

# MODELAGEM DO CRESCIMENTO VOLUMÉTRICO DE CLONES DE EUCALIPTO (*EUCALYPTUS UROPHYLLA*) NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE-PE

JOSÉ ANTÔNIO ALEIXO DA SILVA<sup>1,2,3</sup>  
KLEYBIANA DANTAS DA ROCHA<sup>4</sup>  
RINALDO LUIZ CARACIOLO FERREIRA<sup>5</sup>  
JOSÉ ALVES TAVARES<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, PhD em Biometria e Manejo Florestal, Professor Titular, Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco.

<sup>2</sup> Academia Brasileira de Ciência Agronômica

<sup>3</sup> Academia Pernambucana de Ciência Agronômica

<sup>4</sup> Engenheira Florestal, Dra. em Manejo Florestal, Brencorp Consultoria em Meio Ambiente Ltda.

<sup>5</sup> Engenheiro Florestal, Dr. em Manejo Florestal, Professor Titular, Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco.

<sup>6</sup> Engenheiro Agrônomo, Pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA.

---

**Resumo:** O objetivo desta pesquisa foi o de ajustar modelos de crescimento volumétrico de clones de *Eucalyptus urophylla* no Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco, onde a principal fonte energética da indústria do gesso é a lenha proveniente da Caatinga. Como a demanda por lenha é superior à oferta, a introdução de clones de eucaliptos na região é uma opção viável para atender essa demanda e atenuar a devastação da Caatinga. Desta forma, o conhecimento dos padrões de crescimento desses clones é de fundamental importância para execução de planos de manejo florestal sustentável. O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA), em Araripina. O delineamento experimental utilizado foi o multivariado de medidas repetidas, em que foram analisados 15 clones (híbridos de eucaliptos) no espaçamento 3m x 2m com quatro repetições. Para este trabalho foram selecionados os dois clones que obtiveram melhores resultados volumétricos na primeira rotação. Foram mensuradas as circunferências a altura do peito (CAP) e as alturas totais (Ht) dos clones, a partir de 12 meses até os 90 meses, totalizando 14 medidas ao longo do tempo. Os modelos utilizados foram: Mitscherlich, Brody, Bertalanffy, Chapman-Richards, Weibull, Clutter e Jones e Silva-Bailey. Para a escolha do melhor modelo foi utilizado o índice de ajuste corrigido  $IA_c$ , o erro padrão da estimativa  $S_{yx}$  e a distribuição gráfica dos resíduos. Os modelos em geral obtiveram bons ajustes para os dois clones, especialmente Chapman-Richards com exceção do Weibull que obteve o menor  $IA_c$  e maior  $S_{yx}$ .

**Termos para indexação:** modelos de crescimento, volume, Caatinga.

## MODELLING THE VOLUMETRIC GROWTH OF THE *EUCALYPTUS UROPHYLLA* CLONES IN THE GYPSUM POLE OF ARARIPE-PE

**Abstract:** The objective of this research was to adjust volumetric growth models for *Eucalyptus urophylla* clones in the Gypsum Pole of Araripe, Pernambuco, where the main energy source of plaster industries is the wood from the Caatinga. As the demand for firewood is higher than the Caatinga growth, the introduction of eucalyptus clones in the region is an available option to supply that demand, and mitigate the devastation of the Caatinga. Thus, the knowledge of the growth patterns of these clones is fundamental to implement sustainable forest management plans. The experiment was conducted at the Experimental Station of the Agronomic Institute of Pernambuco (IPA) in Araripina. The experimental design was the multivariate repeated measures, with 15 clones (eucalyptus hybrid) spaced 3m x 2m with four replications. For this work it was selected in the first rotation two clones of eucalyptus with higher volumetric results. From 12 months until 90 months, totaling 14 measures along the time were measured circumferences at breast height (CBH) and total heights (H) of the clones. The adjusted models were: Mitscherlich, Brody, Bertalanffy, Chapman-Richards, Weibull, Clutter and Jones and Silva-Bailey. To select the best model the fit index corrected in percent ( $IA_c\%$ ), the standard error of estimate ( $s_{yx}$ ) and graphical distribution of residuals were considered. The models in general achieved good fits for the two clones, especially the Chapman-Richards, with the exception of the Weibull that had the lowest  $IA_c\%$  and highest  $s_{yx}$ .

**Index terms:** models of growth, volume, Caatinga.

## 1. INTRODUÇÃO

O Polo Gesseiro do Araripe, localizado no extremo Oeste do estado de Pernambuco é responsável por aproximadamente 97% da produção de gesso do país. Sua matriz energética é baseada principalmente no uso da lenha proveniente do bioma Caatinga. Entretanto, o ritmo de crescimento dessa vegetação não é suficiente para suprir a demanda da indústria do gesso, considerando que a produção de lenha nos diversos planos de manejo florestal em execução na região não correspondem a 5% das necessidades da indústria do gesso

A lenha proveniente da Caatinga é a fonte energética de mais baixo custo na produção de gesso e a sua retirada ocorre em grande parte de forma ilegal, aumentando diretamente com o crescimento da indústria do gesso

e conseqüentemente causando danos ambientais. Caso não sejam tomadas medidas de redução do desmatamento áreas sujeitas a savanização tendem a aumentar de forma incontrolada.

Uma opção para suprir a demanda energética da indústria do gesso é a introdução de florestas energéticas de rápido crescimento, que apresentam a grande vantagem de atenuar a degradação da Caatinga pela oferta de madeira em curto espaço de tempo. Dentre os gêneros que constituem essas florestas, os eucaliptos se destacam por suas propriedades de várias aplicabilidades e por serem adaptáveis a diferentes condições ambientais e, principalmente, pelo fornecimento de madeira para ser usada como fonte energética (SILVA, 2016).

Mesmo ainda em processo experimental na região do Polo Gesseiro do Araripe, os eucaliptos tem se mostrado promissores como uma das opções mais viáveis para suprir a demanda energética da indústria do gesso, principalmente por apresentarem rendimentos volumétricos bem superiores aos da vegetação nativa, em que um hectare plantado com eucaliptos equivale a aproximadamente seis hectares de vegetação nativa, bem como bom poder calorífico na calcinação da gipsita que é a matéria prima do gesso com os menores custos de rendimento por tonelada de gesso produzida (SILVA, 2008/2009; ROCHA, 2012; GADELHA et al., 2012; SILVA et al., 2013; LUNDGREN; SILVA; FERREIRA, 2015)

Entre as informações de relevância para o manejo florestal, a produtividade do povoamento florestal em termos volumétricos é uma das mais importantes. Estimativas de crescimento estão diretamente relacionadas à produtividade, pois permitem ao manejador tomar decisões sobre vários tipos de intervenções inerentes ao manejo florestal sustentado. Essas estimativas são provenientes dos ajustes de modelos matemáticos e biológicos.

Segundo Prodan (1968) a primeira tentativa de se empregar um modelo matemático para estimar o crescimento florestal foi feita por Spath em 1797.

O modelo de crescimento é uma abstração da dinâmica natural da floresta e pode abranger crescimento, mortalidade e outras mudanças na composição e estrutura do povoamento florestal (MENDES et al. 2006).

De acordo com Hess e Schneider (2010), o crescimento é afetado pelo estágio de desenvolvimento de um povoamento que está sempre condicionado

à idade, qualidade do sítio, espécie, densidade e à unidade de medição em que é expresso.

Os inventários florestais fornecem informações, em um instante no tempo, sobre volume e estatísticas relacionadas. Por serem sistemas biológicos dinâmicos, as florestas estão continuamente mudando, portanto, os modelos de crescimento e produção, são necessários para projetar essas mudanças e obter informações para o manejo florestal. Essa dinâmica é ainda maior no caso de povoamentos de clones de eucaliptos, em que a cada ano novos clones são lançados em escala comercial, enquanto outros são excluídos (OLIVEIRA et al. 2009).

Existem modelos com estruturas lineares e não lineares, sendo que os não lineares, geralmente se ajustam melhor aos dados de fenômenos biológicos.

Muitos modelos biológicos não lineares são utilizados ao invés de modelos matemáticos para a prognose do crescimento florestal. Isto está relacionado, principalmente, ao fato dos modelos biológicos apresentarem uma hipótese biológica associada como causa ou função do fenômeno descrito pela variável resposta. Já os modelos matemáticos, entre eles os polinomiais, não devem ser considerados para modelar o crescimento e produção porque são desprovidos de qualquer interpretação biológica e não têm parâmetros significativos do ponto de vista florestal (LEI; ZHANG, 2004).

Estudos de crescimento e produção de um povoamento florestal tratam do desenvolvimento de mecanismos de predição das características quantitativas em condições específicas, principalmente, visando a alcançar o manejo florestal sustentado.

Na literatura, são propostos vários modelos não lineares para descrever curvas de crescimento tais como: Mitscherlich, Brody, Bertalanffy, Logístico, Gompertz, Weibull, Chapman-Richards, Silva-Bailey, entre outros (SILVA, 1986; SCHNEIDER; SCHNEIDER; SOUZA, 2009; BARROS, 2010; SALES et al., 2015).

Diversos estudos têm sido realizados no Brasil utilizando modelos de crescimento e produção corrigidos para plantações de eucaliptos (COUTO; BASTOS, 1986; MAESTRI; SANQUETA; ARCE, 2003; RESENDE et al., 2004; MENDES et al., 2006; GORGENS et al., 2007; SILVA, 2008/2009; BAESSO; RIBEIRO; SILVA, 2010; CARVALHO, 2010; LIMA FILHO et al., 2012; GADELHA et al., 2015).

Recentemente, os ajustes dos modelos de crescimento são realizados com a utilização de métodos cada vez mais avançados, diante da facilidade encontrada ao acesso de computadores de alto desempenho e de *softwares* especializados nessas análises. Entre esses procedimentos estão os modelos não lineares, mistos, lineares e não lineares generalizados, simétricos, geoestatística e redes neurais artificiais.

Os modelos não lineares quando podem ser linearizados por alguma transformação aritmética ou logarítmica, são denominados de não lineares intrinsecamente lineares e têm sido usados há várias décadas, destacando-se entre eles o de Schumacher e Hall (1933) em sua forma logarítmica. Já os não lineares intrinsecamente não lineares geralmente são ajustados por algoritmos de análise numérica, que são processos iterativos e são frequentemente usados em modelagem florestal (MENDES et al., 2006; SALES, 2015).

Os modelos lineares e não lineares generalizados correspondem a generalizações flexíveis da regressão de mínimos quadrados ordinários, relacionando a distribuição da variável dependente aleatória com o seu preditor não aleatório por meio de uma função de ligação que faz a conexão entre a média das observações e a parte sistemática (CARVALHO et al., 2011; HESS et al., 2015).

Nos ajustes de modelos usando técnicas de regressão, um dos requisitos básicos é que a distribuição dos erros seja normal. Quando isto não ocorre as estimativas dos parâmetros do modelo se mostram sensíveis a observações extremas, mesmo não sendo outliers.

Um problema comum na modelagem volumétrica se refere a violação do princípio de independência entre as observações e a homogeneidade de variâncias. De acordo com Gouveia (2015), os modelos mistos se apresentam como alternativa para considerar dados correlacionados e modelar a estrutura de covariância dos modelos. São técnicas mais sofisticadas que análise de regressão e foram introduzidas no meio florestal por Lappi (1991).

Os modelos simétricos, entretanto não ficam na dependência da distribuição normal dos erros e se apresentam como uma alternativa a suposição de erros com distribuição normal. Alternativas à suposição de erros normais têm sido proposta na literatura. A fim de tentar reduzir a influência dessas observações extremas nas estimativas dos parâmetros, uma das alternativas é assumir para os erros distribuições mais robustas (caudas

mais pesadas) do que a distribuição normal (CYSNEIROS; PAULA, 2005; LIMA FILHO et al., 2012).

Outra abordagem recente para modelagem florestal é a Geoestatística que usa procedimentos estatísticos que levam em consideração a distribuição espacial das árvores. Neste procedimento são utilizadas duas técnicas: krigagem que considera que a variável resposta depende só dela e da distância entre duas medições, e a cokrigagem que além da variável resposta utiliza outra variável preditora fortemente correlacionada com a variável dependente, bem como a distância entre as medições (LUNDGREN; SILVA; FERREIRA, 2015).

Recentemente está sendo bastante empregada na modelagem florestal as redes neurais artificiais (RNA) que são sistemas computacionais paralelos, constituídos por neurônios artificiais (unidades de processamento simples) interconectados para executar um determinado procedimento (BINOTI, 2010). Esses neurônios artificiais processam as informações recebidas (dados) ponderadas por pesos simpáticos (BINOTI, 2012). Apresentam a vantagem de considerarem em um mesmo modelo variáveis indicadoras do tipo: índice de sítio, espécies, regimes silviculturais, etc. Ao contrário dos outros procedimentos, as RNAs não mostram a equação resultante e toda vez que se desejar fazer novas estimativas existe a necessidade do uso de computadores no chamado treinamento da rede.

Neste trabalho foram considerados ajustes de modelos tradicionais usados em modelagem volumétrica por meio de análise de regressão de modelos não lineares intrinsecamente não lineares.

Mesmo com o avanço nos estudos de crescimento e produção para plantios comerciais de eucalipto, percebe-se a necessidade de novos estudos, para que seja aprimorada a modelagem do crescimento e produção florestal, proporcionando aos manejadores informações precisas a respeito da época correta de colheita, intervenções a serem tomadas no povoamento, adequação de espécies, e ou procedência em determinadas localidades (DEMOLINARI; SOARES; LEITE, 2007). Entretanto, equações de crescimento não devem ser extrapoladas para outras regiões, pois o ideal é o ajuste de modelos aos dados do local em que se vai realizar a previsão do crescimento.

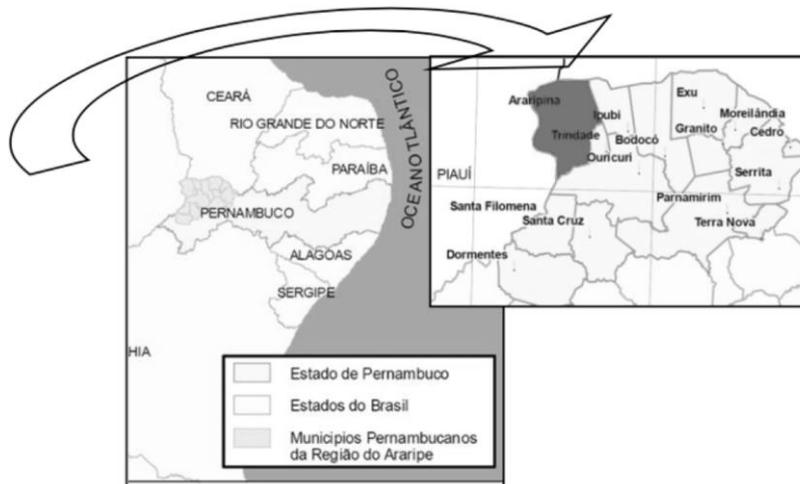
O objetivo deste estudo foi o de ajustar diferentes modelos de crescimento volumétrico tradicionais para dois clones de *Eucalyptus urophylla* na Região do Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O experimento foi desenvolvido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco em Araripina, na Chapada do Araripe, extremo Oeste de Pernambuco (Figura 1).

Figura 1. Localização da Região do Araripe com detalhe no município de Araripina, onde foi realizado o experimento (ROCHA, 2012).



O clima da região é classificado DdB' 4a' semiárido mesotérmico. A precipitação média anual é de aproximadamente 700 mm, concentrando-se entre os meses de dezembro a março, com um pequeno excesso em abril. O solo é do tipo Latossolo vermelho-amarelo (ENCARNAÇÃO, 1980; ARAUJO, 2004). Nos últimos anos, a partir de 2009, precipitação média anual tem apresentado comportamento muito irregular, alterando em piques de máxima e mínima, certamente em função das mudanças climáticas.

O experimento foi implantado em março de 2002. O espaçamento usado foi de 3 m x 2 m, e a forma utilizada de cada parcela foi de 14 m x 21 m com área de 294 m<sup>2</sup>. O total de plantas por parcela foi de 49, sendo a área útil composta por 25 plantas com 150 m<sup>2</sup> de área.

As mudas dos clones foram provenientes da Comercial Agrícola Paineiras LTDA, localizada em Urbano Santos, Maranhão. Foram utilizados 15 clones (híbridos de eucaliptos) com quatro repetições. Porém neste trabalho foram

selecionados os clones com a maior produtividade volumétrica no caso os clones C39 e C41, ambos *Eucalyptus urophylla* (cruzamento natural) (GADELHA et al., 2012).

As medições foram realizadas a cada seis meses a partir do plantio, tendo ao final do experimento as medidas aos 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90 meses. Em cada medição foram registradas a altura total (Ht) e a circunferência a altura do peito (CAP) de todas as plantas úteis de cada parcela. Aos 90 meses, as árvores foram cubadas rigorosamente em que a altura total de cada árvore foi medida com trena e o volume individual foi obtido por meio da somatória de secções, segundo fórmula de Smalian.

$$V_t = \sum_{i=1}^n v_i$$

$$v_i = \frac{1}{2} (g_b + g_s) l$$

Em que:

$v_i$  = volume da secção em m<sup>3</sup>;

$v_t$  = volume total da secção;

$l$  = altura ou comprimento da secção em m;

$g_b$  = área transversal da base da secção em m<sup>2</sup>;

$g_s$  = área transversal do topo da secção em m<sup>2</sup>.

Os volumes das idades de 12 a 84 meses foram calculados utilizando o fator de forma médio para cada clone, provenientes de amostras de árvores que foram cubadas ao longo do tempo, em que:

$$f = \text{Vol real} / \text{Vol cilindro}$$

Depois de calcular o fator de forma médio para cada clone, o cálculo do volume foi feito multiplicando o fator de forma pelo produto da área transversal ( $g$ ) e pela altura total da árvore.

## 2.2. Modelos de crescimento

Os ajustes dos modelos foram feitos com os valores médios de cada idade para cada clone. Os modelos empregados para o ajuste das equações na modelagem do crescimento dos clones C39 e C41 estão descritos a seguir. Para todos eles se considerou o método das diferenças de equações (CLUTTER, 1963).

Mitscherlich	$V_f = V_i - \beta_0 \cdot [\kappa^{t_f} - \kappa^{t_i}] + \varepsilon_i$
Brody	$V_f = V_i - \beta_0 \cdot (e^{\kappa \cdot t_f} - e^{\kappa \cdot t_i}) + \varepsilon_i$
Bertalanffy	$V_f = V_i \left( \frac{1 - e^{\kappa \cdot t_f}}{1 - e^{\kappa \cdot t_i}} \right)^3 + \varepsilon_i$
Chapman-Richards	$V_f = V_i \left( \frac{1 - e^{\kappa \cdot t_f}}{1 - e^{\kappa \cdot t_i}} \right)^{\beta_0} + \varepsilon_i$
Weibull	$V_f = V_i - \beta_0 \cdot (e^{-\kappa \cdot t_f^{\beta_1}} - e^{-\kappa \cdot t_i^{\beta_1}}) + \varepsilon_i$
Clutter e Jones	$V_f = \left[ V_i^{\beta_0} + \beta_1 (t_f^\kappa - t_i^\kappa) \right]^{\frac{1}{\beta_0}} + \varepsilon_i$
Silva – Bailey	$V_f = V_i \cdot e^{\beta_0 (\kappa \cdot t_f^\kappa - \kappa \cdot t_i^\kappa)} + \varepsilon_i$

Em que:

$V_f$  = volume final;

$V_i$  = volume inicial;

$\kappa$ ,  $\beta_0$  e  $\beta_1$  = parâmetros dos modelos;

$t_f$  = tempo final;

$t_i$  = tempo inicial;

$\varepsilon_i$  = erro aleatório.

Utilizaram-se para os ajustes dos modelos o procedimento NONLINEAR do Programa Computacional SYSTAT 05 for Windows (Demo) sendo utilizado o método Simplex para calcular as estimativas dos parâmetros.

A seleção das melhores equações resultantes dos modelos testados foi feita levando em consideração o Índice de Ajuste corrigido (SCHLAEGEL, 1981), a distribuição gráfica dos resíduos e o erro padrão da estimativa.

O cálculo do índice de ajuste corrigido em percentual foi obtido a partir da fórmula a seguir:

$$\text{IA}_c \% = 1 - (1 - \text{IA}) \left[ \frac{(n-1)}{(n-p)} \right]$$

$\text{IA}_c \%$  = índice de ajuste corrigido;

IA = índice de ajuste;  
 n = tamanho da amostra;  
 p = número de parâmetros do modelo.

A análise gráfica dos resíduos, apesar de ser uma representação visual, possibilita a verificação do ajuste do modelo a partir da distribuição dos dados observados e estimados (MENON, 2005). O cálculo da análise da distribuição gráfica residual em porcentagem é expresso por:

$$E_i \% = \left( \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right) 100$$

Em que:

$E_i$  = resíduo da i-ésima observação;

$Y_i$  = volume real da árvore em m<sup>3</sup>;

$\hat{Y}_i$  = volume estimado da árvore em m<sup>3</sup>.

O erro-padrão da estimativa em percentual foi obtido pela expressão conforme descrito por Schneider et al. (2009):

$$s_{yx} \% = \left( \frac{\sqrt{QMR}}{\bar{Y}} \right) 100$$

Em que:

$s_{yx}$  (%) = erro padrão da estimativa;

QMR = quadrado médio do resíduo do modelo ajustado;

$\bar{Y}$  = média aritmética da variável dependente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, encontram-se os valores das estimativas dos parâmetros dos modelos testados, os índices de ajustes corrigidos e os erros padrões das estimativas, obtidos a partir da modelagem do crescimento em volume do clone C39.

No geral, os modelos testados apresentaram bons ajustes, porém a equação resultante do modelo de Weibull apresentou o menor IA<sub>c</sub>% com 94,1% e maior erro padrão da estimativa, resultado diferente do registrado

por Sanquetta et al. (2010) ajustando o crescimento em diâmetro de *Nectandra grandiflora* no qual o modelo de Weibull apresentou o melhor ajuste aos dados.

Tabela 1. — Estimativas dos parâmetros, índices de ajustes corrigidos  $IA_c\%$  e os erros padrões das estimativas  $s_{yx}$  dos modelos testados para o clone C39 no experimento do Polo Gesseiro do Araripe.

Equações	Coeficientes e estatísticas				
	k	$b_0$	$b_1$	$IA_c\%$	$s_{yx}\%$
Mitscherlich	0,999	0,107	-	98,5	7,48
Brody	-3E-07	1674924,000	-	98,5	7,39
Bertalanffy	0,916	-	-	98,9	6,15
Chapman-Richards	0,212	1,020	-	99,1	5,80
Weibull	0,110	0,118	1,3E-07	94,1	14,71
Clutter e Jones	3,265	0,015	1,989	99,0	5,58
Silva-Bailey	6,727	0,933	-	98,7	6,64

A equação resultante do modelo de Brody, apesar do alto valor do  $IA_c\%$  (98,5) apresentou um valor de difícil interpretação biológica ( $b_0$ ) nas estimativas do parâmetro do modelo.

As equações resultantes dos modelos de Chapman-Richards, Clutter e Jones e Bertalanffy obtiveram os melhores ajustes com 99,1 e 99,0 e 98,9 %, valores semelhantes tanto para o  $IA_c\%$  como para o erro padrão da estimativa com 5,80 e 5,58 e 6,15%, respectivamente.

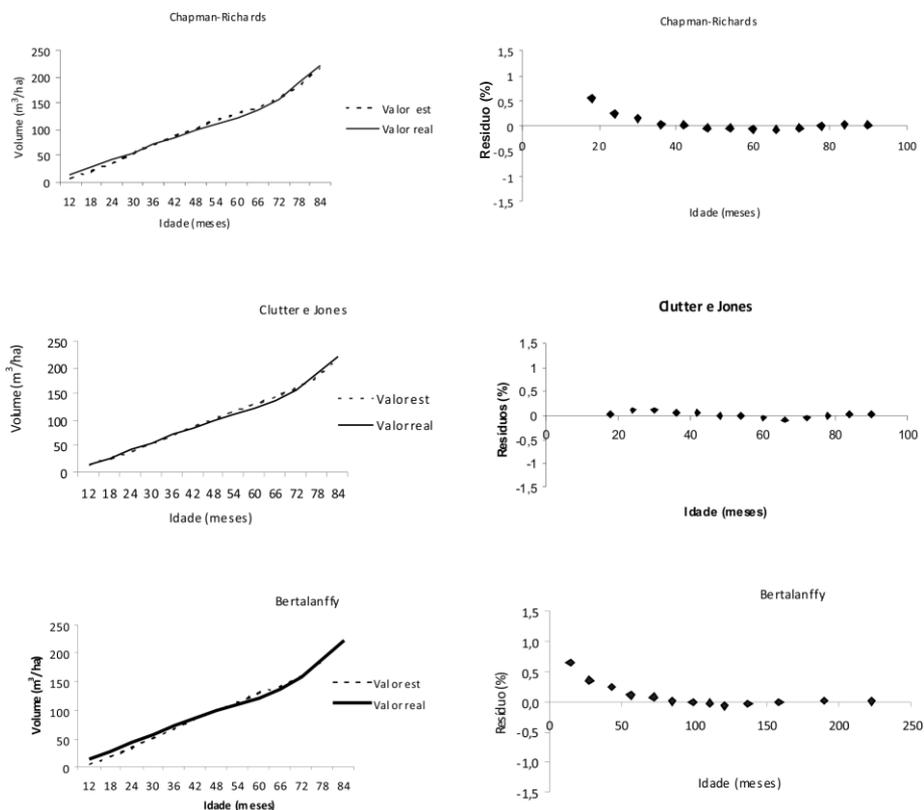
Notrabalho realizado por Ferreira e Trevisan (2001) os melhores resultados, expressos pelos menores erros da projeção volumétrica, foram obtidos com o modelo de Chapman-Richards. Segundo esses autores, o modelo de Chapman-Richards tem aplicações nas mais variadas áreas da ciência florestal, nas quais processos de crescimento sigmoidais são representados.

O modelo de Bertalanffy também é amplamente usado na ciência florestal (SANQUETTA, et al. 2010; COLBERT et al., 2004) e, segundo Lei e Zhang (2004) foi aplicado em cerca de 90% das literaturas referentes à modelagem de crescimento e incremento de florestas. Mas por outro lado se trata de uma das variantes do modelo de Chapman-Richards (MACHADO, 1978)

Na Figura 2 são observados os gráficos das curvas de crescimento entre

os valores estimados e os valores reais e as distribuições gráficas dos resíduos para os três melhores modelos corrigidos.

Figura 2. Curvas de crescimento reais e estimadas e distribuições gráficas dos resíduos das equações de Chapman Richards, Clutter e Jones e Bertalanffy para o clone C39 no experimento do Polo Gesseiro do Araripe.



Apesar de apresentar bom ajuste o modelo de Chapman-Richards subestimou os dados nas idades iniciais e o modelo de Clutter e Jones apresentou a melhor distribuição gráfica dos resíduos.

Na Tabela 2, encontram-se os valores dos parâmetros estimados, os índices de ajustes corrigidos e os erros padrões das estimativas obtidos a partir da modelagem do crescimento em volume do clone C41.

Semelhante aos resultados encontrados para o clone C39, as equações para o clone C41 também apresentaram bons valores de  $IA_c\%$ , destacando-se as equações de Mitscherlich e Chapman-Richards com 98,6%. A equação de

Brody voltou a apresentar estimativas com valores de difíceis interpretações. A equação de Weibull apresentou o menor  $IA_{aj}$  com 95,4%.

Tabela 2. — Estimativas dos parâmetros, índices de ajustes corrigidos  $IA_c\%$  e os erros padrões das estimativas  $s_{yx}$  dos modelos testados para o clone C41 no Polo Gesseiro do Araripe.

Equações	Coeficientes e estatísticas				
	k	$b_0$	$b_1$	$IA_c\%$	$s_{yx}\%$
Mitscherlich	0,999	120824,000	-	98,8	5,44
Brody	-3,28E-07	11632,400	-	98,4	5,64
Bertalanffy	0,759	-	-	98,3	6,75
Chapman-Richards	0,089	1,116	-	98,6	6,75
Weibull	9,818	33,927	-1,41E-07	95,4	10,68
Clutter e Jones	2,978	0,021	2,299	97,8	5,34
Silva-Bailey	4,134	0,875	-	98,0	6,75

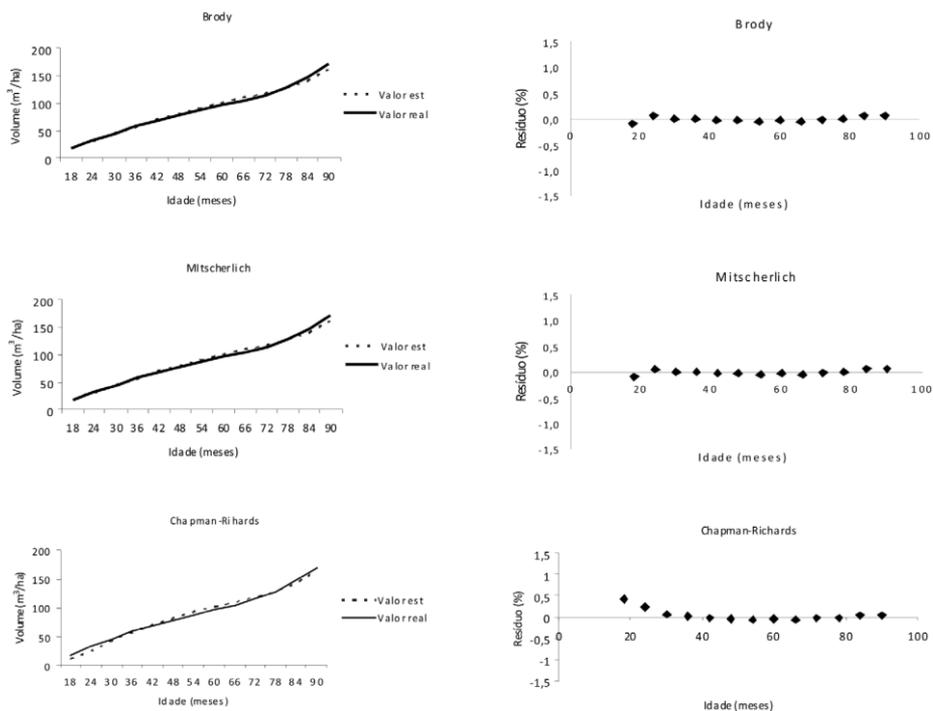
O modelo de Silva-Bailey (SILVA, 1986) apresentou ajustes semelhantes aos outros modelos para os dois clones.

Na figura 3 estão as curvas de crescimento e as distribuições gráficas dos resíduos para os três melhores modelos corrigidos para os dados do clone C41. Os modelos de Brody e Mitscherlich apresentaram as curvas de crescimento e as distribuições gráficas dos resíduos semelhantes.

Os modelos testados para os dois clones apresentaram curvas de crescimento seguindo o mesmo padrão, em que nas idades finais o crescimento em volume se eleva bruscamente. Porém essa elevação da produção coincidiu com um inverno atípico, bastante rigoroso que ocorreu na região, chegando a chover o equivalente a 70% do ano, entre os meses de fevereiro a junho, quando o experimento estava aos sete anos de idade. Certamente, essa elevação no volume nas idades finais foi resultante do elevado aporte de hídrico na área. Corroborando com isto, Stape et al. (2010) avaliando o potencial de crescimento de oito plantações de eucaliptos no Brasil, sujeitos a diferentes fornecimento de nutrientes e água, observaram que em sítios com maiores disponibilidade de água, ocorreram incrementos de 30% no crescimento da plantação.

Sabe-se que a região da Caatinga onde está implantado o experimento é afetada diretamente pela sazonalidade climática, sendo a mesma considerada por Araújo; Albuquerque; Castro (2007) como um fator de stress que funciona

Figura 3. Curvas de crescimento reais e estimadas e distribuições gráficas dos resíduos das equações de Brody, Mitscherlich e Chapman Richards para o clone C41 no experimento do Polo Gesseiro do Araripe.



como força seletiva modeladora da dinâmica da vegetação. Essa sazonalidade da região reflete diretamente no desenvolvimento dos eucaliptos, que em períodos de estiagem o crescimento ficaria mais brando e em situações de elevado aporte hídrico as árvores apresentariam crescimentos acima do normal como ocorreu com os clones C39 e C41 de *Eucalyptus urophylla* no experimento do Polo Gesseiro do Araripe.

Conclui-se que os modelos testados apresentaram bons ajustes para os dois clones de *Eucalyptus urophylla* no Polo Gesseiro do Araripe, sendo o modelo de Chapman-Richards apresentou ajustes levemente superiores para os dois clones testados.

#### 4. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, S.M.S.O. Polo Gesseiro do Araripe: unidades geo-ambientais e impactos da mineração. (tese de doutorado em Geociências). Universidade Federal de ~~Campinas~~ Campinas, SP., 2004.
- Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, vols. 13/14, p.173-190, 2016/2017.

- ARAÚJO, E.L.; ALBUQUERQUE, U.A.; CASTRO, C.C. Dynamics of the Brazilian Caatinga a revision concerning the plants, environments and people. **Functional Ecosystems and Communities**, 1: 15-29, 2007.
- BAESSO, R.C.E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia. **Ciência Florestal**, 20: 335-344, 2010.
- BARROS, K.N.N.O. Abordagem clássica e bayesiana em modelos simétricos transformados aplicados à estimativa de crescimento em altura de *Eucalyptus urophylla* no Polo Gesseiro do Araripe – PE. (dissertação de mestrado em Biometria). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE., 2010.
- BINOTI, M.L.M.S. Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto. (dissertação de mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG., 2010.
- BINOTI, M.L.M.S. Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo (tese de doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG., 2012.
- CARVALHO, S.P.C. Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de *Eucalyptus* sp. clonal para fins energéticos. (dissertação de mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG., 2010.
- CARVALHO, P.C.C. ET AL. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição de área basal e *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, 17: 541-548, 2011.
- CYSNEIROS, F.J.A.; PAULA, G. A. Restricted Methods in Symmetrical Linear Regression Models. **Computational Statistics and Data Analysis**, 49: 689-708, 2005.
- CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, 9: 354-371, 1963.
- COLBERT, J.J. ET AL. Individual tree basal-area growth parameter estimates for four models. **Ecological Modelling**, 174: 115-126, 2004.
- COUTO, H.T.Z; BASTOS, N.L.M. Curvas de crescimento em volume para *Eucalyptus* sp, em segunda rotação no Estado de São Paulo. **Revista do IPEF**, 34: 15-18, 1986.
- DEMOLINARI, R.A.; SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado - PA. **Revista Árvore**, 31: 503-512, 2007.
- ENCARNAÇÃO, C.R.F. **Observações meteorológicas e tipos climáticos das unidades e campos experimentais da empresa IPA**. Instituto Agrônomo de Pernambuco, Recife, 1980.

- FERREIRA, C.A.; TREVISAN, R. Prognose do crescimento volumétrico de espécies de *Eucalyptus* para a Região Centro Sul do Brasil. **Boletim de Pesquisa Florestal**, 42: 81-94, 2001.
- GADELHA, F.H.L. ET AL. Rendimento volumétrico e energético de clones de híbridos de *Eucalyptus* sp. no Polo Gesseiro do Araripe-PE. **Ciência Florestal**, 22: 331-341, 2012.
- GADELHA F.H.L. ET AL., Produtividade de clones de eucaliptos em diferentes sistemas de manejo para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 35: 263-270, 2015.
- GORGENS, E.B. ET AL. Tendências de crescimento de povoamentos de eucalipto após aplicação de desbaste. **Revista Árvore**, 31: 879-885, 2007.
- GOUVEIA, J.F. ET AL. Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. **Floresta**, 45: 587-598, 2015.
- HESS, A.F.; SCHNEIDER, P.R. Crescimento em volume de *Araucária angustifolia* (Bertol.) Kuntze em três regiões do Rio Grande do Sul. **Revista Ciência Florestal**, 20: 107-122, 2010.
- HESS, A.F. ET AL., Aplicação dos modelos lineares generalizados para estimativa d crescimento em altura, **Pesquisa Florestal Brasileira**, 35: 427-433, 2015.
- LAPPI, J. Calibration of height and volume equations with random parameters. **Forest Science**, 37: 781-801, 1991.
- LEI, Y.C.; ZHANG, S.Y. Features and partial derivatives of Bertalanffy-Richards growth model in forestry. **Nonlinear Analysis: Modeling and Control**, 9: 65-73, 2004.
- LIMA FILHO, L.M. ET AL. Modelagem do crescimento de clones de *Eucalyptus* usando o modelo de Chapman-Richards com diferentes distribuições simétricas dos erros. **Ciência Florestal**, 22: 777-785, 2012.
- LUNDGREN, W.J.C.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C. Estimação de volume de madeira de eucalipto por cokrigagem, krigagem e regressão. **Cerne**, 21: 243-250, 2015.
- MACHADO, S.A. Studies in growth and yield estimation for *Pinus taeda* L. plantations in the state of Paraná-Brazil. (thesis doctor of Philosophy). University of Washington, Washington, USA., 1978.
- MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. Modelagem do crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* através de processos de difusão. **Revista Floresta**, 33: 169-182, 2003.
- MENDES, B.R. ET AL. Desenvolvimento de modelos de crescimento de árvores individuais fundamentado em equações diferenciais. **Cerne**, 12: 254-263, 2006.

- MENON, M.U. Ajuste dos modelos de Kozak e do sistema Murkhart e Cao para plantações de *Pinus oocarpa*. **Revista Ambiência**, 1: 197-205, 2005.
- OLIVEIRA, M.L.R. ET AL. Modelagem e prognose em povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Revista Árvore**, 33: 841-852, 2009.
- PRODAN, M. **Forest Biometrics**. Pergamon Press, Oxford, 447 p. 1968.
- RESENDE, R.R. et al. Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, 28: 219-225, 2004.
- ROCHA, K.D. Produtividade volumétrica de clones de *Eucalyptus* spp. na região do Polo Gesseiro do Araripe. (tese de doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE., 2012.
- SALES, F.C.V. ET AL. Ajustes de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no Agreste de Pernambuco. **Floresta**, 45: 663-669, 2015.
- SANQUETTA, C.R. ET AL. Equações individuais e determinação de classes de crescimento para *Nectandra grandiflora* Nees a partir de dados de análise de tronco. **Scientia Agraria**, 11: 1-8, 2010.
- SCHLAEGEL, B.E. Testing, reporting and using biomass estimation models. Em: Southern Forest Biomass Workshop, 1981, **Proceedings...**, 1981, p. 95-112.
- SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.R.P.; SOUZA, C.A.M. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. FACOS - UFSM, Santa Maria, RS, 2009.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47: 719-734, 1933.
- SILVA, J.A.A. Dynamics of stand structure in fertilized pine plantations. (thesis doctor of Philosophy). University of Georgia, USA, 1986.
- SILVA, J.A.A. ET AL. Produtividade volumétrica de clones de *Eucalyptus* spp. no Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, 10: 240-260, 2013.
- SILVA, J.A.A. Potencialidades de florestas energéticas de *Eucalyptus* no Pólo Gesseiro do Araripe-Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, 5-6: 301 - 319, 2008/2009.
- SILVA, J. A. A. Potencialidades de florestas energéticas de rápido crescimento no Bioma Caatinga. Em: **Anais do I Simposio do Bioma Caatinga**. I Simpósio do Bioma Caatinga, 2016, Petrolina. Embrapa Semiárido, Petrolina, 2016. p.117 – 124

SILVA, S.M.F.S. Comparação entre equações volumétricas regionais e equações baseadas em volumes da primeira tora em clones de Eucalyptus na chapada do Araripe- PE. (dissertação de mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE., 2008.

STAPE, J.P. ET AL. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, 259: 1684–1694, 2010.