéreo foi utilizado para quantificar o volume de madeira empilhada, incluindo o espaço entre as toras. Um estére corresponde a 1 metro cúbico de madeira empilhada (PAULA NETO, F. et al., 1993).

Analisando os valores da produção do peso do cavaco em kilogrma por metro cúbico, revela que a Fileira 12 é a mais produtiva em relação as demais. De acordo com o aumento da área vital, maior é o espaço disponível para as árvores se desenvolverem e, conseqüentemente gerando uma quantidade maior de biomassa por indivíduo. Esse espaçamento favorece o crescimento de árvores maiores devido a maior disponibilidade de recursos (PRETZSCH, 2009; BINKLEY, 2012).

Tabela 3. Parâmetros produtivos: IMA, Volumes e Peso nos 12 espaçamentos da área de estudo.

Fileira	Área vital m ²	Árvores. ha ⁻¹	Vol m ³ .árv ⁻¹	Vol m ³ . ha ⁻¹	IMA	Vol st. ha ⁻¹	Vol m ³ ha ⁻¹ cavaco	Peso cavaco (Kg. m ⁻³)
1	0,50	9.729,73	0,0641	624,15	62,41	911,489	2.211,83	680,46
2	0,77	9.828,01	0,0783	769,47	76,94	1.070,445	2.713,70	682,84
3	1,17	6.237,01	0,0924	576,54	57,65	802,702	1.762,48	707,55
4	1,76	5.374,69	0,1035	556,26	55,62	805,714	1.761,49	712,85
5	2,64	3.685,50	0,1448	533,72	53,37	756,757	1.505,09	686,38
6	3,94	2.400,88	0,1685	404,75	40,47	554,602	1.133,31	793,42
7	5,86	1.568,12	0,2307	361,89	36,18	521,020	1.008,83	776,50
8	8,96	1.119,65	0,2603	291,47	29,14	395,446	790,78	752,65
9	12,86	756,58	0,3279	248,12	24,81	327,074	651,05	873,53
10	19,00	483,65	0,4161	201,25	20,12	282,186	471,82	838,55
11	28,03	337,72	0,4770	161,09	16,10	224,547	388,11	875,37
12	41,25	222,76	0,6243	139,08	13,90	188,844	302,75	895,94

Em que: Árvores ha⁻¹ = Árvores por hectare; Vol m³.árv⁻¹ = Volume em m³ por árvore (indivíduo); Vol m³.ha⁻¹ = Volume em m³ por hectare; IMA = Incremento Médio Anual; Vol st.ha⁻¹ = Volume estéreo por hectare; Vol m³ cavaco = Volume em m³ de cavaco; Peso (kg. m⁻³) = Peso em kg por m³.

O teor de umidade da madeira está diretamente relacionado com o tempo de exposição ao ambiente. A Tabela 4 evidencia que o teor de umidade do cavaco variou entre os diferentes espaçamentos, mantendo-se consistente abaixo de 40% de umidade.

A umidade do cavaco variou de forma considerável, sem apresentar um padrão ou tendência clara, pois as pilhas de madeira em campo sofreram influência de fatores como a incidência de luz solar e o empilhamento em áreas mais ou menos sombreadas, o que pode impactar no teor de umidade do cavaco e por consequência na eficiência de sua queima. Todavia o teor de umidade do cavaco em campo permaneceu entre 34% e 40% de umidade, faixa essa usual no mercado de cavaco.

Tabela 4. Teor de umidade da madeira cavaqueada em campo.

Fileira	16/ago	17/ago	18/ago	Úmd %	Peso %	Peso Úmd	Umd cav %
1	60,37	53,11	52,93	12,32	87,68	99,34	39,23
2	51,97	45,34	45,23	12,97	87,03	84,59	38,57
3	39,95	33,51	33,38	16,45	83,55	61,27	34,80
4	47,46	41,37	41,21	13,17	86,83	76,99	38,36
5	63,07	52,50	52,29	17,09	82,91	95,64	34,06
6	57,59	49,31	49,14	14,56	85,43	91,13	36,76
7	53,48	46,3	46,11	19,39	80,61	86,00	37,72
8	75,00	64,39	64,16	14,45	85,55	119,05	37,00
9	70,82	61,30	61,14	13,67	86,33	113,92	37,84
10	40,14	35,14	35,04	12,71	87,29	65,63	38,84
11	56,51	49,20	49,10	9,66	86,80	92,02	38,32
12	74,78	61,32	61,08	18,32	81,68	118,01	36,63

Em que: Pesagem da madeira ao longo de três dias (16, 17, e 18 de agosto de 2024); Umd % = Umidade em porcentagem que os discos perderam ao longo dos três dias; Peso% = Porcentagem do peso seco nos discos; Peso Úmd = Peso úmido em gramas; Umd cav % = Porcentagem da umidade do cavaco.

Esses resultados são cruciais para entender como o espaçamento e a densidade afetam o teor de umidade e o peso da madeira, pois são aspectos fundamentais na gestão florestal e no processamento da madeira.

Após o ajuste do modelo de quinto grau, foi possível obter os coeficientes ajustados assim como as estatísticas de ajuste e precisão conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão.

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R ² ajust.	Syx (cm)	Syx%
1,155	-2,757	9,102	-17,683	15,061	-4,703	0,90	1,26	10,52

Onde: β'_s , = coeficientes ajustados; R² ajust. = R – quadrado ajustado; Syx (cm) = Erro padrão residual em centímetros; e Syx% = Erro padrão em porcentagem.

Com o presente modelo de afilamento foi possível estudar a forma do fuste, aplicando o modelo de afilamento do quinto grau proposto por Schöepfer (1966). A Figura 7 ilustra o afilamento estimado pela equação nos diferentes espaçamentos.

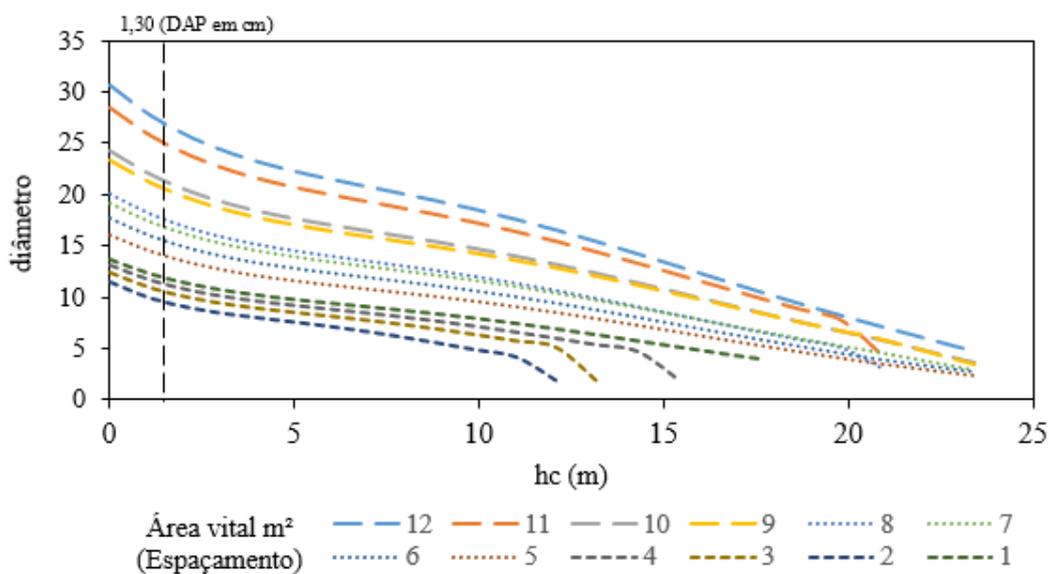


Figura 9. Perfil do fuste das árvores em diferentes espaçamentos até o diâmetro mínimo de ± 4 cm. Onde: 12 = 41,25 m² de área vital; 11 = 28,03 m² de área vital; 10 = 19 m² de área vital; 9 = 12,86 m² de área vital; 8 = 8,96 m² de área vital; 7 = 5,86 m² de área vital; 6 = 3,94 m² de área vital; 5 = 2,64 m² de área vital; 4 = 1,76 m² de área vital; 3 = 1,17 m² de área vital; 2 = 0,77 m² de área vital; e 1 = 0,50 m² de área vital; DAP = diâmetro à altura do peito a 1,30 metros; hc = altura comercial com diâmetro ± 3 centímetros.

Fonte: Thais Gabrielle (2024).

Este gráfico ilustra a variação do diâmetro ao longo da altura das árvores, com diferentes linhas representando as fileiras numeradas de 1 a 12. Observa-se que o diâmetro diminui progressivamente conforme aumenta a altura da árvore, característica capturada pelas curvas.

Cada fileira apresenta um perfil distinto, indicando variações no afilamento das árvores, relacionada aos diferentes tratamentos aplicados.

O afilamento do fuste é caracterizado pela redução do diâmetro (d) em relação ao diâmetro à altura do peito (DAP). A forma do tronco das árvores pode variar de acordo com fatores como o material genético, a idade, o espaçamento, o arranjo espacial, o regime de corte, o desbaste e a capacidade produtividade do local (HUSCH et al., 2003; CAMPOS e LEITE, 2013; CERQUEIRA et al., 2017). Com base nesse resultado é possível observar que a forma do fuste, a espessura do diâmetro e a altura das árvores altera-se de forma significativa entre os diferentes espaçamentos.

6 CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa evidenciam que o espaçamento entre as árvores tem um impacto significativo na produtividade e qualidade da madeira destinada à produção de cavacos e biomassa.

Espaçamentos menores resultaram em maior produção volumétrica por hectare, apesar do menor crescimento individual das árvores, enquanto espaçamentos maiores favoreceram o desenvolvimento de árvores com maior biomassa individual e melhor distribuição de diâmetro ao longo do tronco.

O teor de umidade da madeira permaneceu dentro dos limites adequados para o mercado de cavacos, destacando a necessidade de um manejo adequado das pilhas de madeira em campo.

Dessa forma, os resultados obtidos alcançam os objetivos propostos, fornecendo uma base para a otimização do uso de espaçamentos em plantios de eucalipto voltados para a produção de cavacos e biomassa, com implicações práticas para a silvicultura e o manejo florestal.

Conclui-se que a escolha do espaçamento ideal deve equilibrar a produtividade por hectare com o crescimento individual das árvores, visando otimizar o rendimento volumétrico e a qualidade da madeira cavaqueada.

7 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V. C. L. de. **Modelos Volumétricos de Dupla Entrada para Aplicar em Povoamentos Florestais Brasileiros**. Floresta e Ambiente, v. 24, n. 0, 2017.
- AQUINO, PRISCILA SALES RODRIGUES. **Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo “Leque”**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Panorama do Setor. 2012.
- ASSUNÇÃO, S. L.; FELFILI, J. M. **Fitossociologia de um fragmento de cerrado sensu stricto na APA do Paranoá, DF, Brasil**. Acta Botânica Brasilica, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 903-909, Dez., 2004.
- BARROS, M. V. **Fator de cubicação para madeira empilhada de *Eucalyptus grandis* W. Hil ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- BATISTA, F. R. **Decomposição de Serapilheira em área de cerrado sentido restrito e plantio de eucalipto no Distrito Federal**. 2017. Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília.
- BENIN, C. C.; WIONZEK, F. B.; WATZLAWICK, L. F. **Initial assessments on the plantation of *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage deployed in different spacing**. Applied Research & Agrotechnology, v. 7, n. 1, p. 55-61, 2014.
- BERGER, R., SCHNEIDER, P. R., FINGER, C. A. G., & HASELEIN, C. R. **Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith**. Ciência Florestal, v. 12, n. 2, p. 75-87, 2002.
- BERTI, A. L. **Determinação do fator de empilhamento em materiais de *Eucalyptus* spp. com diferentes sortimentos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal, Paraná.

- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE J. L. **The effect of spacing on volume, biomass, and carbon stock of plantation forests.** Forest Ecology and Management, 2012.
- BOSCARDIN, P. M. D. **Morfoanatomia, fitoquímica e atividades biológicas de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage – Myrtaceae.** 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BRITO, J. O. **O uso energético da madeira.** Estudos Avançados, Piracicaba, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.
- BRITO, J. O. **Usos energéticos do *Eucalyptus grandis*.** In: JORNADAS FORESTALES DE ENTRE RIOS, Concordia. Proceedings. Serviço Florestal: 14 p., 1994.
- CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa.** 2003. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** 4. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013.
- CARDOSO, J. C. **Intensidade amostral ótima para a cubagem rigorosa de árvores de eucalipto.** Monografia, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016.
- CERQUEIRA, C. L.; MÔRA, R.; TONINI, H. **Forma do fuste de eucalipto em diferentes arranjos de plantio e espaçamentos.** Advances in Forestry Science, Cuiabá, v. 4, n. 3, p. 137-141, 2017.
- CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CORRÊA, R. S.; SOARES, T. S.; ALVES, M. A.; SOUSA, J. P.; VIEIRA, E. M. **Espaçamentos de plantio promovem produção distinta em híbrido de eucalipto.** Advances in Forestry Science, Cuiabá, v. 7, n. 3, p. 1073-1079, 2020.

- CORTEZ, L. A. B.; LOREA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 736 p., 2009.
- COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. **Fator de empilhamento para plantações de *Eucalyptus* no estado de São Paulo**. IPEF, n. 38, p. 23-27, abr., 1988.
- DA SILVA, J. A. A.; NETO, F. P. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, 1979. 198 p.
- FERNANDES, J. S.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V.; BARRETO-GARCIA, P. A. B. **Field performance of *Eucalyptus hybrids* at Planalto da Conquista, Bahia, Brazil**. Floresta e Ambiente, v. 25, n. 2, 2018.
- FERREIRA, D. H. A. A.; LELES, P. S. S.; MACHADO, E. C.; ABREU, A. H. M.; ABILIO, F. M. **Crescimento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos**. Floresta, v. 44, n. 3, p. 431-440, 2014.
- FIEDLER, N. C.; RODRIGUES, T. O.; MEDEIROS, M. B. **Avaliação das condições de trabalho de brigadistas de combate a incêndios florestais**. Revista Floresta, p. 89-94, 2004.
- FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1992. 269 p.
- FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. ***Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. Piracicaba: IPEF, 2016.
- FLORIANO, E. P.; PAULA NETO, F. de. **Dendrometria**. 2. ed. Rio Largo: Autor, 2021. 170 p.
- FORRESTER, D. I.; MEDHURT, J. L.; WOOD, M.; BEADLE, C. L.; VALENCIA, J., C. **Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: an Australian perspective**. Forest Ecology and Management, v. 259, p. 1819-1835, 2010.
- GATTO, A.; BUSSINGUER A. P.; RIBEIRO F. C.; AZEVEDO, G. B.; BUENO M. C.; MONTEIRO, M. M. & SOUZA, P. F. **Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-**

planta em um plantio de *Eucalyptus* sp., no Distrito Federal. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p. 879-887, 2014.

GERRAND, A. M.; NEILSEN, W. A. **Comparing square and rectangular spacings in *Eucalyptus nitens* using a Scotch plaid design.** Forest Ecology and Management, v. 129, p. 1-6, 2000.

IBAMA. **Instrução Normativa nº 10, de 8 de maio de 2015.** Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN001008052015.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **IBÁ** (Brazilian Tree Industry). Relatório IBÁ 2023. 80 f. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FILHO, A. F.; AREE, J. E.; MACHADO, S. A. **Evolution of tree stem taper in *Pinus taeda* stands.** Ciência Rural, v. 46, n. 7, p. 1185-1191, 2016.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. **Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas.** Revista Árvore, v. 27, n. 3, p. 301-310, 2003.

LELES, P. S. S.; ABAURRE, G. W.; ALONSO, J. M.; NASCIMENTO, D. F.; LISBOA, A. C. **Crescimento de espécies arbóreas sob diferentes espaçamentos em plantio de recomposição florestal.** Scientia Forestalis, v. 39, n. 90, p. 231-239, 2011.

LIMA, R. et al. **Efeito do espaçamento no desenvolvimento volumétrico de *Pinus taeda* L.** Floresta e Ambiente, 2013.

LIMA, G. C. P. et al. **Acuracidade de métodos de cubagem para estimativa do volume de *Pinus taeda* L.** BIOFIX Scientific Journal, v. 1, n. 1, p. 74-82, 2016.

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, L. J. **Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 33, n. 76, p. 429-438, 2013.

- MACHADO, S. do A. et al. **Comparação de métodos de cubagem absolutos com o volume obtido pelo xilômetro para bracinga (*Mimosa scabrella* Bentham)**. *Cerne*, v. 12, n. 3, p. 239-253, 2006.
- MENDES, T. R. S. **Uso de imagem aérea em estimativa de volume e biomassa em povoamento de *Eucalyptus* sp.** 2018. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília.
- MIRANDA, D. L. C.; JÚNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. **Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis***. *Scientia Plena*, v. 11, n. 3, 2015.
- MIURA, N.; JONES, S. D. **Characterizing forest ecological structure using pulse types and heights of airborne laser scanning**. *Remote Sensing Environment*, v. 114, p. 1069-1076, 2010.
- MOREIRA, J. M. M. A. P.; OLIVEIRA, E. B. de. **Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais**. In: OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 11-20.
- MOTA, F. C. M. **Biomassa, fluxos de carbono e energia em área de cerrado sentido restrito e plantio de eucalipto no Distrito Federal**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília.
- NEILSEN, W. A.; GERRAND, A. M. **Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection**. *Forest Ecology and Management*, v. 123, p. 217-229, 1999.
- NELDER, J. A. **New kinds of systematic designs for spacing experiments**. *Biometrics*, v. 18, p. 283-307, 1962.
- NICOLETTI, M. F., LIMA, B. A., BRANCO, M. E. R., & STEPKA, T. F. **Quantificação do fator de forma por meio de diferentes métodos de cubagem em *Pinus taeda* L.** *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 131, e3504, 2021.

- OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M. **Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrossilvipastoril.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 1, p. 1-9, 2009.
- OLIVEIRA A. L.; BORGES L. A. C; COELHO JUNIOR M. G.; BARROS D. A.; COELHO JUNIOR L. M. **Forest replacement in Brazil: a fundamental policy for forestry.** Floresta e Ambiente, v. 27, n. 4, 2020.
- OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, M. T. **Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1 – Avaliações dendrométricas das árvores.** Scientia Forestalis, n. 56, p. 113-124, dez. 1999.
- PALUDZYSZYN FILHO, E. **Indicadores de espécies para plantio e clones: considerações iniciais.** In: SANTOS, P. E. T. dos (Ed.). Cultivo do eucalipto. 4. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. (Embrapa Florestas. Sistema de Produção, 4).
- PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. **Programa de melhoramento genético do eucalipto da Embrapa Florestas: resultados e perspectivas.** Colombo: Embrapa Florestas, 2012.
- PAULA NETO, F. de; REZENDE, A. V.; CAMPOS, J. C. dos C.; REZENDE, J. L. P. **Análise do comportamento dos fatores de empilhamento para *Eucalyptus grandis*.** Viçosa-MG: Departamento de Engenharia Florestal da UFV, Revista Árvore, v. 17, jan./abr., 1993.
- PAULA NETO, F.; REZENDE, A. V.; CAMPOS, J. C. C.; REZENDE, J. L. P. **Análise do comportamento dos fatores de empilhamento para *Eucalyptus grandis*.** Revista Árvore, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 45-59, 1993.
- PEREIRA, M. P. C. F. **Decomposição térmica e biológica de cavacos de *Eucalyptus urophylla*.** 2017. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa.

PINKARD, E. A.; NEILSEN, W. A. **Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning.** Forest Ecology and Management, v. 172, p. 215–227, 2003.

PINTO JÚNIOR, J. E. P.; SANTAROSA, E.; GOULART, I. C. G. R. **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda.** In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. (Ed.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. 138 p.

PRETZSCH, H. **The impact of stand density and tree size on forest productivity.** Forest Dynamics, Growth and Yield, 2009.

REINER, D. A.; SILVEIRA, E. R.; SZABO, M. S. **O uso do eucalipto em diferentes espaçamentos como alternativa de renda e suprimento da pequena propriedade na região sudoeste do Paraná.** Synergismus Scientifica, 2011.

REZENDE, A. V.; PAULA NETO, F. de. **Estudo do comportamento dos fatores de empilhamento para *Eucalyptus grandis* em função do tempo de secagem dos toros nas pilhas.** Viçosa-MG: Departamento de Engenharia Florestal da UFV, Revista Árvore, v. 15, 1991.

ROCHA, T.; CABACINHA, C.; ALMEIDA, R.; PAULA, A.; & SANTOS, R. **Avaliação de métodos de estimativa de volume para um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no Planalto da Conquista – BA.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 6, n. 10, 2010.

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: Composer, 178 p.; il., 2021.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A.; WATZLAWICK, L. F. **Inventários florestais: planejamento e execução.** Curitiba: Multi-Graphic, 2014. 406 p.

- SANQUETTA, C. R.; DO CARMO DOLCI, M.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, M. N. I.; PELISSARI, A. L. **Form factors vs. regression models in volume estimation of *Pinus taeda* L. stem.** Científica (Jaboticabal), v. 45, n. 2, p. 175-181, 2017.
- SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda.** Embrapa Florestas. Brasília, v. 1, 138 p., 2014.
- SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe.** Bad.: Wurt-Forstl., 1966. n.p.
- SEREGHETTI, G. C.; LANÇAS, K. P.; SARTORI, M. S.; REZENDE, M. A.; SOLER, R. R. **Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto.** Energia na Agricultura, v. 30, n. 3, p. 257-262, 2015.
- SILVA, J. C. **Cresce presença do eucalipto no Brasil.** Revista da Madeira, Ano 15, n° 92, Curitiba, 2005. p. 66.
- SILVA, C. M. S.; SILVA, M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; DONATO, D. B.; MAGALHÃES, M. A. **Cavacos e partículas de madeira - concentração mundial de mercado e contribuição para a balança comercial brasileira.** Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), v. 8, n. 2, p. 74-81, 2017.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal.** 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal.** Viçosa, MG: Editora UFV, 2006.
- SORDI, A.; SOUZA, S. N. M. de; OLIVEIRA, F. H. de. **Biomassa gerada a partir da produção avícola na região do Estado do Paraná: uma fonte de energia.** Acta Scientiarum Technology, Maringá, v. 27, n. 2, p. 183-190, July/Dec., 2005.

SOUZA, H. S.; DRESCHER, R.; VENDRUSCOLO, D. G. S.; MOURA, J. P. V. M.; SIQUEIRA, T. A. S.; MAMORÉ, F. M. D. **Comparação de métodos de cubagem para eucalipto**. Revista Brasileira de Biometria, Lavras, v. 35, n. 1, p. 17-26, 2017.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M. T. **Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura: o programa TECHS**. Encontro Brasileiro de Silvicultura, v. 3, n. 2014, p. 8198, 2014.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; SILVA, G.; ANDRADE, H.; ALVES, J. M. **The Brazil eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production**. Forest Ecology and Management, v. 259, p. 1684-1694, 2010.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. **Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010.

TONINI, H. **Crescimento e produção de clones de *Eucalyptus saligna* Smith, na depressão central e serra do sudoeste, Rio Grande do Sul**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

UCELLA-FILHO, J. G. M. et al. **Cavacos de madeira: características, aplicações e avanços de pesquisa no Brasil**. Open Science Research VII. ISBN 978-65-5360-239-7. Volume 7. Editora Científica Digital, 2022.

WESLER, S.; SILVA, B. S.; VIRMOND, E. **Sistema de combustão alimentado com cavaco de eucalipto**. 6º Simpósio de Integração Científica do Sul Catarinense – SICT Sul, ISSN 2526-4044, p. 787, 2017.

