



Modelagem do crescimento inicial de clones de eucalipto

Karina dos Santos Falcão¹, Filipe Valadão do Prado Cacau², Edilson Urbano³, Isabeli Moraes de Oliveira⁴

Resumo. Este estudo avaliou o crescimento dos clones de eucalipto I-144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) e 1277 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* sp.) no arranjo espacial de 3,0 x 1,8 (linhas triplas) + 9 m. A altura total (Ht), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume por planta (v planta⁻¹) foram avaliados dos 6 aos 20 meses de idade bimestralmente. O delineamento foi inteiramente casualizado, com dois tratamentos e três repetições. O v planta⁻¹ foi estimado a partir da equação de *Schumacher e Hall* $\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{LnDAP} + \beta_2 \text{LnHt} + e$, ajustado para cada clone. Os modelos de crescimento ajustados foram disponibilizados pelo software *Curve Expert 1.4*. A avaliação do crescimento até os 20 meses de idade demonstrou não haver diferença de crescimento entre os clones I-144 e 1277 sugerindo a possibilidade de uso dos materiais genéticos indistintamente. O maior grau de ajustamento para variável DAP ocorreu para o clone 1277, selecionado o modelo MMF, com coeficiente de correlação (r^2) e erro-padrão dos resíduos (Syx) de 0,958 e 0,581. Para a variável Ht, o clone I-144 apresentou o melhor grau de ajustamento para o modelo MMF com valores de (r^2) 0,969 e (Syx) 0,828. Para a variável v planta⁻¹, o clone I-144 apresentou melhores resultados através do modelo Gompertz, com (r^2) de 0,947 e (Syx) de 0,0059. O clone 1277 apresentou valores semelhantes para o modelo quadrático, com (r^2) de 0,946 e (Syx) de 0,0056. Independente do clone avaliado, o modelo quadrático foi o que apresentou os melhores resultados de ajuste para a variável v ha⁻¹, entretanto o melhor grau de ajustamento ocorreu para o clone 1277, com valores calculados para (r^2) e (Syx), de respectivamente 0,994 e 2,246.

Submitted on:
11/02/2023

Accepted on:
12/06/2023

Published on:
12/25/2023



Open Access
Full Text Article



Palavras-chave: Ajuste de Crescimento. Modelo Matemático. Volume.

DOI:10.21472/bjbs.v10n23-002

Modeling the initial growth of eucalyptus clones

Abstract. This study evaluated the growth of eucalyptus clones I-144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) and 1277 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* sp.) in the spatial arrangement of 3.0 x 1.8 (triple lines) + 9 m. Total height (Ht), diameter at breast height (DBH) and volume per plant (v planta⁻¹) were evaluated from 6 to 20 months of age bimonthly. The design was quite randomized, with two treatments and three replications. V .planta⁻¹ was estimated based on the discovery of

¹ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil.

E-mail: falcao_karina@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6973-1723>

² Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. E-mail: filipecacau@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0580-8688>

³ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. E-mail: edurbano2@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9351-5406>

⁴ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil.

E-mail: isabelimoraes04@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8466-8062>

Schumacher and Hall $\text{LnV} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \beta_2 \ln \text{Ht} + e$, adjusted for each clone. The adjusted growth models were made available by the Curve Expert 1.4 software. The evaluation of growth up to 20 months of age declared that there was no difference in growth between clones I-144 and 1277, indicating the possibility of using the genetic materials without distinction. The greatest degree of adjustment for the DAP variable occurred for clone 1277, selecting the MMF model, with a representation coefficient (r^2) and standard error of residues (Syx) of 0.958 and 0.581. For the Ht variable, clone I-144 presented the best degree of adjustment for the MMF model with values of (r^2) 0.969 and (Syx) 0.828. For the variable $v \text{ planta}^{-1}$, clone I-144 showed better results using the Gompertz model, with (r^2) of 0.947 and (Syx) of 0.0059. Clone 1277 presented similar values for the quadratic model, with (r^2) of 0.946 and (Syx) of 0.0056. Regardless of the clone evaluated, the quadratic model was the one that presented the best adjustment results for the variable $v \text{ ha}^{-1}$, however the best degree of adjustment occurred for clone 1277, with values calculated for (r^2) and (Syx), respectively 0.994 and 2.246.

Keywords: Growth Adjustment. Mathematical Model. Volume.

Modelando el crecimiento inicial de clones de eucalipto

Resumen. Este estudio evaluó el crecimiento de los clones de eucalipto I-144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) y 1277 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* sp.) en el arreglo espacial de 3.0 x 1.8 (líneas triples) + 9 m. Se evaluaron altura total (Ht), diámetro a la altura del pecho (DAP) y volumen por planta ($v \text{ planta}^{-1}$) de 6 a 20 meses de edad bimestralmente. El diseño fue completamente al azar, con dos tratamientos y tres repeticiones. $V.\text{planta}^{-1}$ se estimó a partir de la ecuación de Schumacher y Hall $\text{LnV} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \beta_2 \ln \text{Ht} + e$, ajustada para cada clon. Los modelos de crecimiento ajustados estuvieron disponibles mediante el software Curve Expert 1.4. La evaluación del crecimiento hasta los 20 meses de edad demostró que no hubo diferencia en el crecimiento entre los clones I-144 y 1277, sugiriendo la posibilidad de utilizar materiales genéticos indistintamente. El mayor grado de ajuste para la variable DAP ocurrió para el clon 1277, seleccionando el modelo MMF, con un coeficiente de correlación (r^2) y error estándar de residuos (Syx) de 0,958 y 0,581. Para la variable Ht, el clon I-144 presentó el mejor grado de ajuste para el modelo MMF con valores de (r^2) 0,969 y (Syx) 0,828. Para la variable $v \text{ planta}^{-1}$, el clon I-144 mostró mejores resultados utilizando el modelo de Gompertz, con (r^2) de 0.947 y (Syx) de 0.0059. El clon 1277 presentó valores similares para el modelo cuadrático, con (r^2) de 0,946 y (Syx) de 0,0056. Independientemente del clon evaluado, el modelo cuadrático fue el que presentó mejores resultados de ajuste para la variable $v \text{ ha}^{-1}$, sin embargo el mejor grado de ajuste se presentó para el clon 1277, con valores calculados para (r^2) y (Syx), respectivamente 0,994 y 2,246.

Palabras clave: Ajuste del Crecimiento. Modelo Matemático. Volumen.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com área total de 851 milhões de hectares, sendo 9,94 milhões correspondente a florestas plantadas. Dessas, 76% são cultivadas com eucalipto, que abrange 76% da área plantada no país, permanecendo como a espécie mais cultivada, totalizando 7,6 milhões de hectares. A produtividade do eucalipto e seu rápido crescimento são um dos fatores que determinam sua expansão no mercado. Plantios que visam alta produtividade, com uso de tecnologia adequada, podem apresentar rendimento médio de $42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No entanto, a média nacional equivale a $32,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (com casca), com duração média do ciclo de corte entre 6 e 7 anos. Na sequência de florestas plantadas, com 19%, está o

pinus, que se mantém praticamente estável em relação ao ano de 2021, com 1,9 milhão de hectares. O setor florestal no ano de 2023 contribuiu com R\$ 260 bilhões, ou seja, 1,3% de toda a riqueza gerada no país. (Ibá, 2023).

A grande representatividade do gênero *Eucalyptus* está relacionada ao seu rápido crescimento, boa adaptação ecológica, versatilidade e qualidade satisfatória da madeira. Além de seu uso tradicional, o aumento de consumo de seu produto madeireiro está relacionado a novas aplicações como a produção de bioenergia, materiais para construção civil e produtos químicos, constituindo um material renovável, biodegradável e com características mecânicas capaz de atender diversos segmentos (Besserer *et al.*, 2021). Além disso, as áreas ocupadas por silvicultura de eucalipto podem representar aumento no sequestro de carbono e redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), o que contribui para sustentabilidade da atividade e produção de serviços ecossistêmicos (Pereira-Silva *et al.*, 2021).

Embora os ecossistemas florestais capturem carbono independentemente do tipo de floresta, as florestas homogêneas de eucalipto apresentam alta previsibilidade dos resultados, devido principalmente ao sistema de manejo adotado que visa promover e controlar a produtividade do sistema (Cifuentes-Jara, 2008). Para que as florestas sejam altamente produtivas, é fundamental a seleção de clones que sejam adaptados para as condições edafoclimáticas locais e que possuam características satisfatórias de desenvolvimento e produtividade.

Atualmente, existem centenas de clones melhorados geneticamente disponível no mercado. Entre as espécies plantadas em regiões de clima subtropical, as espécies de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus camaldulensis* e os seus híbridos são os mais cultivados (Blinkey *et al.*, 2020). A seleção adequada desses genótipos de eucalipto para uma devida finalidade dependerá tanto da avaliação das características da madeira quanto das correlações existentes entre elas (Teixeira *et al.*, 2024). Somado as condições de solo, clima e genótipo, outros fatores também afetam no crescimento de um povoamento florestal, como a fertilização aplicada, proteção ao ataque de pragas e doenças e controle de plantas invasoras (Compo *et al.*, 2020).

A escolha do espaçamento inicial também influenciará diretamente no crescimento da floresta, pois a densidade do plantio afetará os recursos que estarão disponíveis individualmente para cada árvore. Além disso, o arranjo espacial adotado em um plantio de eucalipto permite sua organização geométrica de diferentes formas, o que possibilita combinações de espaçamentos (Stape *et al.*, 2022). Para um mesmo espaçamento inicial é possível estabelecer diferentes arranjos de plantio, ou seja, ocupar uma mesma área útil, entretanto com diferentes distâncias nas entrelinhas e entre plantas (Stape, 1995).

Devido ao apelo mundial para o armazenamento de carbono das atividades oriundas do setor agropecuário, busca-se cada vez mais a adoção de sistemas altamente sustentáveis e rentáveis, como a utilização de sistemas agrossilvipastoris, almejando o aumento na produtividade da área, redução dos

GEE, diversificação na produção e maior eficiência na utilização dos recursos (Bosi *et al.*, 2022). No entanto, poucos estudos foram realizados nesses arranjos espaciais para avaliar o crescimento inicial de clones de eucalipto. Além disso, o monitoramento das variáveis de crescimento das árvores é importante para gerar parâmetros que possam auxiliar os produtores a gerenciarem os seus sistemas de produção (Pezzopane *et al.*, 2021).

Estimativas de crescimento estão diretamente relacionadas à produtividade, pois permitem ao manejador tomar decisões sobre vários tipos de intervenções no povoamento. Entre as informações de relevância, a produtividade do povoamento florestal em termos volumétricos é uma das mais importantes para prognose do crescimento florestal. O acompanhamento do crescimento e produção pode ser realizado através de modelos matemáticos consagrados na literatura, porém existem desafios durante a seleção do melhor modelo a ser aplicado devido a não linearidade das variáveis envolvidas e as restrições impostas pelos parâmetros do próprio modelo (Campos; Leite, 2017). Diversos autores recomendam o uso de modelos de regressão na análise de delineamentos sistemáticos, tendo como variável dependente alguma medida de crescimento ou produção, e como variável independente a densidade de plantas (STAPE, 1995).

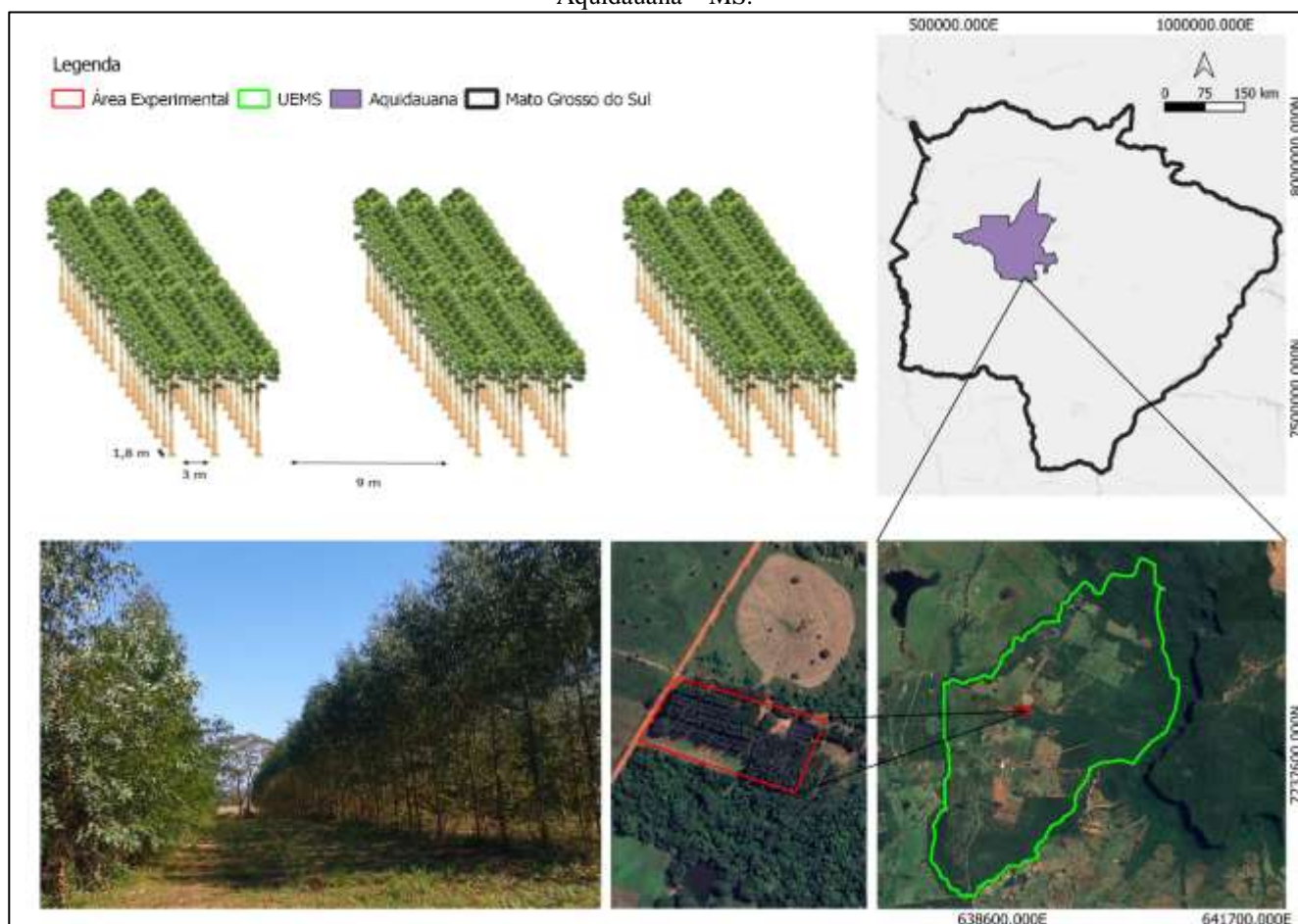
Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o crescimento dos clones I-144 e 1277 híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp., respectivamente, para plantas estabelecidas no arranjo espacial de 3,0 x 1,8 (linhas triplas) + 9 m. Os modelos matemáticos avaliados foram selecionados pelo *software* Curve Expert versão 1.4, considerando a idade como variável independente.

METODOLOGIA

Localização

O estudo está localizado na fazenda experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), situada no município de Aquidauana, Mato Grosso do Sul. O plantio do eucalipto na área experimental ocorreu em julho de 2013, abrangendo uma área 0,85 hectare (Figura 1). De acordo com a classificação de Köppen, o clima é “Aw”, descrito como clima tropical, com inverno seco. Apresenta estação chuvosa no período do verão entre os meses de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno de maio a outubro (sendo julho o mês mais seco). A temperatura média do ar do mês mais frio é superior a 18 °C. As precipitações pluviométricas são superiores a 750 mm anuais, atingindo 1.800 mm. A estação seca varia de 3 a 4 meses entre os meses de maio a setembro, onde os totais pluviométricos médios são inferiores a 50 mm. A temperatura média anual é de 23,3°C e a precipitação pluviométrica de 1.323 mm (Zaroni *et al.*, 2011).

Figura 1. Localização da área experimental situada na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, no município de Aquidauana – MS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Implantação do Experimento

A limpeza do terreno consistiu na eliminação da vegetação existente, sendo efetuada manualmente e com auxílio de trator de 100 cv. Optou-se pela retirada de vegetação de pequeno porte com lâmina KG e posterior derrubada das árvores de maior porte com a motosserra. O material lenhoso foi retirado manualmente com auxílio de uma carreta acoplada ao trator.

Na sequência, a área foi gradeada para controle de plantas daninhas em estágio inicial, sendo aplicado em seguida 11,76 L/ha de calcário líquido. Antes do preparo do solo, foi aplicado herbicida pós-emergente em área total, com dose de 3L/ha. O controle inicial de formigas cortadeiras ocorreu de forma localizada e sistemática antes do preparo do solo, utilizando isca granulada a base de sulfluramida. A dosagem para o controle localizado foi de 10 g de isca/m² de terra solta. Para o controle sistemático, foi adotada uma distância de caminhamento de 4 metros entre os trabalhadores, aplicando doses de 10 g de isca em distância de três metros. O controle de formigas cortadeiras foi estendido até a exploração final do povoamento e efetuado repasses localizados na medida em que foi observado novo corte nas plantas.

O solo preparo do solo constituiu de uma gradagem niveladora seguida de subsolagem em profundidade de 30-40 cm na linha de plantio, rompendo a camada endurecida abaixo da camada arável. O tratamento das mudas pré-plantio consistiu em monoamônio fosfato (MAP) com concentração de 1,5 % e, inseticida sistêmico a base de imidacloprido com 0,5% de concentração. As mudas foram distribuídas nas covas de forma manual com auxílio de plantadeiras, conhecidas por matraca. O plantio do experimento ocorreu em julho de 2013. Todo replantio realizado respeitou o prazo de 30 dias pós plantio.

A adubação de base foi realizada logo após o plantio, utilizado a formulação de NPK (06-30-06) com dose de 80 g/planta aplicada em duas covetas laterais a 20 cm de distância da muda. A primeira irrigação foi acrescentada de hidrogel, garantindo o maior tempo de umidade para as mudas e maximizando a taxa de sobrevivência no campo. Na sequência, foram realizadas quatro irrigações com média de quatro litros de água por cova, devido ao período de estiagem em que foram plantadas. O primeiro controle de plantas daninhas foi realizado 80 dias após o plantio com capina manual nas linhas e roçada mecanizada nas entrelinhas.

A primeira e segunda adubação de cobertura foram realizadas aos quatro e nove meses após o plantio com NPK (20-00-20), com dosagem de 80 g/planta aplicada à lanço em filetes intermitentes na projeção da copa. Aos 16 meses, realizou-se a terceira adubação de cobertura com a mesma formulação de NPK (20-00-20). As próximas adubações de cobertura foram realizadas manualmente aos 24 e 36 meses repetindo as dosagens anteriores.

O controle de vegetação invasora durante os meses subsequentes foi realizado nas entrelinhas e linhas de plantio, por meio de roçada mecanizada com roçadeira de arrasto e uso roçadeira costal. No segundo ano de plantio, herbicidas com glifosato como princípio ativo foram aplicados próximo à linha de plantio e capinas mecanizadas nas entrelinhas.

Aquisição de Dados

Os dados foram obtidos de um plantio com área de 0,85 ha, composto pelos híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (clone I-144) e *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp., (clones 1277). As plantas foram estabelecidas em arranjo espacial de 3,0 m x 1,8 m (linhas triplas) + 9 m, constituindo área útil média de 9 m² por planta e 1.111 árvores ha⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), incluindo dois tratamentos e três repetições. Para o tratamento T1, temos o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (clone I-144). O tratamento T2 foi constituído de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp (clone 1277). As parcelas nos dois tratamentos foram compostas por três linhas de 10 plantas, totalizando 30 árvores mensuradas por parcela.

O crescimento das plantas foi avaliado bimestralmente dos 6 aos 20 meses de idade. As medições de diâmetro com casca foram mensuradas a 1,30 m de altura (DAP), com auxílio de suta. Para altura total (Ht), os dados foram coletados através do clinômetro. O volume por planta (V_i) fora obtido por meio de equações volumétricas geradas a partir do modelo de *Schumacher e Hall*, representado pelo modelo $\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{LnDAP} + \beta_2 \text{LnHt} + e$. O volume por hectare (Vha) obtido a partir da equação:

$$Vha = \sum Vi \frac{n1}{n2} \quad (1)$$

onde:

Vha: volume em m³ por hectare;

V_i : volume individual em m³;

n1: número de árvores por hectare;

n2: número de árvores da parcela.

Os dados de DAP, Ht, V_i e V/ha foram analisados estatisticamente com auxílio do *software Assistat®*, versão beta 7.7, por meio da análise de variância (Teste F). Quando encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, a 5% de probabilidade, as médias foram discriminadas pelo teste de Tukey.

Para avaliar o efeito da idade nas variáveis dendrométricas, foram adotados modelos de regressão ajustados para as variáveis: Ht, DAP e volume com casca. A seleção e o ajuste dos modelos de crescimento foram realizados utilizando o *software Curve Expert 1.4*. Os modelos testados estão listados na Tabela 1. Os parâmetros para seleção dos melhores modelos de crescimento ocorreram por meio da avaliação do coeficiente de correlação (R^2), erro padrão da estimativa (Syx), erro padrão da estimativa em porcentagem Syx%, gráfico de resíduos e realismo biológico.

Tabela 1. Modelos de crescimento testados no software Curve Expert 1.4.

Modelos de Crescimento	
Chapman – Richards	$y = a / (1 + \exp^{(b-cx)})^{(1/d)}$
Função Racional	$y = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$
MMF	$y = (a \cdot b + c \cdot x^d) / (b + x^d)$
Relação Gompertz	$y = a \cdot \exp^{-\exp^{(b-cx)}}$
Logístico	$y = a / (1 + b \cdot \exp^{-cx})$
Gaussiano	$y = a \cdot \exp^{-((b-x)^2) / (2 \cdot c^2)}$
Weibull	$y = a - b \cdot \exp^{-c \cdot x^d}$
Logaritmo	$y = a + b \cdot \ln(x)$
Polinômio 4º grau	$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$
Quadrático	$y = a + bx + cx^2$
Hiperbólico	$y = a + b/x$
Linear	$y = a + bx$

Fonte: Autor, 2015

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 20 meses após o plantio não foi observada diferença significativa ($p>0,05$) entre os clones I-144 e 1277 para o crescimento em Ht, DAP, v planta⁻¹ (vi) e volume por hectare (v ha⁻¹) quando comparados pelo teste F (Tabela 2). Segundo Salekin *et al.* (2021), ajustes de modelos para crescimento inicial de eucalipto são menos explorados e fundamentais para descrever as respostas do povoamento ao preparo do solo e aos tratos silviculturais iniciais. Nesse sentido, a igualdade entre os clones em seu crescimento inicial pode ser um indicativo que no período de avaliação não houve restrição dos recursos de crescimento para as plantas e que os dois materiais genéticos apresentaram boa adaptação ecológica para a região.

Tabela 2. Diâmetro (DAP), altura total (Ht), volume por planta (Vi) e volume por hectare (V ha⁻¹) dos clones I-144 e 1277 de eucalipto aos 20 meses de idade, no arranjo espacial, 3,0 x 1,8 (linhas triplas) + 9 m em Aquidauana, MS.

Clones	DAP (cm)	Ht (m)	v planta ⁻¹ (m ³)	v hectare ⁻¹ (m ³)
Clone I-144	10.6433 a	13.7400 a	0,05803	60,3300 a
Clone 1277	10.3266 a	14.0500 a	0,05680	62,4567 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F ($p>0,05$).

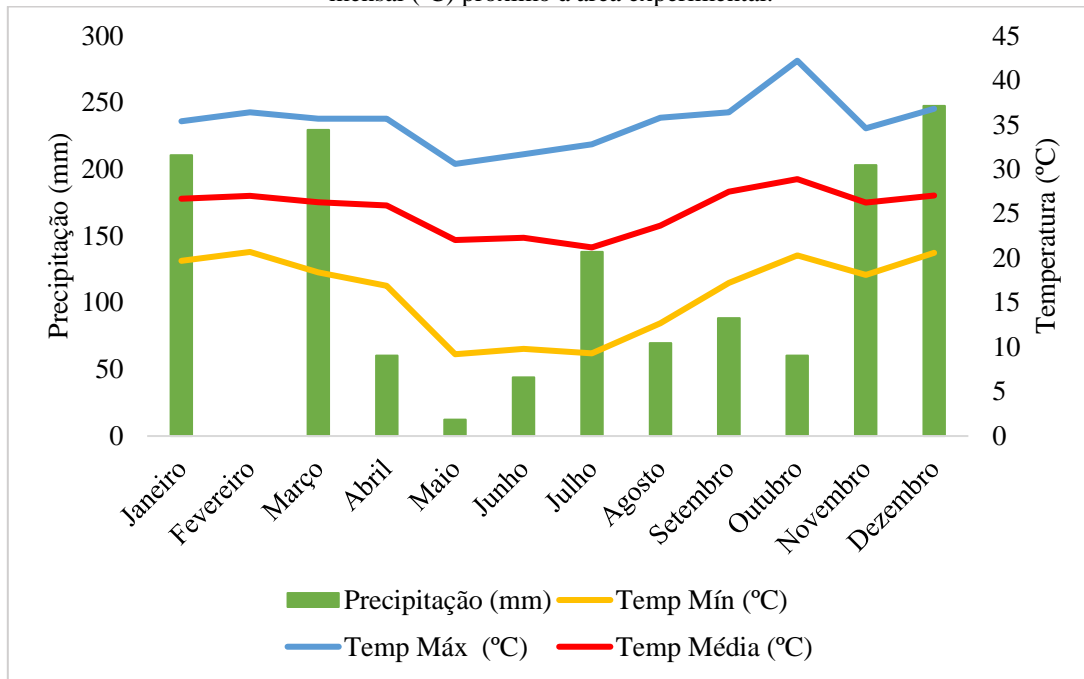
Fonte: Autor, 2015

Aos 20 meses de idade, o clone I-144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) apresentou incremento médio anual (IMA) de 36,20 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Segundo a ABRAF (2013), a produtividade média em função da área plantada de eucalipto em 2006 era de 39,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e em 2012 atingiu 40,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Em 2022, povoamentos de alto rendimentos apresentaram valores médios de 42 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (IBÁ, 2023).

O plantio de eucalipto ocorreu em julho de 2013. As avaliações de crescimento iniciaram bimestralmente aos 06 meses, a partir do mês de janeiro de 2014. Portanto, a Figura 02 representa os dados climáticos ocorridos durante o ano de 2014, a fim de compreendermos possíveis interações com o crescimento inicial do povoamento florestal.

No período de avaliação do experimento os dados de temperatura não apresentaram nenhum evento climático atípico, com baixas temperaturas nos meses de maio, junho e julho; e altas temperaturas nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro, que correspondem aos meses de maior precipitação acumulada.

Figura 2. Valores mensais referente ao ano de 2014 para precipitação acumulada (mm), temperatura mínima, média e mensal (°C) próximo à área experimental.



Estação Meteorológica da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana – MS.
 Fonte: Autor, 2014

Modelagem do Crescimento em Função da Idade

O ajuste no modelo consiste em obter os parâmetros que melhor demonstra o comportamento entre as variáveis dependente e independente. Na Tabela 3 estão apresentados os resultados dos três modelos matemáticos que obtiveram o maior grau de ajuste para as variáveis DAP, Ht, v planta⁻¹ e v hectare⁻¹ em função da idade. Resende e Alves (2020; 2022), classificam a acuraria preditiva acima de 0,90 como muito alta, o que demonstra resultados satisfatórios aos modelos ajustados.

Tabela 3. Ranking dos melhores modelos ajustados para a variável DAP correspondente aos clones I-144 e 1277 em Aquidauana – MS.

Clone I-144				Clone 1277			
DAP (cm)							
Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)	Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)
1. MMF	0,958	0,726	6,82	1. MMF	0,958	0,581	5,62
2. Polinomial	0,957	0,740	6,95	2. Weibull	0,958	0,583	5,64
3. Weibull	0,956	0,741	6,96	3. Quadrático	0,955	0,601	5,82
Ht (m)							
Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)	Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)
1. MMF	0,969	0,828	6,02	1. MMF	0,958	0,581	5,62
2. Weibull	0,969	0,832	6,05	2. Weibull	0,958	0,583	5,64
3. Quadrático	0,968	0,835	6,07	3. Quadrático	0,955	0,601	5,82
v planta ⁻¹ (m ³)							
Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)	Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)
1. Gompertz	0,947	0,0059	10,21	1. Gompertz	0,947	0,0059	10,21
2. Gaussiano	0,947	0,0059	10,21	2. Gaussiano	0,947	0,0059	10,21
3. Logístico	0,947	0,0059	10,26	3. Logístico	0,947	0,0059	10,26
v hectare ⁻¹ (m ³)							

Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)	Modelo	(R ²)	(Syx)	(Syx%)
1. Quadrático	0,993	2,536	4,20	1. Quadrático	0,994	2,246	3,59
2. Polinomial	0,989	3,052	5,05	2. Polinomial	0,991	2,726	4,36
3. MMF	0,987	3,110	5,15	3. MMF	0,990	2,777	4,44

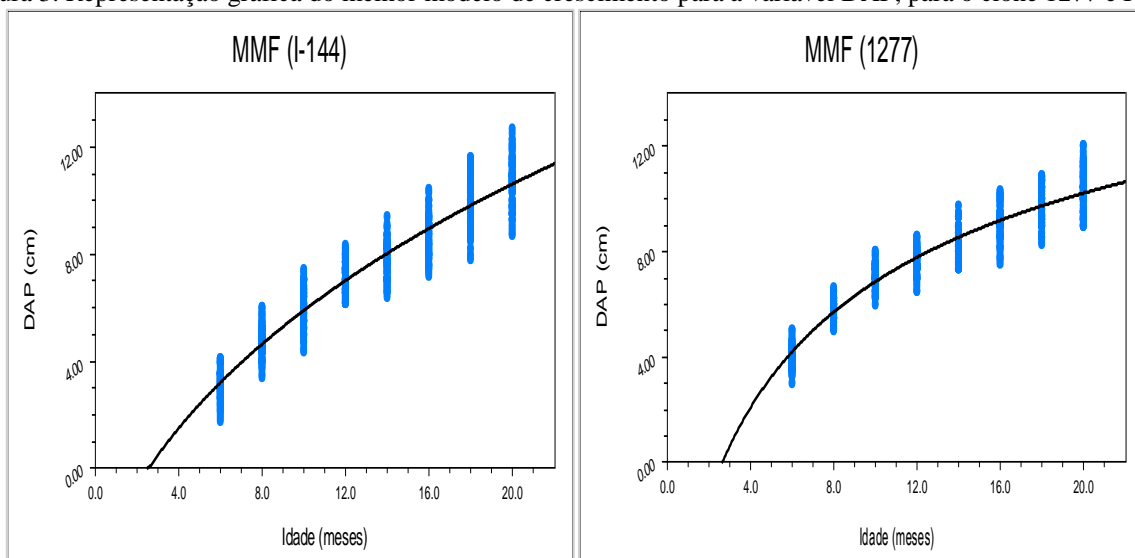
Onde: (R²) é o coeficiente de determinação e (Syx) é o erro padrão da estimativa.

Fonte: Autor, 2015

Para a variável DAP, o modelo MMF foi o melhor ajustado tanto para o clone I-144, com R² de 0,958 e Syx de 0,726; quanto para o clone 1277, apresentando R² de 0,958 e Syx de 0,581. Os modelos Weibull e Quadrático apresentaram valores de (R²), (Syx) semelhantes ao observado para o modelo MMF e Polinomial. O comportamento sigmoidal é bem comum no crescimento biológico em espécies Florestais (Borges, 2023) e o incremento em DAP representa esse comportamento nas Figuras 3 e 4.

A representação gráfica do melhor modelo ajustado e seu respectivo gráfico de resíduos para a variável DAP são apresentados nas Figuras 3 e 4. Aos 12 meses de idade, o clone 1277 apresentou uma subestimativa nos valores correlacionados. O inverso ocorreu para o clone I-144, com tendência a valores superestimados. Este comportamento representa algum fator atípico que influenciou no incremento de diâmetro quando a floresta completou 1 ano de idade. Observa-se que a regressão foi mais bem ajustada a partir dos 14 meses de idade, e, no crescimento inicial, os ajustes sofreram mais variações em sua distribuição.

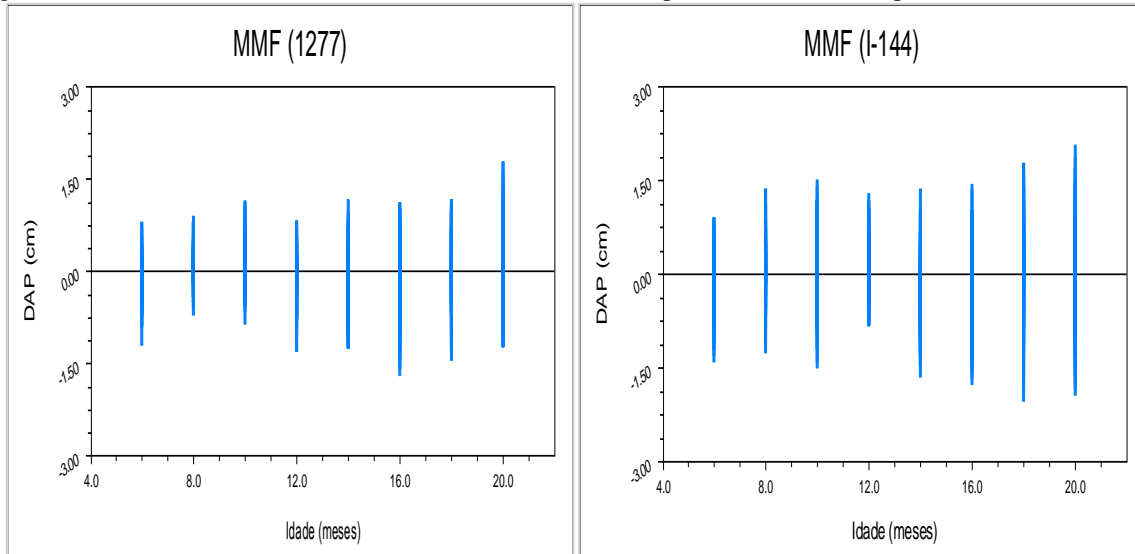
Figura 3. Representação gráfica do melhor modelo de crescimento para a variável DAP, para o clone 1277 e I-144.



Modelo MMF ajustado para DAP (cm) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

Figura 4. Gráfico de resíduos do melhor modelo de crescimento para a variável DAP, para o clone 1277 e I-144.



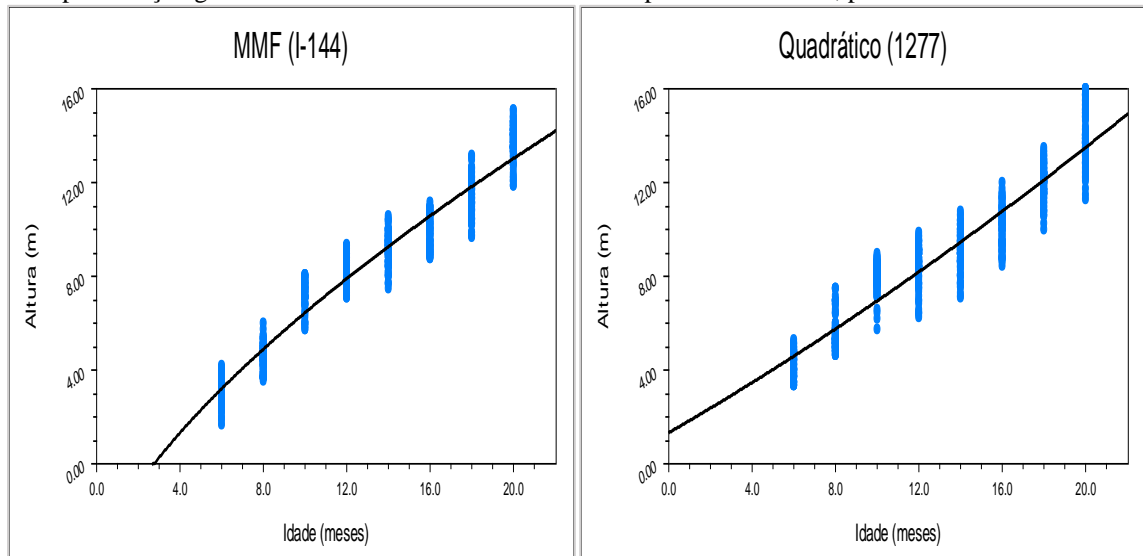
Análise gráfica de resíduos do modelo MMF ajustado para DAP (cm) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

Para a variável Ht, o erro padrão da estimativa (Syx) foi de 0,828 e o coeficiente de determinação (R^2) de 0,969 para o clone I-144, sendo este o tratamento com melhores valores estatísticos, selecionado o modelo MMF. No clone 1277, os valores de (R^2) e (Syx) foram iguais a de 0,950 e 0,954 respectivamente para o modelo quadrático (Tabela 3). Na Figura 5, observa-se a curva de crescimento de ambos os tratamentos. Os modelos testados para o clone I-144 apresentaram desempenho semelhante ao tratamento 1277. Nota-se que os modelos selecionados para ambos foram os mesmos, mudando apenas sua classificação no *ranking*.

De forma geral, os modelos sigmoidais apresentaram ajuste satisfatório para os tratamentos. Para análise gráfica dos modelos, o clone I-144 apresentou superestimativa aos 10, 12 e 20 meses de idade, enquanto o clone 1277 resultou em subestimativa para a idade de 14, 16 e 18 meses (Figura 6). Para a variável altura, não foi possível definir em qual idade apresentou o melhor ajuste. O crescimento em altura das árvores ocorre de forma dinâmica, onde as variações em seu crescimento estão diretamente relacionadas aos fatores ambientais, o que pode explicar as diferenças encontradas entre os modelos testados (Buford & Meckee, 1988).

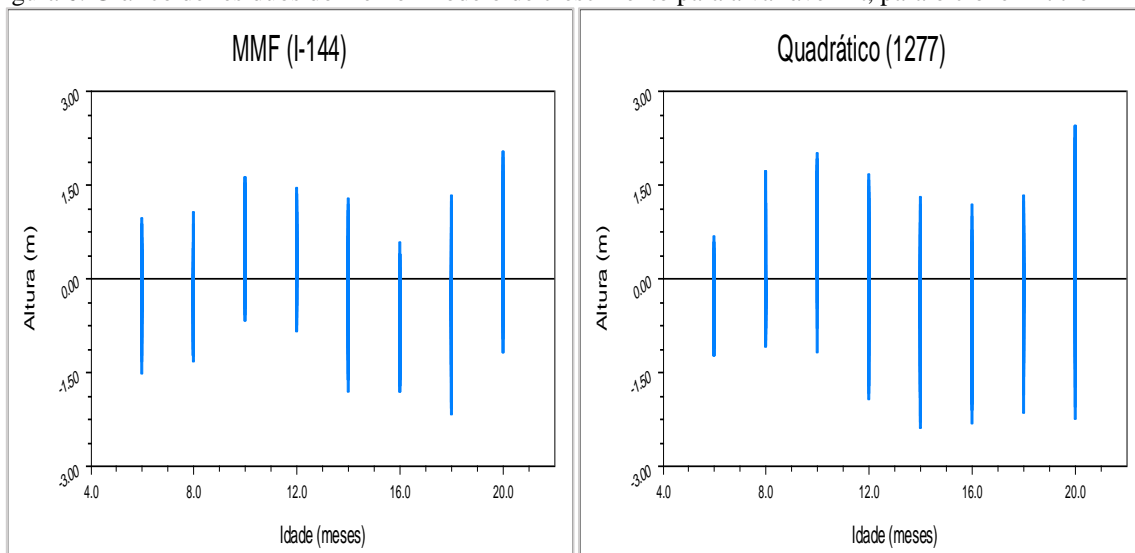
Figura 5. Representação gráfica do melhor modelo de crescimento para a variável Ht, para o clone 1277 e I-144.



Modelo MMF e Quadrático ajustado para Ht (m) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

Figura 6. Gráfico de resíduos do melhor modelo de crescimento para a variável Ht, para o clone 1277 e I-144.

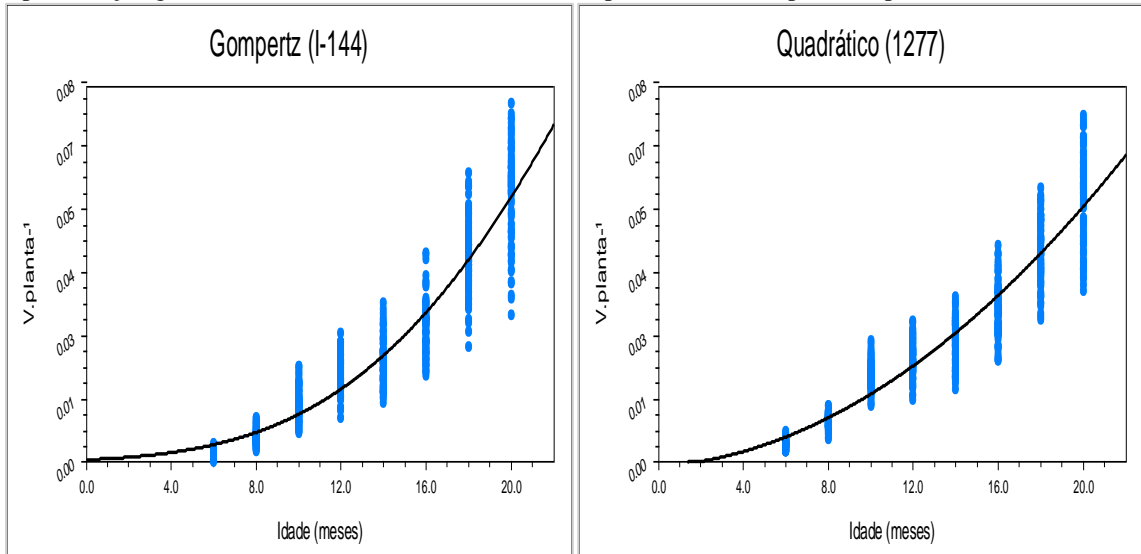


Análise gráfica de resíduos do modelo MMF e quadrático ajustado para Ht (m) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

Para a variável v planta⁻¹, os modelos presentes no *ranking* (Tabela 3) apresentaram resultados similares. Para o clone I-144, o modelo de maior grau de ajustamento foi a relação Gompertz com (R^2) 0,947 e (Syx) 0,0059. Para o clone 1277, o modelo quadrático apresentou melhor desempenho, sendo (R^2) e (Syx) de 0,946 e 0,0056 respectivamente. Observa-se na Figura 7 o ajuste dos modelos Gompertz e Quadrático para seus respectivos clones e, na Figura 8, a distribuição dos resíduos. Aos 16, 18 e 20 meses, os valores de volumes individuais apresentaram uma maior variação da média.

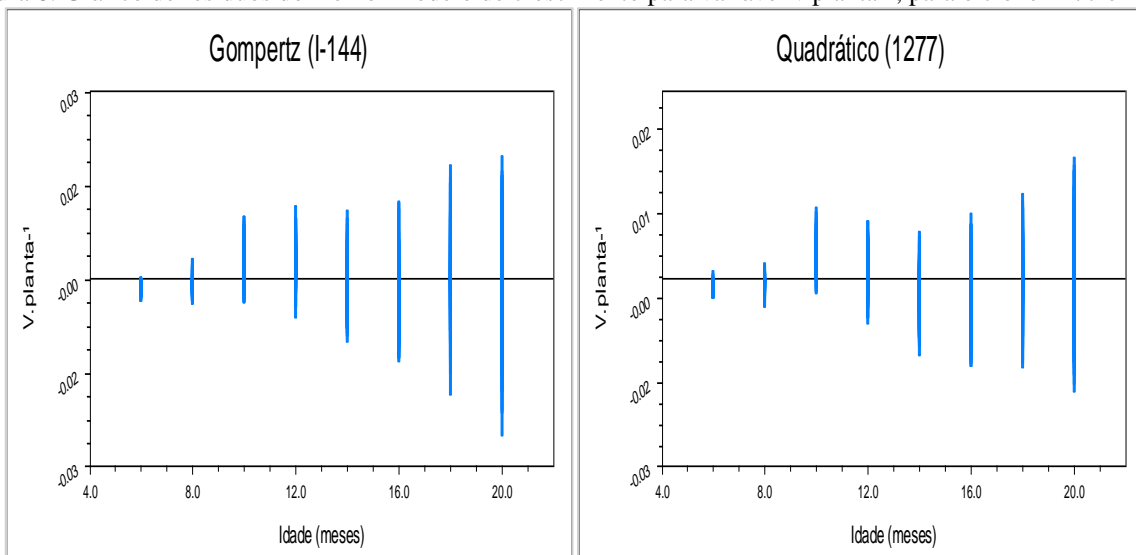
Figura 7. Representação gráfica do melhor modelo de crescimento para a variável v planta⁻¹, para o clone 1277 e I-144.



Modelo Gompertz e Quadrático ajustado para v planta⁻¹ (m³) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

Figura 8. Gráfico de resíduos do melhor modelo de crescimento para variável v planta⁻¹, para o clone 1277 e I-144.



Análise gráfica de resíduos do modelo Gompertz e Quadrático ajustado para V .planta⁻¹ (m³) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

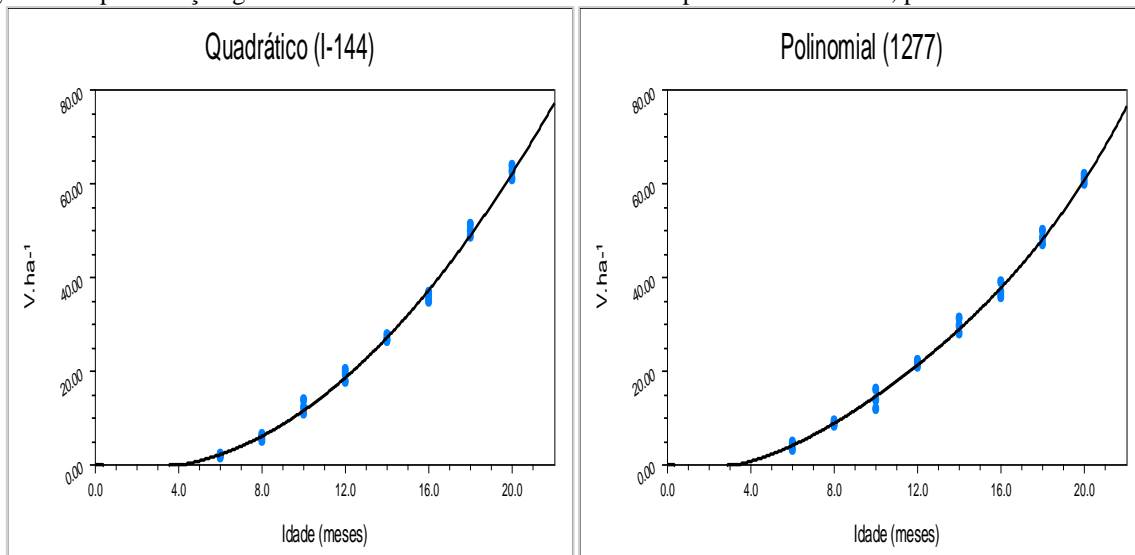
De forma geral, os modelos ajustados para o clone I-144 apresentaram maiores valores para o coeficiente de determinação e o clone 1277 menores valores de erro padrão. Para análise de resíduos (Figura 8), o clone I-144 e 1277 apresentaram subestimativa do volume individual para o sexto e oitavo mês, com superestimativa aos 10 meses. O gráfico de distribuição de resíduos apresentou comportamento semelhante a variável DAP (Figura 4). A partir dos 16 meses de idade, o povoamento apresentou melhor desempenho no ajuste dos modelos para os dois tratamentos.

Neto (2012) observou mesma tendenciosidade nos resíduos, subestimando ou superestimando os valores comparando modelos para clones de *Eucalyptus* spp. Outros autores explicam que este fenômeno

não deve acarretar a exclusão do modelo com potencial para seleção, pois na fase inicial de desenvolvimento as árvores são jovens e apresentam baixos valores para DAP, o que não seria contabilizado no inventário florestal dependendo do objetivo do manejo (Tomé et al., 2007).

Na modelagem de crescimento para variável v ha⁻¹, os modelos quadrático, polinomial e MMF apresentaram desempenho semelhante para os dois clones, ocupando o mesmo posicionamento no *ranking* (Tabela 3). O modelo quadrático foi o que apresentou os melhores valores estatísticos, sendo para o clone I-144 valores de (R^2) 0,993, (S_{yx}) 2,53, e para o clone 1277, o modelo polinomial com valores de (R^2) 0,994 e (S_{yx}) 2,2460. A Figura 9 representa o desempenho dos modelos em sua curva de crescimento e a Figura 10 seus respectivos gráficos para análises de resíduos.

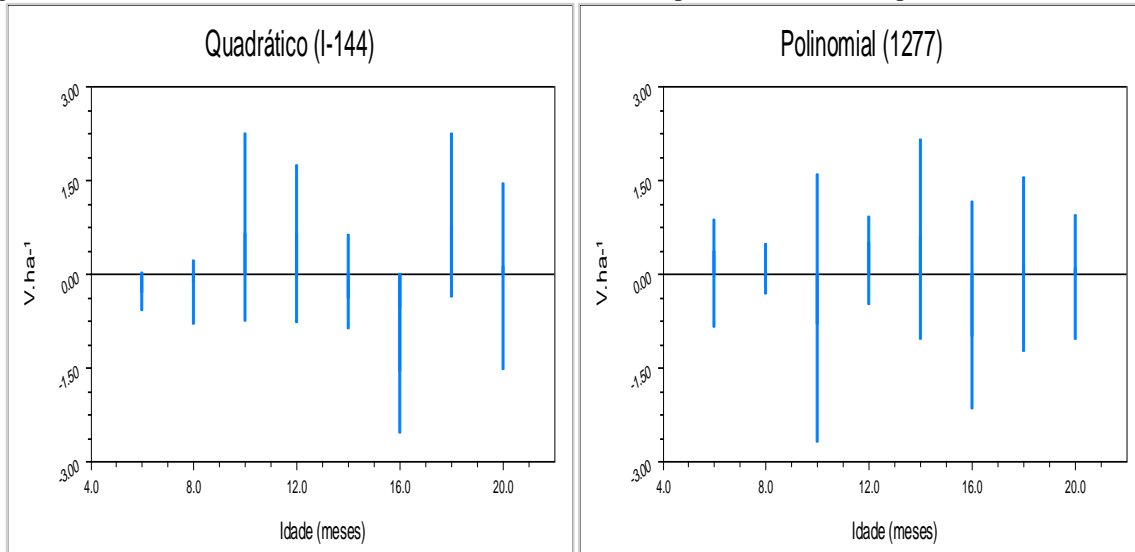
Figura 9. Representação gráfica do melhor modelo de crescimento para variável v ha⁻¹, para o clone 1277 e I-144.



Modelo Polinomial e Quadrático ajustado para V .ha⁻¹ (m³) em função da idade (meses).

Fonte: Autor, 2015

Embora o modelo quadrático tenha apresentado bom desempenho estatístico para o clone I-144, observa-se na Figura 10 uma alta variabilidade na distribuição dos resíduos. Aos 06 e 16 meses o modelo subestimou todos os valores ajustados, enquanto durante aos 08 e 18 meses, uma tendência a superestimativas. Esse comportamento reforça a importância da análise gráfica dos resíduos e não somente analisar os valores numéricos gerados, no entanto, os outros modelos avaliados também apresentaram comportamento semelhante na distribuição espacial dos resíduos.

Figura 10. Gráfico de resíduos do melhor modelo de crescimento para variável v ha^{-1} , para o clone 1277 e I-144.

Análise gráfica de resíduos do modelo Polinomial e Quadrático ajustado para $V.\text{ha}^{-1}$ (m^3) em função da idade (meses).
Fonte: Autor, 2015

Oliveira et al., (2009) em estudo da modelagem para clones de eucaliptos, avaliaram os modelos sigmoidais logístico, gompertz, quadrático e MMF, onde o modelo logístico foi o melhor ajustado para o povoamento. A avaliação dos ajustes dos modelos deve ser um processo contínuo, e em regiões de clima tropical, as novas avaliações devem ser realizadas a cada dois anos para eucalipto.

De maneira geral, os modelos matemáticos ajustados para todos os parâmetros apresentaram ajuste satisfatório. O DAP, Ht e os volumes apresentaram acréscimo de tamanho conforme o avanço da idade do povoamento. Este resultado é coerente do ponto de vista ecológico, uma vez que evidencia a hipótese lógica relativa à biologia do crescimento das árvores. De acordo com Causton e Venus (1981), as funções de Richards são capazes de estabelecer melhor a relação entre crescimento e idade. O modelo logístico também é considerado um modelo consistente pois apresenta significado biológico, em que o parâmetro beta é o valor médio máximo da variável resposta (Carvalho *et al.*, 2011) não apenas baseando-se em parâmetros de seleção meramente estatísticos. No entanto, para este estudo, nenhuma das variáveis avaliadas, o modelo logístico foi considerado satisfatório.

De acordo com Campos e Leite (2017), analisar a diferenciação dos modelos de crescimento e produção florestal é fundamental para encontramos pontos inerentes ao planejamento florestal. Aplicado ao crescimento inicial, é uma ferramenta importante para analisar o arranque inicial da floresta e definição dos tratamentos silviculturais.

CONCLUSÃO

A avaliação do crescimento até os 20 meses de idade demonstra não haver diferença de crescimento entre os clones I-144 e 1277, o que sugere a possibilidade de uso dos materiais genéticos indistintamente.

Os modelos testados para os clones I-144 e 1277 apresentam boa qualidade de ajuste para as variáveis DAP, Ht, v planta⁻¹ e v hectare⁻¹. De maneira geral, os modelos MMF e Weibull são recomendados para ajuste de DAP e Ht, enquanto o modelo Quadrático e Polinomial para a variável v hectare⁻¹.

A curva de crescimento de volume por hectare dos clones I-144 e 1277 apresenta comportamento típico ao comumente observado em florestas equiâneas. Desta forma, é possível verificar que o povoamento ainda não apresenta tendência de estabilização de crescimento.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul e ao Programa de Formação de Recursos Humanos PB 10 - PETRO-UEMS.

REFERÊNCIAS

- ABREU, E. C. R.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M.; KANEGAE, H. J. Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis*. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.61, p.86-102, jun, 2002.
- Associação Brasileira De Produtores De Florestas Plantadas**. Anuário estatístico, ano base 2012. ABRAF: Brasília, 2013.
- CAUSTON, D.R.; VENUS, J.C. **The biometry of plant growth**. London, Edward Arnold, 1981.
- BESSERER, Arnaud *et al.* Cascading recycling of wood waste: A review. **Polymers**, v. 13, n. 11, p. 1752, 2021.
- BINKLEY, Dan *et al.* Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117953, 2020.
- BOSI, Cristiam *et al.* APSIM model performance in simulating Piatã palisade grass growth and soil water in different positions of a silvopastoral system with eucalyptus. **Agricultural Systems**, v. 195, p. 103302, 2022.
- BUFORD, M. A; MCKEE, W. H. Relating site index of natural Loblolly Pine on the Lower Coastal Plain to some environmental factors. In: **BIENNIAL SOUTHERN SILVICULTURAL RESEARCH**

CONFERENCE, 6., Memphis, Tennessee, 1988. Proceedings ... Memphis, Tennessee, 1988. v.1, p.495-498.

BORGES, Marcus Vinicius Vieira. **Seleção de clones de eucalipto por meio da curva de crescimento: idade técnica de corte, idade de aceleração máxima e produtividade máxima.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Viçosa, 59 p. Viçosa – MG, 2023.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** 5.ed. Viçosa: UFV, 2017. 363p.

CIFUENTES-JARA, Miguel. **Aboveground biomass and ecosystem carbon pools in tropical secondary forests growing in six life zones of Costa Rica.** Oregon State University, 2008.

CAMPOE, Otávio C. et al. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118445, 2020.

CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N.; SILVA, F. F.; BORGES, L. A. C.; MENDONÇA, A. R.; LIMA, M. P. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de Eucalyptus clonal. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 541-548, out./dez. 2011

EISFELD, R; L.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; MAESTRI, R.; WEBER, K. S. Modelagem do crescimento e da produção de Pinus taeda l. por meio de função probabilística. **FLORESTA**, v. 35, n. 2. Curitiba – PR, 2005.

IBÁ – **Indústria Brasileira de Árvores.** Relatório anual, ano base de 2022. IBÁ: BRASÍLIA – DF, 2023.

NETO, T. P. P. **Comparação de modelos lineares e não lineares em relações hipsométricas para clones de Eucalyptus spp., no pólo gesseiro do Araripe-PE.**2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2012.

PEREIRA-SILVA, Erico FL et al. Carbon ecosystem services and cellulose income from natural and commercial forests in the Brazilian savanna. **Forest Ecology and Management**, v. 499, p. 119582, 2021.

PEZZOPANE, José Ricardo Macedo et al. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021.

RESENDE, M.D.V.; ALVES, R.S. Linear, generalized, hierarchical, bayesian and random regression mixed models in genetics/genomics in plant breeding. **Functional Plant Breeding Journal**, v.3, n.2, 2020.

RESENDE, M.D.V.; ALVES, R.S. Statistical significance, selection accuracy, and experimental precision in plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.22, n.3, 2022.

SALEKIN, Serajis et al. Hybrid height growth and survival model for juvenile Eucalyptus globoidea (Blakely) and E. bosistoana (F. Muell) in New Zealand. **Forest Ecology and Management**, v. 490, p. 119074, 2021.

STAPPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais**. 1995. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz." Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

STAPE, Jose Luiz; SILVA, C. R.; BINKLEY, Dan. Spacing and geometric layout effects on the productivity of clonal Eucalyptus plantations. **Trees, Forests and People**, v. 8, p. 100235, 2022.

TEIXEIRA, Vinícius et al. Selection of eucalyptus genotypes for charcoal production based on using multivariate analysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 179, p. 106444, 2024.

TOMÉ, M.; RIBEIRO, F.; FAIA, S. Relação Hipsométrica geral para Eucalyptus globulus Labill. em Portugal. **Silva Lusitana**, v.15, n.1, p. 41-55, 2007.

ZARONI, M. J.; AMARAL, F. C. S.; SILVA, E. F.; COELHO, M. R.; JÚNIOR, W. C.; BEHRING, S. B.; CHAGAS, C. S.; PEREIRA, N. R.; GONÇALVES, A. O.; DART, R. O.; AGILIO, M.; L.; D.; LOPES, C. H. L.; TAKAGI, J. S.; EARP, C. G. S. Zoneamento Agroecológico do município de Aquidauana – MS. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. **EMBRAPA**. Rio de Janeiro-RJ, 2011. 63 p. (Documento 185).