

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

ISAÍAS TOLENTINO ARAÚJO DE SOUZA

**MODELO PARA PREDIZER A ALTURA DE CLONES DE *Eucalyptus urograndis* EM
TABULEIROS COSTEIROS, NO ESTADO DE ALAGOAS**

RIO LARGO - AL

2025

ISAÍAS TOLENTINO ARAÚJO DE SOUZA

**MODELO PARA PREDIZER A ALTURA DE CLONES DE *Eucalyptus urograndis* EM
TABULEIROS COSTEIROS, NO ESTADO DE ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC,
apresentado a Universidade Federal de Alagoas
– UFAL, *Campus* de Engenharias e Ciências
Agrárias – CECA, como requisito para
obtenção do Título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pagel Floriano

RIO LARGO – AL

2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S729m Souza, Isaías Tolentino Araújo de.

Modelo para prever a altura de clones de *Eucalyptus urograndis* em tabuleiros costeiros, no estado de Alagoas. / Isaías Tolentino Araújo de Souza. – 2025.

32 f.: il.

Orientador(a): Eduardo Pagel Floriano.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Graduação em Engenharia Florestal, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Relação hipsométrica. 2. Inventário florestal. 3. Modelagem. I. Título.

CDU: 630*2

Folha de Aprovação

Isaías Tolentino Araújo de Souza

Modelo para prever a altura de clones de *Eucalyptus urograndis* em tabuleiros costeiros, no estado de Alagoas.

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, apresentado a Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel (a) Engenheiro(a) Florestal.

Data de Aprovação: 24/10/2025

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO PAGEL FLORIANO**
Data: 27/10/2025 08:53:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Pagel Floriano
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **HUGO HENRIQUE COSTA DO NASCIMENTO**
Data: 27/10/2025 17:07:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Hugo Henrique Costa do Nascimento
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA

Documento assinado digitalmente
 **MARILIA FREITAS DE VASCONCELOS MELO**
Data: 27/10/2025 11:49:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Marília Freitas de Vasconcelos Melo
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a D'us, por me guiar até aqui e me conceder forças para superar os desafios ao longo da minha formação.

Aos meus pais, Zenaide Tolentino e Osvaldo Manoel, sou imensamente grato pelo apoio incondicional. Desde o início, investiram em mim e me incentivaram, seja por meio de conselhos, do suporte financeiro ou do exemplo de força e resiliência. Obrigada por enfrentarem comigo cada desafio e suportarem todos os momentos de estresse ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, Eduardo Pagel Floriano, meu sincero reconhecimento por aceitar me guiar desde o primeiro momento, compartilhando seu conhecimento e contribuindo significativamente para minha formação acadêmica e futuras pesquisas.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), por proporcionar um ensino de qualidade e gratuito, além de um ambiente de aprendizado e crescimento, onde pude desenvolver minhas pesquisas, trocar conhecimentos com outros alunos por meio das monitorias e participar de projetos de extensão que foram fundamentais para meu crescimento profissional e social.

Aos professores Gersica Freitas, Alexsandro Claudio, Rinaldo Vieira, Tania Voronkof, Marília Grugiki, Marília Freitas, Andreia Vasconcelos, Vânia Aparecida, Hugo Henrique minha gratidão pela dedicação e incentivo. Através das oportunidades que me ofereceram, como monitorias, PIBIC e projetos de extensão, onde pude expandir meus conhecimentos e contribuir para a universidade, fortalecendo ainda mais minha trajetória acadêmica.

Aos amigos Edja Santos, Ana Karine, Lara Cristina e Gustavo Jorda companheiros de campo que compartilharam comigo os desafios da coleta de dados, enfrentando desde o sol escaldante até os dias chuvosos. Entre aprendizados, brincadeiras e piadas, tornamos essa jornada mais leve e inesquecível.

E, em especial, à minha amiga Shara Vieira, com quem compartilhei não apenas o estresse acadêmico, os trabalhos intermináveis e as noites mal dormidas, mas também apoio mútuo em cada desafio. Entre brincadeiras, risadas e momentos de descontração, encontramos forças para seguir em frente. Nossa amizade, construída em meio a dificuldades e conquistas, tornou-se um alicerce essencial nessa jornada e, sem dúvidas, seguirá firme muito além da faculdade, acompanhando-nos em cada nova etapa da vida.

A todos familiares, amigos e colegas, meu mais sincero obrigado!

“Se você não gosta do seu destino, não o aceite. Tenha a coragem de mudá-lo!”
(NARUTO UZUMAKI).

RESUMO

As plantações de *Eucalyptus* representam a base da produção florestal brasileira, destacando-se pela elevada produtividade e ampla adaptação a diferentes ambientes. Nos tabuleiros costeiros de Alagoas, a definição de modelos hipsométricos precisos é essencial para otimizar inventários florestais e subsidiar o manejo adequado das plantações. Nesse contexto, o estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar modelos para prever a altura de um plantio clonal de *Eucalyptus urograndis* sob três espaçamentos. O experimento foi realizado no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da UFAL, em delineamento de blocos casualizados, com três espaçamentos (3×2 m, 3×3 m e 3×4 m) e dois clones (VE41 e I144), totalizando 2.152 observações válidas entre 12 e 72 meses de idade. Os resultados demonstraram variação considerável no crescimento das árvores, com alturas médias de 13,97 m e diâmetros médios de 11,91 cm, refletindo a influência do ambiente e da competição por recursos. O espaçamento apresentou efeito significativo sobre a altura, indicando que maiores espaçamentos favoreceram o crescimento em altura, enquanto os fatores clone e interação clone × espaçamento não foram significativos. As correlações de Pearson evidenciaram forte associação entre altura, diâmetro e idade ($r = 0,898$ e $r = 0,945$, respectivamente), reforçando a importância dessas variáveis na modelagem hipsométrica. Foram ajustados diferentes modelos, com e sem intercepto, e avaliados por meio do coeficiente de determinação (R^2) e do coeficiente de variação (CV%). Entre as equações testadas, a expressão linear simples $h = 0,5213 \cdot d + 0,1901 \cdot t$ apresentou o melhor desempenho, com $R^2 = 0,9929$ e $CV = 9,19\%$, além de resíduos distribuídos aleatoriamente e ausência de heterocedasticidade, confirmando sua robustez e adequação para predição da altura. As demais equações, embora com bons ajustes, apresentaram excesso de variáveis e maior inflação de variância, tornando o modelo linear mais eficiente e de aplicação prática em inventários florestais. Conclui-se que o modelo proposto se destaca pela precisão, simplicidade e aplicabilidade operacional, podendo ser utilizado no planejamento e manejo de povoamentos de *Eucalyptus urograndis* sob condições edafoclimáticas semelhantes às dos tabuleiros costeiros de Alagoas. A utilização desse modelo permite reduzir custos de campo, otimizar estimativas de crescimento e aprimorar a tomada de decisão em atividades de monitoramento florestal.

Palavras-chave: relação hipsométrica, inventário florestal, modelagem.

ABSTRACT

Eucalyptus plantations constitute the foundation of Brazilian forest production, distinguished by their high productivity and broad adaptability to diverse environments. In the coastal tablelands of Alagoas, the development of accurate hypsometric models is essential to optimize forest inventories and to support appropriate plantation management. In this context, the present study aimed to develop and evaluate models to predict the height of a clonal *Eucalyptus urograndis* stand under three spacing regimes. The experiment was conducted at the Engineering and Agricultural Sciences *Campus* of UFAL, in a randomized block design, with three spacings (3×2 m, 3×3 m, and 3×4 m) and two clones (VE41 and I144), totaling 2,152 valid observations between 12 and 72 months of age. The results showed considerable variation in tree growth, with mean heights of 13.97 m and mean diameters of 11.91 cm, reflecting the influence of environmental conditions and resource competition. Spacing had a significant effect on height, indicating that wider spacings favored height growth, whereas the clone factor and the clone × spacing interaction were not significant. Pearson correlations revealed strong associations between height, diameter, and age ($r = 0.898$ and $r = 0.945$, respectively), reinforcing the importance of these variables in hypsometric modeling. Several models, with and without intercepts, were fitted and evaluated using the coefficient of determination (R^2) and the coefficient of variation (CV%). Among the tested equations, the simple linear expression $h = 0.5213 \cdot d + 0.1901 \cdot t$ showed the best performance, with $R^2 = 0.9929$ and $CV = 9.19\%$, in addition to randomly distributed residuals and no evidence of heteroscedasticity, confirming its robustness and suitability for height prediction. The other equations, although well-fitted, included excessive variables and showed greater variance inflation, making the linear model more efficient and practically applicable in forest inventories. It is concluded that the proposed model stands out for its accuracy, simplicity, and operational applicability, and can be used in the planning and management of *Eucalyptus urograndis* stands under edaphoclimatic conditions similar to those of the coastal tablelands of Alagoas. The use of this model can reduce field costs, optimize growth estimates, and improve decision-making in forest monitoring activities.

Keyword: hypsometric relationship, forest inventory, modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Unidade amostral da plantação de *Eucalyptus* da Universidade Federal de Alagoas – CECA.

Figura 2: Croqui para identificação dos espaçamentos e dos materiais genéticos do experimento com *Eucalyptus* da Universidade Federal de Alagoas – CECA.

Figura 3: Medição da altura total das árvores (A) e da circunferência a altura do peito (B)

Figura 4: Teste de Tukey ($\alpha=5\%$) para a altura em diferentes espaçamentos.

Figura 5: Gráfico de resíduos da equação selecionada ($h = 0,5213 \cdot d + 0,19015 \cdot t$).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatísticas das variáveis de um experimento com *Eucalyptus* em Rio Largo, AL.

Tabela 2 – Anova das alturas aos 72 meses de *Eucalyptus* em Rio Largo, AL.

Tabela 3 – Coeficientes de Correlação de Pearson (r) entre altura (h), diâmetro (d) e idade num experimento com *Eucalyptus*, até os 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

Tabela 4 – Coeficientes de Correlação de Spearman (r) entre a altura (h), espaçamentos e clones num experimento com *Eucalyptus*, até os 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

Tabela 5 – Seleção de variáveis incluindo o intercepto no modelo para modelagem da altura de *Eucalyptus urograndis* dos 12 aos 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

Tabela 6 – Seleção de variáveis sem intercepto no modelo para modelagem da altura de *Eucalyptus urograndis* dos 12 aos 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

Tabela 7 – Modelos desenvolvidos para altura de *Eucalyptus* em Rio Largo, AL.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- As** – Classificação climática de Köppen
- CAP** – Circunferência Altura do Peito
- CECA** – Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
- cm** – Centímetros
- CV** – Coeficiente de Variação
- d** – Diâmetro
- DAP** – Diâmetro Altura do Peito
- E.** – *Eucalyptus*
- FIV** – Fator de Inflação de Variância
- h** – Altura
- ha** – Hectare
- IBÁ** – Indústria Brasileira de Árvores
- ILPF** – Integração Lavoura Pecuária Floresta
- ln** – Logaritmo natural
- m** – Metro
- m²** – Metro quadrado
- mm** – Milímetro
- ns** – Não significativo
- SQres** – Soma de Quadrados do Resíduo
- SQtot** – Soma de Quadrados do Total
- Syx** – Erro Padrão de Estimativas
- t** – Idade
- UFAL** – Universidade Federal de Alagoas
- Ym** – Média dos valores da variável dependente Y

LISTA DE SIMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$ – Graus celsius

p – Probabilidade

$\text{PR} > \text{F}$ – Probabilidade do valor de F (teste estatístico)

r – Coeficiente de correlação

R^2 – Coeficiente de Determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
	História e gênero do eucalipto	16
	Relação hipsométrica	16
	Modelagem	17
4	MATERIAL E MÉTODOS	19
	Caracterização da área	19
	Amostragem e coleta de dados	20
	Análise de dados	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
6	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresentou 10,5 milhões de hectares de árvores plantadas em 2024, compondo uma cadeia produtiva que representou 1,0 % ou R\$ 239,9 bilhões do PIB do país, sendo 8,1 milhões de hectares de florestas de *Eucalyptus*, o que corresponde a 76,99% da área total plantada. Esse número representa um crescimento de 2,3% comparado a 2023, evidenciando a crescente importância dessa cultura na economia florestal brasileira com uma produtividade média de $34,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (IBÁ, 2025).

Em meados da década de 1970 foram encontrados híbridos naturais do *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* no Estado do Espírito Santo, que apresentavam grande adaptabilidade e características desejáveis para a produção florestal, como rápido crescimento e resistência a doenças, tendo entrado no programa de melhoramento florestal da Aracruz Celulose (CAMPINHOS, 1979), fato relatado também por Zobel e Talbert (1984). Desde então, estes híbridos, que passaram a ser denominados de *Eucalyptus urograndis*, representam uma grande parcela das florestas plantadas nas zonas tropical e subtropical brasileiras.

Além disso, a seleção de árvores superiores, a hibridação, bem como melhores técnicas silviculturais e de manejo das florestas, impulsionaram a produtividade florestal ao longo das últimas décadas (IBÁ, 2025).

Nesse contexto, o manejo florestal para se obter melhor produtividade implica na escolha do espaçamento inicial adequado e no manejo da densidade florestal para cada ambiente e objetivo da floresta. O espaçamento tem grande influência na qualidade do sítio florestal, que corresponde à soma dos fatores que interferem na capacidade produtiva do povoamento (STAPE et al., 2010). Após alguns anos de crescimento, ocorre aumento na demanda por recursos, e as plantas entram em competição por luz, água, nutrientes e espaço para o desenvolvimento da copa e raízes (SILVEIRA et al., 2014).

As informações sobre a floresta, de forma a planejar o seu manejo, são obtidas nos inventários florestais, nos quais a amostragem deve contemplar uma ampla faixa de diâmetros para representar adequadamente a variabilidade estrutural dos povoamentos. Entre essas informações, destaca-se a relação entre diâmetro e altura das árvores, pois, devido ao alto custo de medição das alturas e à forte associação entre essas variáveis, geralmente são medidas as alturas de poucas árvores, enquanto os diâmetros são registrados para todas elas nas parcelas de inventário. Assim, as alturas não medidas são estimadas por funções de relação hipsométrica (FLORIANO, 2024b).

Essa relação hipsométrica corresponde ao vínculo matemático entre o diâmetro (d) e a altura total da árvore (h), permitindo estimar a altura a partir do diâmetro por meio de equações do tipo $h = f(d)$, denominadas equações hipsométricas (FLORIANO, 2024a). Tal abordagem contribui para reduzir custos e aumentar a eficiência dos inventários florestais, uma vez que possibilita estimativas confiáveis sem a necessidade de medir todas as árvores em campo (SCOLFORO et al., 2005).

Consequentemente, em plantações de *Eucalyptus* no Brasil, essa relação é particularmente relevante em povoamentos jovens, especialmente até os sete anos de idade, reforçando a necessidade de equações ajustadas para diferentes idades e materiais genéticos (FLORIANO, 2024b).

Um procedimento comum para determinação da altura consiste em medir o diâmetro de todas as árvores e selecionar um grupo reduzido, geralmente de 5 a 10 por parcela para medição da altura, ajustando em seguida uma equação hipsométrica para estimar as demais (BATISTA et al., 2001)

Para isso, diferentes modelos têm sido utilizados, representando a relação hipsométrica por meio do diâmetro (d) como variável independente e transformações da mesma, tais como: d^2 , d^3 , $1/d$, $1/d^2$, d^b , $\ln(d)$, e^d (BATISTA et al., 2001; FERRAZ FILHO et al., 2018) – onde “e” é a base do logaritmo natural (ln) e “b” é um coeficiente.

Assim, diante da relevância produtiva do gênero *Eucalyptus*, das particularidades do manejo em diferentes espaçamentos e da importância da modelagem hipsométrica para o inventário florestal, torna-se necessário estabelecer modelos precisos e consistentes para estimar a altura das árvores.

2 OBJETIVOS

- **Objetivo Geral**
- Desenvolver e avaliar modelos para prever a altura de um plantio clonal de *Eucalyptus urograndis* sob três espaçamentos, em Rio Largo – AL, com 72 meses de idade.
- **Objetivos específicos**
 - Avaliar o efeito do espaçamento e dos clones no crescimento em altura.
 - Verificar as correlações entre altura, diâmetro, idade, clones e espaçamentos;
 - Selecionar a equação de melhor desempenho para aplicação prática.

3 REVISÃO DE LITERATURA

História e gênero do eucalipto

O eucalipto foi introduzido na Europa por volta de 1774, inicialmente para fins ornamentais. Os primeiros plantios em escala comercial começaram mais tarde, em 1854. Em outros continentes, a introdução ocorreu em datas diferentes: na África do Sul em 1828, no Chile em 1823, tornando-o o primeiro país da América do Sul a adotar a espécie, e na Índia em 1843 (REVISTA DA MADEIRA, 2001).

O eucalipto chegou ao Brasil em 1825, inicialmente para uso ornamental e como quebra-vento. Seu valor econômico só foi reconhecido em 1903, quando a Companhia Paulista de Estradas de Ferro começou a usá-lo para produzir dormentes. Navarro de Andrade, conhecido como o pai da eucaliptocultura no Brasil, conduziu experimentos com a espécie entre 1904 e 1909 no Horto Florestal de Jundiaí (ANDRADE, 1961; REVISTA DA MADEIRA, 2001).

Com mais de 600 espécies, o gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália e países da Oceania, pertence à família *Myrtaceae*. Ele inclui plantas lenhosas, arbustivas ou arbóreas, sendo que algumas espécies podem ultrapassar os 100 metros de altura.

Entre as espécies mais cultivadas no Brasil para produção de celulose estão o *E. urophylla*, nativo das ilhas do arquipélago de Sonda, o *E. grandis* e *E. saligna*, provenientes do leste da Austrália. A ocorrência de híbridos é comum, e um dos mais importantes é o *E. urograndis*. Este cruzamento foi identificado nos anos 1980 como uma opção com alto potencial de produtividade para empresas (SCARPINELLA, 2002; LIMA, 1993; RIZZINI, 1971; ZOBEL e TALBERT, 1984).

Devido à sua grande diversidade de espécies, o eucalipto se adapta a uma ampla gama de condições, tolerando desde climas secos a chuvosos, temperaturas de -18°C a +35°C, e solos que variam de arenosos a encharcados (SCARPINELLA, 2002).

Relação hipsométrica

A relação hipsométrica constitui um dos princípios essenciais da dendrometria e dos inventários florestais, sendo compreendida como a expressão matemática que descreve o vínculo entre a altura total das árvores (h) e o diâmetro do tronco (d) medido a 1,30 m do solo (PRODAN et al., 1997; CAMPOS; LEITE, 2017).

A associação natural entre altura e diâmetro costuma apresentar correlação moderada, mesmo em formações homogêneas, sendo raros os casos em que o coeficiente de correlação ultrapassa 0,8 (CAMPOS; LEITE, 2017). A relação hipsométrica pode ser afetada por uma série de fatores que modificam o formato da curva h em relação à d, como idade do povoamento,

qualidade do sítio, densidade, posição sociológica das árvores, proporção de copa, espécie e práticas silviculturais adotadas (TONINI et al., 2006; BINOTI et al., 2012).

Em florestas plantadas, essa relação pode apresentar variações entre diferentes sítios e até mesmo dentro de um mesmo local, devido à heterogeneidade estrutural e ambiental (ASSIS et al., 2020). A evolução da curva hipsométrica acompanha o desenvolvimento do povoamento: em estágios iniciais, as curvas são mais íngremes, pois o crescimento em altura é predominante sobre o crescimento diamétrico. À medida que a floresta amadurece, o incremento em altura tende à estabilização, e a curva se torna mais plana e deslocada para a direita, refletindo o aumento em diâmetro (CAMPOS; LEITE, 2017; MENDONÇA et al., 2023). Deduz-se, portanto, que a idade influencia a relação da altura com o diâmetro das árvores.

Para povoamentos de crescimento rápido, recomenda-se a atualização anual das equações hipsométricas durante as fases juvenis (SILVA et al., 2023). A fim de melhorar a precisão das estimativas e fortalecer a correlação entre altura e diâmetro, é indicada a estratificação dos dados em unidades homogêneas, ajustando uma equação específica para cada estrato (BINOTI et al., 2012; SOUZA et al., 2023). Opcionalmente, é possível que, além do diâmetro, a inclusão da idade como covariável nos modelos para prever a altura de povoamentos com diferentes idades possa resultar em equações eficientes.

A literatura especializada descreve diversos modelos matemáticos aplicáveis à modelagem hipsométrica, abrangendo formas lineares, não lineares e mistas. Esses modelos devem ser avaliados estatisticamente, de modo a selecionar aquele que melhor representa o comportamento do povoamento analisado (CURTIS, 1967; CAMPOS; LEITE, 2017). Embora alguns modelos possam ser linearizados, os modelos não lineares, como os de Chapman-Richards, Weibull, Monomolecular e Gompertz, apresentam melhor fundamentação biológica e maior estabilidade nos parâmetros estimados (HUANG et al., 2000), o que assegura resultados mais confiáveis quando aplicados a diferentes conjuntos de dados.

Pesquisas recentes com povoamentos de *Eucalyptus* evidenciam que o ajuste de equações hipsométricas estratificadas por parcela e idade de medição (a partir de 3,8 anos) proporciona melhoras significativas nas estimativas de altura. Entre os modelos testados, o modelo de Curtis, em sua forma logarítmica, destacou-se pela simplicidade estrutural e elevado desempenho estatístico (SOUZA et al., 2023; SANTANA et al., 2023).

Modelagem

A modelagem da altura total das árvores, usualmente expressa por meio da relação hipsométrica (h/d), tem papel essencial nos inventários florestais e é fortemente condicionada

pela qualidade do material genético (clones) empregado (CAMPOS; LEITE, 2017; BINOTI et al., 2012). A diversidade genética é um dos principais fatores que interferem na relação entre altura e diâmetro. Pesquisas realizadas com povoamentos de *Eucalyptus* sob diferentes condições de talhão, incluindo quatro materiais clonais, evidenciaram que a variável “clone”, quando considerada como categórica (*dummy*), apresentou significância estatística nos modelos que descrevem a relação altura-diâmetro (SANTANA et al., 2023; SOUZA et al., 2023). É esperado que cada material clonal manifeste padrões de crescimento diferenciados em altura, refletindo as particularidades genéticas e o grau de adaptação às condições locais (STAPE et al., 2010).

Em análises baseadas em modelos mistos, embora o efeito do clone seja significativo, sua contribuição para o ajuste e precisão do modelo tende a ser menor quando comparada a variáveis como idade e altura dominante (ASSIS et al., 2020; MENDONÇA et al., 2023). Além do fator genético, o crescimento em altura também é influenciado pela competição entre árvores, qualidade do sítio e pelas condições edáficas e climáticas (CAMPOS; LEITE, 2017; TONINI et al., 2006).

A densidade de plantio ou espaçamento constitui outro elemento determinante que interfere diretamente no crescimento e em variáveis dendrométricas, como a altura (REIS et al., 2016; GONÇALVES et al., 2013). Em povoamentos jovens e adensados, a competição por luz se torna o fator predominante, favorecendo o crescimento em altura em detrimento do diâmetro, já que as árvores competem pelo acesso à radiação solar e tendem a crescer mais verticalmente (STAPE et al., 2010). Observa-se, ainda, que níveis moderados de competição podem estimular o alongamento das árvores (GONÇALVES et al., 2013).

Por outro lado, o efeito do espaçamento sobre a altura é geralmente pequeno quando se avaliam árvores dominantes. Pesquisas com *Eucalyptus benthamii* aos dois e três anos de idade não identificaram diferenças estatísticas significativas na altura individual entre diferentes espaçamentos (ROSSI et al., 2014). A resposta do crescimento em altura à variação da densidade, portanto, não segue um padrão linear, o que explica a diversidade de resultados encontrados na literatura (MENDONÇA et al., 2023).

Enquanto o crescimento diamétrico tende a aumentar proporcionalmente com o espaço vital disponível (maior espaçamento → maior diâmetro), a altura total pode não acompanhar essa mesma relação (REIS et al., 2016). Em estudos com *Eucalyptus urophylla* sob densidades variando de 224 a 1313 árvores por hectare, os povoamentos com densidades intermediárias (319 a 922 árvores ha⁻¹) apresentaram maiores médias de altura do que os muito adensados ou

muito espaçados (SANTANA et al., 2023). Isso sugere que, em densidades médias, a competição por luz ainda é suficiente para induzir o alongamento, sem restringir severamente os recursos.

Entretanto, em altas densidades como no espaçamento de $3,0 \times 1,0$ m em clones híbridos de *Eucalyptus* é comum a ocorrência de menores médias de altura, uma vez que o excesso de competição por água e nutrientes tende a limitar o crescimento (GONÇALVES et al., 2013). Já o espaçamento de $3,0 \times 2,0$ m proporcionou o melhor desempenho em altura em um clone de *Eucalyptus urophylla* $\times$ *Eucalyptus grandis*, superando tanto os espaçamentos mais fechados quanto os mais amplos (ASSIS et al., 2020).

Na modelagem da altura, a densidade e o grau de competição são frequentemente incorporados por meio de variáveis explicativas. Elementos como a altura dominante (hdom) e o diâmetro médio quadrático (dg) costumam ser integrados a modelos hipsométricos genéricos, a fim de captar as variações de crescimento associadas à idade e ao sítio (CAMPOS; LEITE, 2017; BINOTI et al., 2012).

Nos modelos de crescimento individual, o índice de competição (IC) é uma variável de grande relevância. Em pesquisas com *Eucalyptus*, o índice BAL (*Basal Area of Larger trees*) apresentou relação negativa com o incremento corrente anual em altura (ICAh), demonstrando que o aumento da competição exercida por árvores vizinhas reduz o potencial de incremento em altura (REIS et al., 2016; MENDONÇA et al., 2023). Assim, embora baixa competição possa favorecer o crescimento vertical, altos níveis de disputa por recursos tendem a restringir o crescimento tanto em altura quanto em diâmetro (CAMPOS; LEITE, 2017).

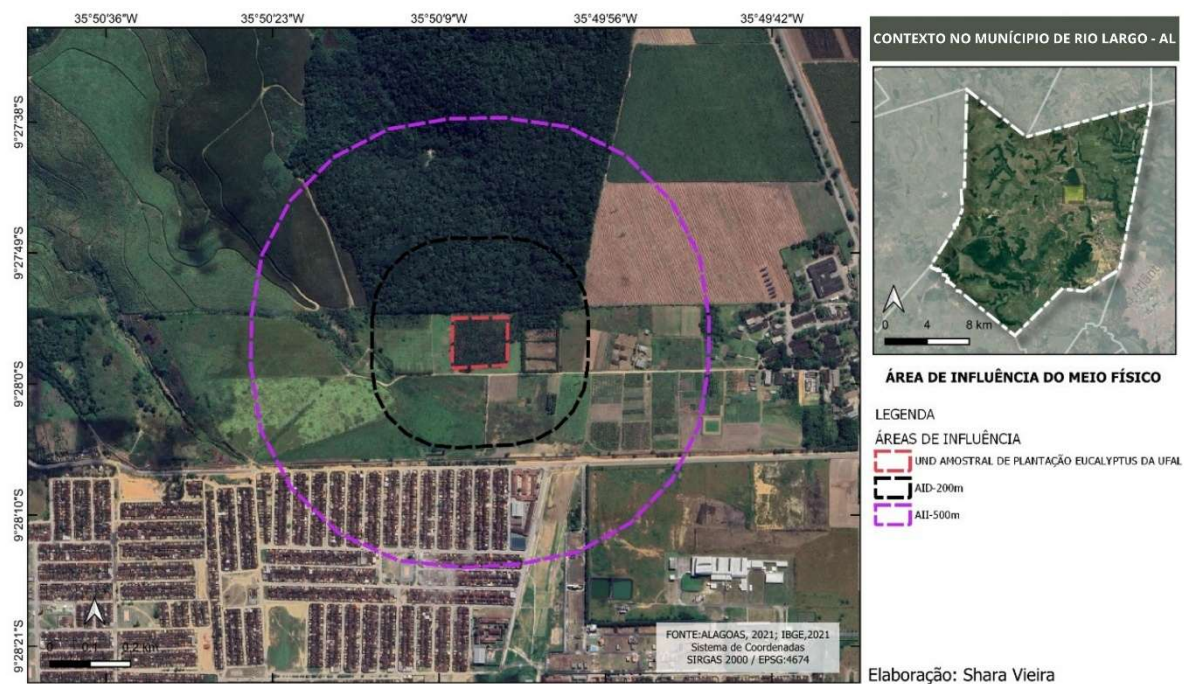
As plantações de *Eucalyptus* deste estudo estão localizadas nos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas, um ambiente caracterizado pela predominância de Latossolos Amarelos e Argissolos da Formação Barreiras. Estes solos frequentemente exibem um caráter coeso em seus horizontes subsuperficiais, uma condição edáfica que influencia diretamente a capacidade produtiva do sítio e, conseqüentemente, a relação entre diâmetro e altura das árvores (FERREIRA et al., 2009).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área

As atividades foram desenvolvidas na área experimental da Universidade Federal de Alagoas, no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias – Ufal/Ceca, localizada no município de Rio Largo, AL 9°28'S, 35°49'W, 127 m. A região ambiental é parte da Zona da Mata do estado de Alagoas (Figura 1).

Figura 1: Unidade amostral da plantação de *Eucalyptus* da Universidade Federal de Alagoas – Ceca.



Fonte: Autor (2025)

O clima é do tipo (As) na classificação Köppen, tropical com verões secos e invernos chuvosos, com temperatura média anual de 25,3°C e precipitação anual de 1441 mm (CRUZ et al., 2010). Os solos são do tipo Latossolo Amarelo Distrocoeso Argissólico com textura média a argilosa e declividade inferior a 2% (ALMEIDA et al., 2008).

A plantação recebeu adubação de base na implantação e anualmente foi submetida a capinas manuais e controle de formigas cortadeiras com de iscas granuladas. A referida área foi implantada no ano de 2017 pelo Laboratório de Produtos Florestais da Ufal/Ceca, ao lado de um fragmento de floresta nativa.

Amostragem e coleta de dados

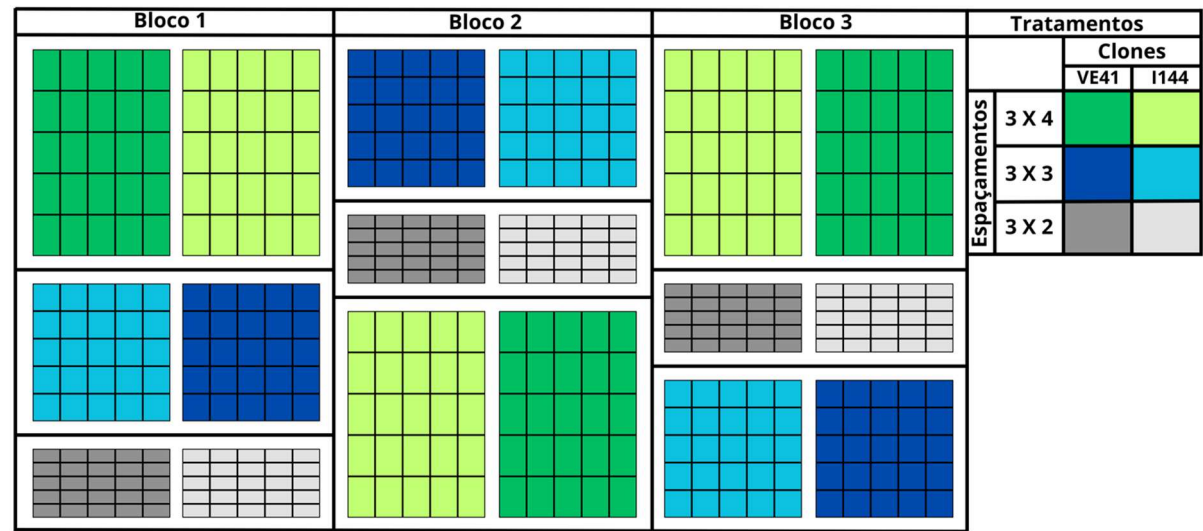
O experimento foi conduzido em blocos casualizados com parcelas subdivididas numa área de 0,8 ha cultivada com clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, conhecido como *Eucalyptus urograndis*, em 3 diferentes espaçamentos (3 m X 2 m, 3 m X 3 m e 3m X 4 m, correspondentes a densidades populacionais de 1.600, 1.111 e 833 plantas por hectare, respectivamente, representando as parcelas; e, 2 clones de eucalipto (VE41 e I144), representando as subparcelas. O delineamento experimental totalizou 18 subparcelas.

Cada subparcela experimental foi composta por 49 árvores (sete linhas de plantas com sete árvores por linha). A definição desse número, bem como das 25 árvores centrais utilizadas como área útil, foi previamente estabelecida em função do tamanho disponível da área

experimental e da quantidade de mudas destinadas ao plantio. Todavia, mesmo decorrente dessas condições, o tamanho da parcela resultante mostrou-se adequado para as análises propostas, permanecendo compatível com o adotado em diversos estudos semelhantes na literatura.

As avaliações foram realizadas medindo-se a circunferência a 1,3 m do solo e as alturas das árvores nas 25 plantas centrais (cinco linhas de plantas com cinco árvores por linha), desprezando-se uma fileira de árvores de cada extremidade, com o objetivo de evitar o efeito de bordadura (Figura 2).

Figura 2: Croqui para identificação dos espaçamentos e dos materiais genéticos do experimento com *Eucalyptus* da Universidade Federal de Alagoas – Ufal/Ceca.



Fonte: Autor (2025).

As medições ocorreram anualmente de 1 a 6 anos de idade, foram realizadas no mês de setembro (mês de aniversário de plantio), tendo-se medido as circunferências do tronco com uma fita métrica a 1,3 m de altura para depois converter em diâmetros, enquanto as alturas foram medidas com clinômetro (Figura 3).

Figura 3: Medição da altura total das árvores (A) e da circunferência a altura do peito (B)



Fonte: Auto (2025).

Analise de dados

As análises foram realizadas com o SAS OnDemand for Academics. Foi realizada análise da variância das alturas das árvores para determinar a significância dos tratamentos, utilizando-se o modelo matemático recomendado por Pimentel-Gomes (2022), identificado a seguir:

$$Y = \text{Bloco} + \text{Espaçamento} + \text{Erro 1} + (\text{Bloco} * \text{Espaçamento}) + \text{Clone} + \text{Espaçamento} * \text{Clone} + \text{Erro 2}$$

As árvores mortas e falhas de plantio foram consideradas como árvores perdidas, restando 2.152 observações das 2700 observadas nos 5 anos de monitoramento. Os espaçamentos foram considerados como 6, 9 e 12 m². Os clones foram codificados como 1 e 2. A seguir foi calculada a correlação de Pearson entre o diâmetro e a altura e os efeitos de espaçamentos e clones foram determinados com a correlação de Spearman.

Para a modelagem da altura foram utilizadas as variáveis independentes significativas (X), com as seguintes transformações: X^2 ; X^3 ; X^4 ; X^5 ; $\frac{1}{X}$; $\frac{1}{X^2}$; $\frac{1}{X^3}$; $\frac{1}{X^4}$; $\frac{1}{X^5}$; $\ln(X)$; $\ln(X^2)$; $\ln(X^3)$; $\ln(X^4)$; $\ln(X^5)$; $\ln\left(\frac{1}{X}\right)$; $\ln\left(\frac{1}{X^2}\right)$; $\ln\left(\frac{1}{X^3}\right)$; $\ln\left(\frac{1}{X^4}\right)$; $\ln\left(\frac{1}{X^5}\right)$; $X^{\left(\frac{1}{2}\right)}$; $X^{\left(\frac{1}{3}\right)}$; $X^{\left(\frac{1}{4}\right)}$; $X^{\left(\frac{1}{5}\right)}$. O processamento foi realizado com inclusão do intercepto e sem intercepto no modelo. As variáveis independentes foram selecionadas pelo procedimento *Stepwise* e posteriormente foram eliminadas as variáveis com R²parcial menos significativo e causando inflação de variância.

A qualidade das equações foi determinada pelo Coeficiente de Determinação (R^2) e Coeficiente de Variação (CV%) das equações ajustadas, obtidos com as seguintes fórmulas:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \right)$$

Onde: R^2 = Coeficiente de Determinação; SQ_{res} = Soma de Quadrados do Resíduo; SQ_{tot} = Soma de Quadrados do Total.

$$CV\% = 100 \cdot \frac{Syx}{Ym}$$

Onde: CV% = Coeficiente de Variação em percentagem; Syx = Erro Padrão de Estimativas; Ym = média dos valores da variável dependente Y.

A seleção de variáveis independentes (preditoras) foi realizada com o uso do $R^2_{parcial}$ e do Fator de Inflação de Variância (FIV), calculados como segue:

$$R^2_{parcial_i} = \frac{(R^2 - R^2 \text{ do modelo reduzido})}{(1 - R^2 \text{ do modelo reduzido})}$$

Onde: $R^2_{parcial_i}$ é o Coeficiente de Determinação parcial da variável considerada "i"; R^2 = Coeficiente de Determinação do modelo completo; R^2 do modelo reduzido = R^2 obtido para o modelo completo, excluindo-se a variável de interesse "i".

O procedimento para se obter $R^2_{parciais}$ para várias variáveis preditoras é o seguinte: iniciar com um modelo simples, sem variáveis preditoras; adicionar uma variável preditora ao modelo a cada passo; após adicionar a nova preditora, calcula-se o novo R^2 e subtrai-se o R^2 do passo anterior; a diferença é o R^2 parcial da nova preditora "i" adicionada ao modelo, calculados por:

$$FIV_i = \frac{1}{(1 - R^2_{parcial_i})}$$

Onde: FIV_i = Fator de Inflação de Variância da preditora "i"; $R^2_{parcial_i}$ = Coeficiente de Determinação da preditora "i".

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O diâmetro das árvores apresentou média de 11,91 cm, variando de 1,27 cm a 30,07 cm, com um desvio padrão de 4,77 cm, o que revela uma considerável variabilidade no crescimento diâmetrico, provavelmente por diferenças locais no ambiente e competição de indivíduos (Tabela 1).

A altura média das árvores foi de 13,97 m, com desvio padrão de 6,15 m, evidenciando também alta heterogeneidade no crescimento em altura (Tabela 1). Esses resultados indicam variações importantes entre os indivíduos do experimento, tanto em termos de espaçamento

quanto de desempenho de diâmetro e altura, o que pode influenciar diretamente a produtividade e as decisões de manejo florestal.

Tabela 1. Estatísticas das variáveis de um experimento com *Eucalyptus* em Rio Largo, AL.

Variável	Unidade	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Idade	meses	2700	42	20,50	12	72
Espaçamento	m ²	2700	9	2,45	6	12
d	cm	2540	11,91	4,77	1,27	30,07
h	m	2535	13,97	6,15	1	29,87

Fonte: Autor (2025)

Efeito do espaçamento e dos clones:

O resultado da análise da variância das alturas das árvores do experimento é apresentado na (Tabela 2).

No experimento atual, o efeito do fator bloco foi estatisticamente significativo, sugerindo que características locais de variações no ambiente, como o solo, impactam o crescimento das árvores. Por outro lado, o fator clone e interação entre clone e espaçamento não foram significativos ao nível de 5%, o que indica que, sob os critérios estatísticos adotados, esses efeitos não exerceram influência suficiente sobre a variável altura e não foram incluídos posteriormente na modelagem da altura. A interação entre bloco e espaçamento também não foi significativa, o que aponta que o efeito do espaçamento sobre a altura foi consistente entre os diferentes blocos avaliados (Tabela 2).

O fator espaçamento apresentou forte influência sobre o crescimento em altura, evidenciando que os clones de *E. urograndis* em maiores espaçamentos tendem a atingir maiores alturas, possivelmente em função da redução da competição por recursos como luz, água e nutrientes (Tabela 2). Oliveira Neto et al., (2010) destacam que o espaçamento ideal é aquele capaz de fornecer o maior volume de produto, com tamanho, forma e qualidade adequados, de acordo com a finalidade do plantio e o nível de mecanização das operações florestais.

Rocha (2011), avaliando a densidade de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus camaldulensis* nas idades de 48 e 61 meses, observou que à medida que foram ampliados os espaçamentos, as alturas das árvores também aumentaram, o que resultou em um ganho no crescimento em altura, com copas mais altas e troncos mais longos.

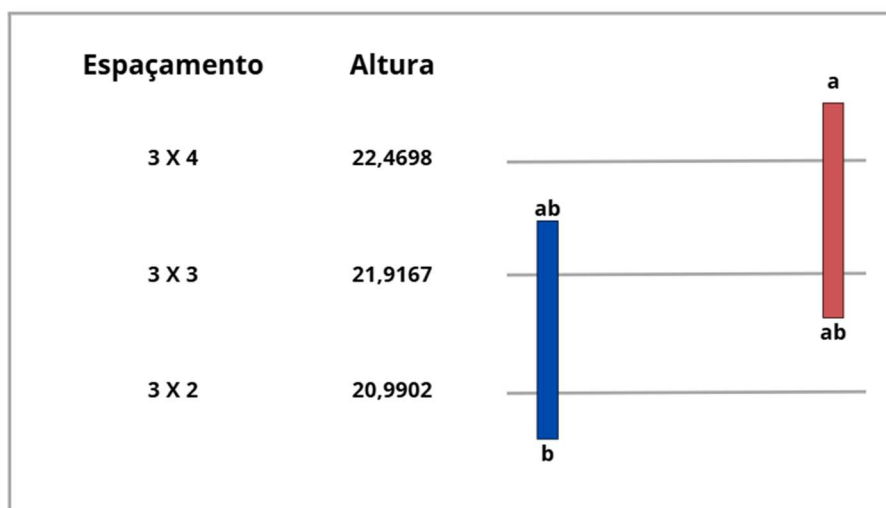
Tabela 2. Anova das alturas aos 72 meses de *Eucalyptus* em Rio Largo, AL.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	Pr > F	Sig.
Bloco	2	96,24	48,12	8,96	0,033	*
Espaçamento	2	140,85	70,43	13,12	0,018	*
Bloco*Espaçamento	4	21,48	5,37	1,24	0,295	ns
Clone	1	13,35	13,35	3,07	0,080	ns
Espaçamento*Clone	2	22,20	11,10	2,56	0,079	ns
Modelo	11	294,12	26,74	6,16	<,0001	**
Erro	369	1601,99	4,34			
Total	380	1896,11				

Onde: Pr>F = probabilidade do valor de F; Sig. = significância do valor de F; ns = não significativo; (*) = significativo a 5%; (**) = significativo a 1% de probabilidade.

O teste de Tukey aplicado às médias dos espaçamentos evidenciou a formação de dois grupos distintos, demonstrando que o arranjo espacial influencia significativamente o crescimento em altura. O espaçamento de 3 m × 4 m apresentou as maiores alturas médias, diferenciando-se estatisticamente do espaçamento mais adensado (3 m × 2 m) e agrupando-se com o espaçamento intermediário (3 m × 3 m). Contudo, o espaçamento de 3 m × 3 m não diferiu do 3 m × 2 m, indicando que, embora haja tendência de incremento da altura com o aumento do espaçamento, esse efeito não é linear entre todos os arranjos estudados. (Figura 4).

Figura 4: Teste de Tukey ($\alpha=5\%$) para a altura em diferentes espaçamentos.



Fonte: Autor (2025)

Correlações e relação hipsométrica

Com intuito de definir as variáveis significativas para utilizar no desenvolvimento de equações para estimar a altura das árvores foram analisadas as correlações entre a altura e as variáveis espaçamentos, clones e diâmetro, cujos resultados são apresentados na (Tabela 3).

Na sequência, foram analisados os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a altura das árvores, o diâmetro e a idade (Tabela 3), sendo que ambos os casos apresentaram alta significância com r de 0,898 e r de 0,945 respectivamente, evidenciando a influência dessas variáveis sobre a altura das árvores. O diâmetro e a idade apresentaram coeficiente de correlação de 0,788, altamente significativo.

Tabela 3. Coeficientes de Correlação de Pearson (r) entre altura (h), diâmetro (d) e idade num experimento com *Eucalyptus*, até os 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

		h	d	Idade
h	r	1	0,89828	0,94488
	p		<,0001	<,0001
	n	2542	2540	2542
d	r	0,89828	1	0,78775
	p	<,0001		<,0001
	n	2540	2540	2540
Idade	r	0,94488	0,78775	1
	p	<,0001	<,0001	
	n	2542	2540	2700

Onde: r = correlação de Pearson; p = probabilidade; n = número de observações.

Os coeficientes de correlação de Spearman (r) da altura com o espaçamento foi de 0,076, altamente significativo, embora baixo, também apresentou significância do valor de F na análise da variância aos 72 meses de idade, tendo sido considerado para a modelagem da altura. O fator clone não apresentou correlação significativa com a altura nessa idade, da mesma forma não apresentou significância na análise da variância e foi desconsiderado para a modelagem da altura. Também não houve correlação significativa entre clone e espaçamento (Tabela 4).

Tabela 4. Coeficientes de Correlação de Spearman (r) entre a altura (h), espaçamentos e clones num experimento com *Eucalyptus*, até os 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

		h	Espaçamento	Clone
h	r	1	0,07554	0,02349
	p		0,0001	0,2365
	n	2542	2542	2542
Espaçamento	r	0,07554	1	0,00272
	p	0,0001		0,8876
	n	2542	2700	2700
Clone	r	0,02349	0,00272	1
	p	0,2365	0,8876	
	n	2542	2700	2700

Onde: r = correlação de Spearman; p = probabilidade; n = número de observações.

Silva et al. (2019) avaliaram três clones de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* sob diferentes espaçamentos e observaram que não houve correlação significativa entre clone e

espaçamento, assim como clone e altura, enquanto os espaçamentos maiores estavam associados a maiores alturas e diâmetros. Além disso, foi confirmada forte correlação entre altura e diâmetro, reforçando os padrões observados no presente estudo.

A seguir foram executadas a modelagem com uso do procedimento PROC REG do SAS, com as opções de seleção de variáveis pelo método *Stepwise* e determinação do Fator de Inflação de Variância (FIV), onde foi obtida a equação 1 (Tabela 5).

Tabela 5. Seleção de variáveis incluindo o intercepto no modelo para modelagem da altura de *Eucalyptus urograndis* dos 12 aos 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	Pr > t	FIV	R ² parcial
$t^{(1/2)}$	0,473250	1,81E-01	2,61	0,0091	154,0	0,90950
d^2	0,320370	6,14E-02	5,22	<,0001	90116,0	0,04590
d^3	-0,021440	4,84E-03	-4,43	<,0001	286818,0	0,00150
t^5	-4,88E-09	5,66E-10	-8,63	<,0001	237,0	0,00100
t^3	0,000045	4,59E-06	9,77	<,0001	569,9	0,00070
$1/t^5$	-606774,0	6,81E+04	-8,92	<,0001	17,4	0,00040
d^4	0,000673	1,74E-04	3,87	0,0001	195797,0	0,00020
d	-1,712110	3,48E-01	-4,93	<,0001	4513,4	0,00010

Fonte: Autor (2025)

A equação 2 também obtida através do método *Stepwise* e determinação do Fator de Inflação de Variância (FIV), demonstrado na (Tabela 6).

Tabela 6. Seleção de variáveis sem intercepto no modelo para modelagem da altura de *Eucalyptus urograndis* dos 12 aos 72 meses de idade, em Rio Largo, AL.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t	Pr > t	FIV	R ² parcial
$\ln(t)$	-420,0313	63,6708	-6,6	<,0001	86296586	0,00000
$t^{(1/3)}$	498,10779	75,61537	6,59	<,0001	107758865	0,00000
d^2	-0,00392	0,00166	-2,37	0,0181	187,99432	0,00000
$1/t^4$	-6153376	957058	-6,43	<,0001	610569	0,00010
$1/t^5$	60588891	9530571	6,36	<,0001	419167	0,00010
$1/d$	8,81126	1,27579	6,91	<,0001	40,1437	0,00020
d	0,67445	0,05628	11,98	<,0001	856,95876	0,01450
t	-3,66984	0,58747	-6,25	<,0001	1175161	0,97850

Fonte: Autor (2025)

Na segunda etapa da análise, procedeu-se à eliminação progressiva das variáveis com menor R² parcial nos modelos 1 e 2, de modo a reduzir a redundância entre os preditores e minimizar problemas de colinearidade. Esse processo de seleção hierárquica permitiu identificar quais variáveis realmente contribuíam para explicar a variação da altura sem inflacionar desnecessariamente a variância dos coeficientes.

À medida que as variáveis menos relevantes foram removidas, observou-se uma redução gradual nos valores do Fator de Inflação da Variância (FIV). O critério adotado foi a

manutenção de FIV inferior a 10 para cada variável remanescente, garantindo maior estabilidade estatística e confiabilidade nas estimativas dos parâmetros. Uma vez atendido esse requisito, chegaram-se às equações 3 e 4, que representam versões mais parcimoniosas e estatisticamente robustas dos modelos originais.

Esse procedimento não apenas mitigou a multicolinearidade, mas também resultou em modelos mais eficientes, com menor número de variáveis, maior interpretabilidade e desempenho satisfatório para fins de predição da altura (Tabela 7).

Tabela 7. Modelos desenvolvidos para altura de *Eucalyptus* em Rio Largo, AL.

Nº	Equação	Coeficientes			Estatísticas			
	Modelo	b0	b1	b2	R²	R²aj.	Syx	CV
1	$h=f(d, d^2, d^3, d^4, t^3, t^5, 1/t^5, t^{(1/2)})$, com intercepto	-	-	-	0,9594	0,9593	1,24	8,87
2	$h=f(d, d^2, 1/d, t, 1/t^4, 1/t^5, \ln(t), t^{(1/3)})$, sem intercepto	-	-	-	0,9934	0,9934	1,24	8,89
3	$h = b_0 + b_1 \cdot d^2 + b_2 \cdot t^{(1/2)}$	-4,9658	0,01592	2,6472	0,9554	0,9553	1,30	9,30
4	$h = b_1 \cdot d + b_2 \cdot t$	-	0,5213	0,1901	0,9929	0,9929	1,28	9,19

Onde: h=altura (m); d=diâmetro (cm) a 1,3 de altura; t=idade em meses.

A primeira equação obtida, com o intercepto, apresentou um Coeficiente de Determinação muito forte ($R^2 = 0.9594$) e baixo Coeficiente de Variação ($CV = 8,87\%$), utilizando uma combinação complexa de variáveis, incluindo potências de diâmetro e tempo, entretanto com excesso de variáveis independentes causando inflação de variância.

A segunda equação, sem intercepto, que também considerou múltiplas combinações entre diâmetro e tempo, apresentou o melhor desempenho estatístico com um R^2 de 0,9934 e CV de 8,89%, também com excesso de variáveis independentes causando inflação de variância.

A terceira equação ($h = -4,96577 + 0,01592 \cdot d^2 + 2,6472 \cdot t^{(\frac{1}{2})}$), derivada da primeira com intercepto, excluindo-se as variáveis menos significativas que estavam causando alta inflação de variância, apresentou um R^2 de 0,9554 e CV de 9,30%, demonstrando excelente ajuste, mas com leve inferioridade em relação à quarta equação modelada a seguir.

A quarta equação ($h = 0,5213 \cdot d + 0,19015 \cdot t$), derivada da segunda sem intercepto, em que foram excluídas as variáveis menos significativas que causaram excesso de inflação de variância, apresentou um excelente ajuste com R^2 de 0,9929 e CV de 9,19%, com resultados um pouco melhores que a terceira, tendo sido considerada a melhor para descrever a altura das árvores do experimento dos 12 aos 72 meses de idade.

Hofiço et al. (2020) trabalharam com modelos mistos para relação hipsométrica de *Eucalyptus grandis* com 8 anos de idade, conseguindo R^2 em torno de 0,91 e Erros Padrão inferiores a 0,6 m. Kemenly et al. (2015) ajustaram a relação hipsométrica de *Eucalyptus*

grandis com 7 anos de idade, sendo que a melhor equação apresentou R^2_{aj} de 0,87 e coeficiente de variação de 6,5%.

Campos e Leite (2006) destacam que, em estudos sobre relações hipsométricas, é comum que o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) não ultrapasse 80%, uma vez que a correlação entre altura e diâmetro tende a ser menos intensa do que a existente entre altura e volume.

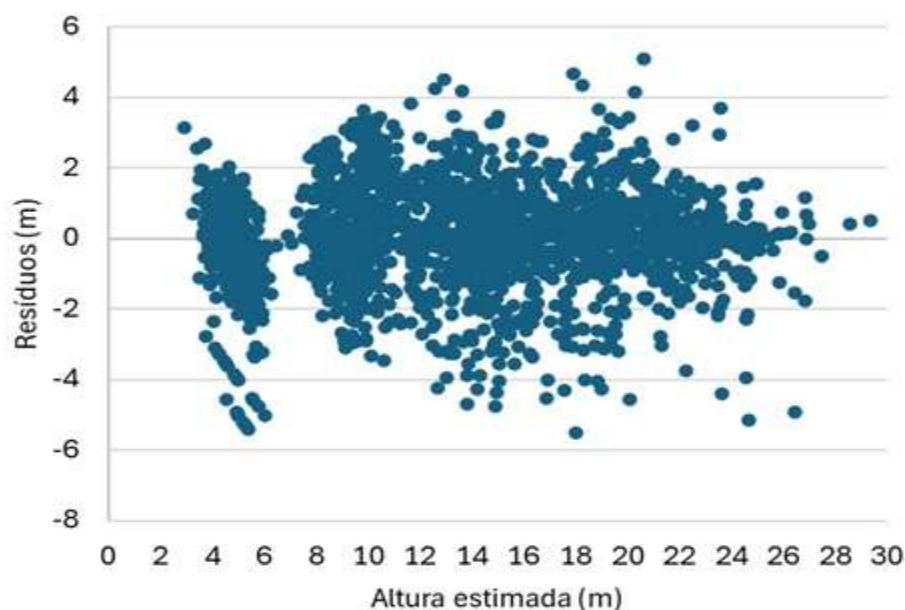
De acordo com Braghim (2025), o modelo proposto por Campos apresentou o melhor desempenho, com o maior valor de R^2 generalizado (0,81), o menor erro médio quadrático (RQEM = 2,32 m) e a menor média das diferenças absolutas (MDA = 1,81 m). O modelo de Prodan modificado também obteve resultados satisfatórios, com R^2 de 0,80, RQEM de 2,40 m e MDA de 1,84 m.

Resultados semelhantes foram observados por Jesus et al. (2015), que identificaram o modelo de Prodan como o mais preciso na estimativa da altura em povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* no Distrito Federal, com R^2 de 0,7481 e CV% de 9,18%. Já os modelos de Henriksen e Curtis apresentaram desempenho inferior, com valores de R^2 de 0,68 e 0,75, CV de 9,59% e 9,18%, respectivamente.

Embora existam modelos amplamente reconhecidos, as Equações 1, 2, 3 e 4 (Tabela 7) apresentaram desempenho superior, com maiores valores de R^2 . Dentre elas, destacou-se a Equação 4, que, além de demonstrar elevada precisão, possui aplicação mais simples e prática em condições operacionais.

O gráfico de resíduos da equação selecionada evidencia uma distribuição aleatória dos erros em torno da linha zero, sem indicar tendência de superestimação ou subestimação das alturas (Figura 5). A dispersão apresenta-se relativamente homogênea ao longo da faixa de valores preditos, sem sinais expressivos de heterocedasticidade, o que demonstra que o modelo atende às premissas básicas da regressão. Também não se verifica dependência entre os resíduos. Portanto, em conjunto com o elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9929$), o comportamento dos resíduos (Figura 5) evidencia a robustez estatística da equação ajustada. A distribuição aleatória dos erros e a ausência de heterocedasticidade indicam que o modelo apresenta bom desempenho na predição da altura, demonstrando consistência sob as condições edafoclimáticas dos tabuleiros costeiros. Esses resultados reforçam o potencial da equação para representar adequadamente a relação entre altura, diâmetro e idade no povoamento avaliado.

Figura 5: Gráfico de resíduos da equação selecionada ($h = 0,5213 \cdot d + 0,19015 \cdot t$)



Fonte: Autor (2025)

As duas equações ajustadas sem as variáveis que inflacionaram a variância demonstraram elevada capacidade preditiva para estimar a altura das árvores analisadas. Contudo, a quarta equação apresentou o melhor desempenho estatístico, destacando-se pela elevada precisão e pela praticidade de aplicação em contextos operacionais, em virtude de sua estrutura linear simples e eficiência.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram de forma consistente que o espaçamento influencia significativamente o crescimento em altura das árvores, enquanto os materiais genéticos (clones) avaliados não apresentam efeito estatístico relevante nas condições do experimento. As fortes correlações entre altura, diâmetro e idade evidenciam a coerência das relações biométricas do povoamento e demonstram que essas variáveis são adequadas para representar seu desenvolvimento ao longo do tempo. Com base nessas relações, diferentes modelos hipsométricos foram ajustados, destacando-se a equação ajustada com o modelo $h=b_1.d+b_2.t$ pela elevada precisão, baixa variabilidade residual e facilidade de aplicação, o que a torna uma ferramenta eficaz para estimar a altura de *Eucalyptus urograndis* nos tabuleiros costeiros de Alagoas.

Diante desses resultados, verificou-se que o estudo alcançou seu propósito ao identificar as variáveis relevantes, avaliar seus efeitos e propor uma equação de estimativa com desempenho satisfatório e aplicabilidade operacional. No entanto, considerando a diversidade de materiais genéticos e condições edafoclimáticas presentes em diferentes regiões, recomenda-

se que o modelo selecionado seja aplicado e validado em novos experimentos, abrangendo distintas idades, espaçamentos e ambientes. Essa ampliação permitirá verificar sua estabilidade, aprimorar sua robustez e fortalecer sua utilização em programas de manejo e planejamento florestal em contextos mais variados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. G. et al. **Classificação e atributos físicos de Latossolos Amarelos Distrocoesos de Alagoas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 2561–2573, 2008.

ASSIS, M. R. et al. **Modelagem da relação hipsométrica em povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. sob diferentes condições ambientais**. Scientia Forestalis, v. 48, n. 126, p. 1–13, 2020.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; MARQUESINI, M. **Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta**. Scientia Forestalis, n. 60, p. 149–163, dez. 2001.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. **Modelagem da relação hipsométrica em povoamentos de eucalipto por meio de redes neurais artificiais**. Revista Árvore, v. 36, n. 5, p. 919–928, 2012.

BRAGHIM, R. P. **Desempenho de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* spp. implantados sob diferentes condições experimentais**. Revista Floresta e Ambiente, São Paulo, 2025.

CAMARGO, M. N. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros: estudo e classificação**. Recife: SUDENE, 1958.

CAMPINHOS, E. **Melhoramento genético do *Eucalyptus* no Brasil**. Revista IPEF, Piracicaba, 1979.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017. 636 p.

CANOPY REMOTE SENSING SOLUTIONS. **Relatório técnico: distribuição de área plantada no Brasil (2015–2023)**. São Paulo: Canopy, 2024.

CINTRA, F. L. D. **Solos e uso da terra nos tabuleiros costeiros de Alagoas**. Aracaju: Embrapa, 1997.

COSTA, J. P. R. et al. **Agricultura e degradação dos solos nos tabuleiros**. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 447–456, 2009.

CRUZ, M. F. da; et al. **Caracterização climática e edáfica da Zona da Mata de Alagoas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 128–136, 2010.

CURTIS, R. O. **Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir.** Forest Science, v. 13, n. 4, p. 365–375, 1967.

ESG TECH. **Relatório de Monitoramento Florestal 2024.** São Paulo: ESG Tech, 2024.

FERRAZ FILHO, A. C.; MOLA-YUDEGO, B.; RIBEIRO, A. et al. **Height–diameter models for Eucalyptus sp. plantations in Brazil.** CERNE, v. 24, n. 1, p. 9–17, 2018.

FERREIRA, R. C. et al. **Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1055-1065, 2009.

FLORIANO, E. P. **Inventário florestal: medição e monitoramento das florestas.** Londres: Novas Edições Acadêmicas, 2024b.

FLORIANO, E. P. **Modelos florestais: desenvolvendo árvores e florestas matematicamente.** Londres: Novas Edições Acadêmicas, 2024a.

GONÇALVES, J. L. M. et al. **Sustentabilidade da produção de eucaliptos.** Piracicaba: IPEF, 2013. p. 49–101.

HOFIÇO, N. S. A. et al. **Height–diameter relationships for Eucalyptus grandis Hill ex Maiden in Mozambique: using mixed-effects modeling approach.** CERNE, v. 26, n. 2, p. 183–192, 2020.

HUANG, S.; TITUS, S. J.; LARSEN, D. R. **Forest height-diameter modeling.** Forest Ecology and Management, v. 129, p. 57–77, 2000.

IBÁ – **Indústria Brasileira de Árvores.** Relatório anual 2025. São Paulo:IBÁ, 2025.

JACOMINE, P. K. T. **Solos dos Tabuleiros Costeiros: gênese, classificação e uso agrícola.** Recife: Embrapa Solos, 2001.

KEMENLY, A. et al. **Comportamento da relação hipsométrica de Eucalyptus grandis em um povoamento localizado em Dois Vizinhos–PR.** In: 12º Congresso Estadual do Rio Grande do Sul, Nova Prata–RS, 2015. p. 434–441.

LIMA NETO, E. et al. **Caracterização de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 4, p. 1077–1086, 2009.

LIMA, W. P. **O eucalipto e o ambiente.** São Paulo: Edusp, 1993.

MENDONÇA, A. R. et al. **Curvas hipsométricas e crescimento de Eucalyptus spp. sob diferentes espaçamentos.** Revista de Ciências Agrárias, v. 46, n. 3, p. 1–10, 2023.

MOREAU, M. S. et al. **Dinâmica do uso e ocupação dos Tabuleiros Costeiros.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 2, p. 55–66, 2006.

NUNES, W. A. G. A. et al. **Origem e evolução dos solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, p. 1521–1531, 2011.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental.** 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2022.

- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1997.
- REIS, G. G. dos; REIS, M. das G. F.; LEITE, H. G. **Efeito da densidade de plantio no crescimento de povoamentos de eucalipto**. *Cerne*, v. 22, n. 2, p. 209–218, 2016.
- REVISTA DA MADEIRA. **História do eucalipto no Brasil**. *Revista da Madeira*, Curitiba, n. 65, p. 30–38, 2001.
- RIZZINI, C. T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 1971.
- ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* para energia**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- ROSSETTI, D. F. et al. **Late Cenozoic sedimentary evolution of the Brazilian coast**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 45, p. 45–63, 2013.
- ROSSI, L. M. B.; WENDLING, I.; STUEPP, C. A. **Crescimento de *Eucalyptus benthamii* em diferentes espaçamentos e idades no sul do Brasil**. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 2, p. 193–202, 2014.
- SANTANA, R. C.; SOUZA, C. A. M.; et al. **Modelos hipsométricos aplicados a povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes idades e condições edafoclimáticas**. *Revista Árvore*, v. 47, e4703, 2023.
- SANTANA, R. C.; SOUZA, C. A. M.; LEITE, H. G. **Equações hipsométricas ajustadas por idade e sítio para *Eucalyptus* spp.** *Revista Árvore*, v. 47, e4703, 2023.
- SCARPINELLA, A. M. **Eucalipto: o gigante das florestas brasileiras**. São Paulo: Cultura Editores Associados, 2002.
- SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. **Fundamentos de mensuração florestal**. Santa Maria: UFSM, 2000. 352 p.
- SCOLFORO, J. R. S. et al. **Biometria florestal: modelos de regressão linear e não linear, relação hipsométrica, volume, afilamento e cubicagem**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2005.
- SILVA, J. A. A. et al. **Caracterização ambiental dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2000.
- SILVA, J. P. et al. **Ajuste e atualização de equações hipsométricas em florestas de rápido crescimento**. *Cerne*, v. 29, e103103, 2023.
- SILVA, W. G.; SANTOS, D. M. C. L.; LIMA, A. P. L. et al. **Growth and volumetric production of eucalyptus clones in different planting spaces**. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia-MS, v. 6, n. 3, p. 38–47, jul./set. 2019.
- SILVEIRA, E. R.; REINER, D. A.; SMANIOTTO, J. R. **Efeito do espaçamento de plantio na produção de madeira e serapilheira de *Eucalyptus dunnei* na região sudoeste do Paraná**. *Revista Técnico-Científica*, v. 1, n. 2, p. 1–9, 2014.

SOUZA, C. A. M.; SANTANA, R. C.; LEITE, H. G. **Equações hipsométricas para *Eucalyptus urograndis* em função da idade e do sítio.** Revista Floresta e Ambiente, v. 30, e20220123, 2023.

SOUZA, Z. M. et al. **Efeitos do uso agrícola nos solos dos Tabuleiros Costeiros.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 611–620, 2004.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; et al. **The Brazil eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production.** Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 259, p. 1684 - 1694, 2010.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. **Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* × *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients.** Forest Ecology and Management, v. 259, p. 1025–1032, 2010.

TAVARES, B. A. et al. **Caracterização climática da faixa litorânea do Nordeste.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 13, n. 2, p. 55–68, 1998.

TONINI, H.; COSTA, R. B.; SCHNEIDER, P. R. **Relação hipsométrica em povoamentos de *Tectona grandis* L.f. no estado de Mato Grosso.** Ciência Florestal, v. 16, n. 1, p. 95–104, 2006.

ZOBEL, B. J.; TALBERT, J. **Applied forest tree improvement.** New York: John Wiley, 1984.