

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO – UFRPE**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**ALINE AMORIM DA SILVA**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS NAS  
ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS E DE BIOMASSA  
EM *Eucalyptus* spp. DA CHAPADA DO ARARIPE – PE**

**RECIFE – PE**

**2022**

**ALINE AMORIM DA SILVA**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS NAS  
ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS E DE BIOMASSA  
EM *Eucalyptus* spp. DA CHAPADA DO ARARIPE – PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof.º PhD José Antônio Aleixo da Silva

**RECIFE – PE**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S586c

Silva, Aline Amorim da

Comparação de modelos estocásticos nas estimativas volumétricas e de biomassa em *Eucalyptus* spp. da Chapada do Araripe - PE / Aline Amorim da Silva. - 2022.  
41 f. : il.

Orientador: Jose Antonio Aleixo da Silva.  
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Florestal, Recife, 2022.

1. Florestas energéticas. 2. Análise de regressão. 3. Polo Gesseiro do Araripe. 4. Semiárido. I. Silva, Jose Antonio Aleixo da, orient. II. Título

CDD 634.9

---

**ALINE AMORIM DA SILVA**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS NAS  
ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS E DE BIOMASSA  
EM *Eucalyptus* spp. DA CHAPADA DO ARARIPE – PE**

Aprovada em 31 de Maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof.º PhD José Antônio Aleixo da Silva  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof.º Dr.º Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof.º Dr.º Fernando Henrique de Lima Gadelha  
IFPE – Cabo de Santo Agostinho

**RECIFE – PE**

**2022**

“Aprendi a ser o máximo possível,  
de mim mesmo.”

Nelson Rodrigues

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, a grande mãe, aos meus guias e aos meus mentores por toda força e apoio espiritual que venho recebendo desde o início da minha jornada terrestre e, principalmente, da minha jornada universitária atual. Gratidão por estarem comigo em todos os momentos.

Gostaria de agradecer a minha “mainha”, Heloisa Maria Amorim da Silva, por todo amor, cuidados e por ser a minha inspiração nessa jornada. Foi por meio dela que surgiu o meu desejo de ingressar em uma Universidade, e eu não teria concluído se não fosse o seu apoio. Serei eternamente grata a sua dedicação, aos seus esforços e ao seu “faço o que posso e o que não posso por minhas filhas.”. Gratidão ao meu tio, Ivan Amorim da Silva, e a minha irmã, Helen Amorim da Silva, por todo apoio e encorajamento nesses anos de estudo.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco e aos seus servidores, principalmente, aos servidores do Departamento de Ciência Florestal, que têm sido grandes instrutores e facilitadores desta conclusão.

Ao Prof. PhD José Antônio Aleixo da Silva, por ter acreditado em mim em inúmeros momentos, inclusive, mais do que eu mesma, aceitando me orientar neste TCC que é o início de um grande projeto pessoal e profissional. Serei eternamente grata, meu amigo.

À Prof. Dr. Rute Berger, por ter sido o meu alicerce em vários momentos difíceis, em especial, ao final da minha graduação. À Prof. Dr. Isabelle Maria Jacqueline Meunier, por ter despertado em mim (sem querer) a paixão pelas florestas energéticas, mas, principalmente, pelas políticas públicas e para o potencial que o nosso Estado (PE) possui. Ao Prof. Dr. Marcelo Nogueira e ao Prof. Dr. Rodrigo Eiji Hakamada, por todas as orientações e conhecimentos compartilhados.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) de Engenharia Florestal, por tantas trocas e momentos de aprendizagem em grupo. Gratidão por acreditarem e confiarem no meu trabalho. Ao Grupo de Práticas Florestais (GPFlor), por me permitir aplicar de forma prática tudo o que aprendi durante a graduação.

Aos meus colegas de curso e, em especial, a minha turma, com quem convivi boa parte desse tempo. Cresci e aprendi muito com cada um de vocês: Aline Veloso, Iran Côrrea, Isabelly Meg, Lucas Benedito, Maria Clara Moraes, Patrícia Batista, Rayane Gomes, Satyro Barbosa e Tainá Sabino. Por fim, gostaria de agradecer a Nattan Ádler, Leonardo Modesto, Jadiene Moura, Igor Alberto, Sandra Porfírio, Ana Paula Clemente, Tatiane Menezes, Júlia Falcão,

Jéssica Nunes e Júlio César por segurarem a minha mão em tantos momentos importantes, e me conduzirem até que eu pudesse cumprir esta etapa que é me formar.

A todos vocês, minha mais profunda gratidão.

## RESUMO

Objetivou-se por meio deste trabalho comparar e avaliar modelos estocásticos nas estimativas volumétricas e de biomassa total, em clones de *Eucalyptus* spp. com 5,5 anos de idade e em sua segunda rotação, na Chapada do Araripe – PE. O estudo foi realizado a partir dos dados de volume da biomassa total dos compartimentos arbóreos (fuste, casca, galho e folha), coletados em plantios experimentais de *Eucalyptus* spp. na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA – em Araripina-PE, onde foram amostradas aleatoriamente 150 indivíduos para a cubagem e modelagem. Foram realizados ajustes em nove modelos volumétricos, utilizando o software SYSTAT (12.0). O processo Stepwise na forma *backward* foi aplicado nos ajustes dos modelos e os seguintes critérios foram estabelecidos para a seleção das equações: significância dos coeficientes de regressão ( $b_i$ ), erro padrão da estimativa ( $S_{xy}$ ), Critério de Informação de Akaike (AIC), Índice de Ajuste corrigido ( $IA_c$ ), análise gráfica dos resíduos e, em conjunto, o valor ponderado dos escores estatísticos (VP). Com base nos resultados obtidos, foram encontrados valores significativos, ao nível de 1% de significância, para todos os coeficientes das equações. Contudo, foi observado que, ao utilizar a análise de regressão por Stepwise (*backward method*), alguns modelos volumétricos e de biomassa sofreram modificações importantes dentro do seu formato, resultando na supressão de variáveis independentes e igualdade entre equações. Após aplicação das técnicas de análise, observou-se que todos os modelos propostos apresentaram boa precisão entre as estimativas volumétricas e de biomassa total, em função do DAP e altura dos indivíduos arbóreos. Pode-se visualizar que, para os modelos volumétricos, os de Naslund, Naslund (Modificado), Schumacher e Hall, Meyer, Meyer (Modificado), Prodan e Stoate foram os que apresentaram melhor ajuste e precisão, enquanto que, para a biomassa total, os modelos de Prodan, Schumacher e Hall, Naslund (Modificado), Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund e Meyer (Modificado) foram os que apresentaram melhor ajuste, sendo, portanto, os modelos mais viáveis para futuros inventários florestais em plantios de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe.

**Palavras-chave:** Florestas Energéticas; Análise de Regressão; Polo Gesseiro do Araripe; Semiárido.



## ABSTRACT

The objective of this work was to compare and evaluate stochastic models in volumetric and biomass estimates in *Eucalyptus* spp. with 5.5 years of age and in its second rotation, in Chapada do Araripe - PE. The study was carried out from data on volume and the total biomass of the tree compartments (stem, bark, branch and leaf), collected in experimental plantations of *Eucalyptus* spp. at the Experimental Station of the Pernambuco Agronomic Institute – IPA – in Araripina-PE, where 150 individuals were randomly sampled for cubage and modeling. Adjustments were made to nine volumetric models, using the SYSTAT (12.0) software. The Stepwise (*backward method*) was applied to the models and the following criteria were established to select the best equation: significance of the regression coefficients ( $b_i$ ), standard error of the estimate ( $S_{xy}$ ), Akaike Information Criterion (AIC), Corrected Fit Index ( $AI_c$ ), graphical analysis of residuals and the weighted value of the statistical scores (VP). Based on the results obtained, it was observed significance at the level of 1% of probability, for all the coefficients of the equations. However, it was observed that, when using the regression analysis by Stepwise (*backward method*), some volumetric and biomass models underwent important modifications within their format, resulting in the suppression of independent variables and equality among some equations. After applying the analysis techniques, it was observed that all the proposed models showed a good precision between the volumetric and total biomass estimates, as a function of the DBH and height of the tree individuals. For the volumetric models the Naslund, Naslund (Modified), Schumacher and Hall, Meyer, Meyer (Modified), Prodan and Stoate showed the best fit and precision among the evaluated models, while for the total biomass, the Prodan, Schumacher e Hall, Naslund (Modified), Meyer, Stoate, Spurr (Combined Variable), Naslund e Meyer (Modified) models showed the best fit, being, therefore, the most viable models for future forest inventories in *Eucalyptus* spp. in Chapada do Araripe.

**Keywords:** Energy Crops; Regression Analysis; Gypsum Pole of the Araripe; Semiarid.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos plantios experimentais de <i>Eucalyptus</i> spp. na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA. ....	18
Figura 2 – Croqui da parcela do experimento, com representação da área útil, na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA. ....	19
Figura 3 – Distribuição gráfica dos resíduos (%) de modelos volumétricos, que apresentaram os melhores ajustes e precisão, para plantios de <i>Eucalyptus</i> spp. na Chapada do Araripe. ....	33
Figura 4 – Distribuição gráfica dos resíduos (%) de modelos de biomassa total, que apresentaram os melhores ajustes e precisão, para plantios de <i>Eucalyptus</i> spp. na Chapada do Araripe. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Modelos volumétricos selecionados para o ajuste e estimação dos dados de volume e biomassa total em árvores de <i>Eucalyptus</i> spp. (Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA). .....	22
Tabela 1 – Valores das estatísticas para as variáveis independentes, em relação à variável volume ( $m^3/fuste$ ), nas equações dos modelos ajustados de Schumacher e Hall, Prodan, Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund, Meyer (Modificado), Dissescu e Meyer e Naslund (Modificado). .....	26
Tabela 2 – Valores das estatísticas para as variáveis independentes, em relação à variável biomassa total (kg) por árvore, nas equações dos modelos ajustados de Schumacher e Hall, Prodan, Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada) Naslund, Meyer (Modificado), Dissescu e Meyer e Naslund (Modificado). .....	27
Tabela 3 – Equações para estimar volume ( $m^3/fuste$ ) de <i>Eucalyptus</i> spp. na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA. ....	29
Tabela 4 – Equações para estimar biomassa total (kg) por árvore de <i>Eucalyptus</i> spp. na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA. ....	30
Tabela 5 – Valores das estatísticas obtidas nos ajustes dos modelos volumétricos e de biomassa total, para <i>Eucalyptus</i> spp. na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA. ....	31

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
3.1 O POLO GESSEIRO DO ARARIPE E A ECONOMIA NO SEMIÁRIDO .....	14
3.2 O EUCALIPTO COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA .....	15
3.3 MODELOS VOLUMÉTRICOS E DE BIOMASSA .....	16
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	18
4.2 CARACTERÍSTICAS DO EXPERIMENTO E COLETA DE DADOS .....	19
4.3 MODELOS VOCLUMÉTRICOS E DE BIOMASSA .....	22
4.4 ANÁLISE DOS DADOS .....	23
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação de florestas energéticas na região do Semiárido nordestino tem sido a temática central de longas e profundas discussões. Cerca de 28 milhões de pessoas vivem no Semiárido brasileiro, grande parte dependente da lenha nativa como recurso energético e, com a quase exaustão da lenha na região, sua matriz energética foi agravada, e as indústrias se viram obrigadas a adquirir lenha em estados vizinhos. Devido à grande demanda energética, a região do Araripe se encontra sob severa ação antrópica. O Polo Gesseiro do Araripe, mesmo sendo um dos mais importantes Arranjos Produtivos Locais (APL) do Estado, apresenta diversos problemas de infraestrutura e no uso inadequado de fontes energéticas locais, principalmente, a lenha que é proveniente da vegetação nativa da região e, em grande parte, explorada ilegalmente.

Diante dos problemas ambientais existentes, os plantios florestais têm se destacado como principal instrumento para a recuperação de áreas desmatadas, e sua utilização em áreas degradadas pode reduzir, de forma substancial, a pressão sobre as espécies nativas. Considerando a crescente demanda por recursos florestais no Semiárido nordestino, especialmente para fins energéticos, torna-se premente o aumento da oferta de madeira como fonte geradora de energia, por meio do reflorestamento com espécies de rápido crescimento. O gênero *Eucalyptus* por possuir grande plasticidade e crescer de forma satisfatória em locais com amplitudes edafoclimáticas diversas, destaca-se como uma excelente opção energética para a região do Araripe.

A quantificação do volume das árvores é uma operação que exige a cubagem rigorosa, o que se reveste em custos e consumo de tempo. Uma forma indireta e precisa de quantificar a produção de povoamentos florestais é o emprego de equações volumétricas e de biomassa que usam variáveis dendrométricas de fácil obtenção, geralmente o diâmetro à altura do peito (DAP) e altura das árvores. No geral, após a obtenção destas variáveis, as equações para as estimativas volumétricas e de biomassa são obtidas por meio de ajustes de modelos de regressão. Como o custo e a demanda por tempo são duas desvantagens para os métodos diretos de quantificação, tornam-se necessários estudos que resultem em métodos indiretos mais abrangentes e, conseqüentemente, em modelos mais flexíveis, de fácil ajustamento e boa precisão.

Em vista disto, objetivou-se por meio deste trabalho ajustar, avaliar e comparar modelos estocásticos para as estimativas volumétricas e de biomassa total, em *Eucalyptus* spp. com 5,5 anos de idade e em sua segunda rotação, na Chapada do Araripe – PE.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Ajustar, avaliar e comparar modelos estocásticos para as estimativas volumétricas e de biomassa total, em *Eucalyptus* spp. com 5,5 anos de idade e em sua segunda rotação, na Chapada do Araripe – PE.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ajustar modelos volumétricos e de biomassa total (kg) por árvore, por meio da análise de regressão, levando-se em consideração o somatório das biomassas fuste, casca, galho e folha, e volume (m<sup>3</sup>) por fuste.
- Avaliar o emprego do método Stepwise (*backward method*) na seleção de variáveis independentes nas equações volumétricas e de biomassa total.
- Comparar os modelos ajustados e indicar o(s) mais adequado(s), conforme a precisão das equações.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O POLO GESSEIRO DO ARARIPE

A economia do Semiárido nordestino é descrita como problemática e débil em função de aspectos econômicos, sociais e ambientais. Contudo, ao longo de anos, surgiram indicações de que essa base econômica está mudando e de forma significativa. Pernambuco está entre os estados da região Nordeste com potencial de desenvolvimento e crescimento econômico, inclusive, com performance superior à média dos demais estados. Tal desempenho está associado aos investimentos do distrito industrial portuário, o complexo de Suape, e ao aproveitamento de alguns “subespaços” econômicos como a fruticultura, o Polo Gesseiro do Araripe e as confecções no Agreste do Estado (LIMA; GATTO, 2013).

O Polo Gesseiro do Araripe é detentor de uma expressiva reserva de gipsita, a mais importante do Brasil (SILVA, 2008 – 2009). O Polo, que abrange os municípios de Araripina, Bodocó, Ipubí, Trindade e Ouricuri, apresenta-se como um conjunto de empresas de pequeno, médio e grande porte, e oferta cerca de 13,9 mil empregos diretos e, aproximadamente, 69 mil indiretos, resultantes da atuação de 16 minas em atividade, três grandes fábricas e cerca de 698 calcinadoras, gerando um faturamento de R\$ 1,4 bilhão/ano.

Embora seja o mais consolidado dos Arranjos Produtivos Locais (APL) do Estado, o Polo Gesseiro do Araripe apresenta diversos problemas de infraestrutura, destacando-se o uso inadequado de fontes energéticas. De acordo com Araújo (2010), os verdadeiros entraves ao contínuo crescimento e do desenvolvimento econômico na região são: o sistema de transporte, o abastecimento de energia elétrica, água e, em especial, os insumos da produção, já que o processo da calcinação da gipsita utiliza, principalmente, lenha como a principal fonte energética.

Devido à grande demanda de lenha como fonte energética, o Polo Gesseiro do Araripe se encontra sob severa ação antrópica. Sua matriz energética foi agravada, com a quase exaustão da lenha na região, e as indústrias se viram obrigadas a adquirir lenha em estados vizinhos, podendo chegar a consumir, em média, 652.680 m<sup>3</sup> de lenha por ano (GADELHA, 2014) e, apesar da busca por fontes energéticas em outras regiões, o Polo Gesseiro do Araripe não conseguiu contornar boa parte das suas dificuldades.

A introdução de fontes energéticas alternativas, com base em pesquisas sociais e científicas desenvolvidas na região do Araripe, tornou-se uma opção econômica e

ambientalmente viável diante das problemáticas citadas (SILVA, 2008 – 2009). Após anos de estudos científicos, pesquisadores de Pernambuco e de outras regiões do Brasil buscam comprovar, por meio de indicadores locais e pesquisas de campo, a possibilidade do cultivo de florestas energéticas de rápido crescimento na região do Araripe.

### 3.2 O EUCALIPTO COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA

A implantação de florestas energéticas de rápido crescimento na região do Araripe e do Semiárido nordestino tem sido a temática central de longas e profundas discussões que envolvem estudos sobre os benefícios a longo prazo dos plantios florestais. Em contrapartida, a falta de investimento, de conhecimento, problemáticas locais e polêmicas construídas ao redor da cultura do eucalipto, constituem-se em outro problema para implantação de florestas energéticas de rápido crescimento na região. Schumacher e Viera (2016) relatam que as plantações florestais têm sido alvo de todo tipo de desinformação, o que acarretou no desencorajamento de pequenos e médios produtores rurais e criando, na sociedade em geral, a ideia distorcida de que a silvicultura do eucalipto é prejudicial ao meio ambiente.

Os plantios florestais têm se destacado como principal instrumento para a recuperação de áreas desmatadas e sua utilização em áreas degradadas pode reduzir, de forma substancial, a pressão sobre as espécies nativas. Considerando a crescente demanda por recursos florestais no Semiárido nordestino, especialmente para fins energéticos, torna-se premente o aumento da oferta de madeira como fonte geradora de energia, por meio do reflorestamento com espécies de rápido crescimento (DRUMOND, 2007; CARMO *et al.*, 2010). O gênero *Eucalyptus* possui grande plasticidade e pode crescer de forma satisfatória em locais com amplitudes edafoclimáticas diversas, como a região do Araripe.

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, subfamília Leptospermoideae, e detém mais de 700 espécies e variedades. É um gênero natural da Austrália e ocupa diversos ambientes, incluindo áreas muito secas ou pantanosas. O sucesso do eucalipto se deu por sua grande variabilidade de usos, tais como lenha para alimentar locomotivas, dormentes ferroviários, postes para rede elétrica, construção civil, óleos essenciais, dentre outros produtos necessários no século XIX e início do século XX (ANDRADE, 1911; SILVA, 2008-2009). Atualmente, o setor da eucaliptocultura provém diversos produtos que estão no nosso cotidiano, como o carvão vegetal, roupas de viscose, móveis, celulose para papel, etanol celulósico, energia, máscaras e tecidos cirúrgicos (IBÁ, 2020).



Cerca de 28 milhões de pessoas vivem no Semiárido brasileiro, grande parte dependente da lenha nativa como recurso energético. Considerando que 63% das áreas de Caatinga já foram alteradas por atividades humanas, entender como a dinâmica econômica, social e ambiental poderia ser melhorada com a implantação de florestas de rápido crescimento na região se torna de extrema importância.

### 3.3 MODELOS VOLUMÉTRICOS E DE BIOMASSA

A estimativa de produção de uma floresta é o principal objetivo de levantamentos florestais. Por ser uma variável quantitativa, necessita de cálculos e estudos mais abrangentes, e é por meio dela que se pode fazer o gerenciamento e o planejamento correto dos recursos florestais. É possível realizar a estimativa de uma variável dependente pela modelagem de dados por regressão em função de variáveis independentes de fácil medição, tratando-se de uma técnica estatística que relaciona diversas variáveis, visando ajustar modelos com maior precisão (SCHNEIDER; SCHNEIDER; SOUZA, 2009; REGO *et al.*, 2019).

Segundo Silva (2015), o modelo é definido como uma formulação matemática baseada em hipóteses que tenta retratar fenômenos físicos ou biológicos, que após ajustados geram uma equação que pode representar tais fenômenos a um determinado nível de confiabilidade  $\alpha$ . Existem dois tipos de modelos, sendo estes com estruturas lineares e não lineares. Os modelos lineares são ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários, ponderados ou generalizados e método da máxima verossimilhança (ABREU, 2019). Já os modelos não lineares são obtidos por meio da minimização da soma dos quadrados dos resíduos, ajustando-se aos dados dos fenômenos biológicos que serão utilizados para prognose do crescimento florestal (BATISTA; COUTO, 1986; SILVA *et al.*, 2017). A representação numérica do modelo é a equação, isto é, o resultado final do ajuste do modelo ao conjunto de dados.

O emprego de equações volumétricas e de biomassa constitui uma das principais ferramentas para a estimativa da produção de povoamentos florestais, sendo base para o manejo sustentável dos plantios (LEITE; ANDRADE, 2003). A biomassa florestal é um parâmetro que caracteriza a capacidade dos ecossistemas em acumular matéria orgânica no decorrer do tempo, e o conhecimento da dinâmica do acúmulo de biomassa também é de fundamental importância para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas e para a quantificação de nutrientes em todas as partes da planta (WINCK *et al.*, 2015; SILVA, 2016).

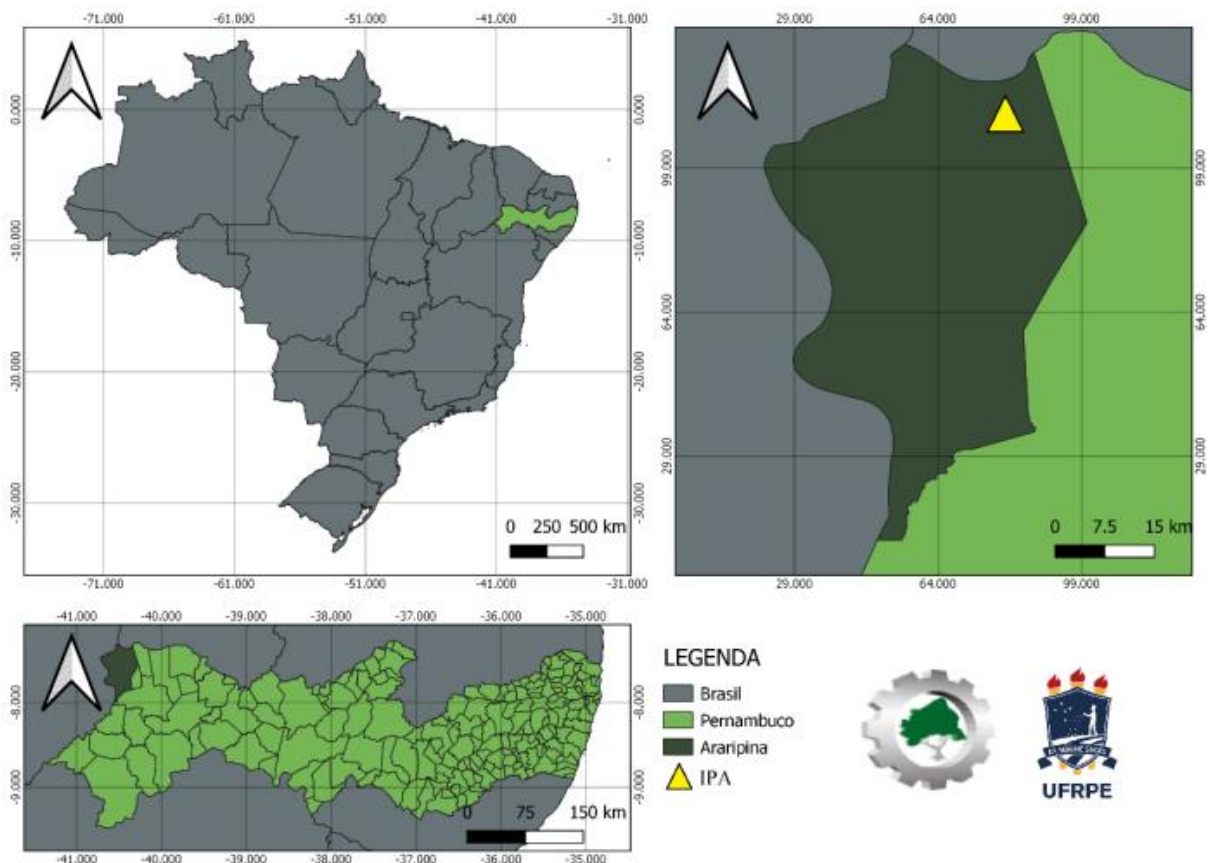
A quantificação do volume das árvores é uma operação que exige a cubagem rigorosa, o que se reveste em custos e consumo de tempo. Uma forma indireta e precisa de quantificar a produção de povoamentos florestais é o emprego de equações volumétricas e de biomassa que usam variáveis dendrométricas de fácil obtenção, geralmente o diâmetro à 1,30 m do solo (DAP) e altura das árvores (Ht). No geral, após a obtenção destas variáveis, as equações para as estimativas volumétricas e de biomassa são obtidas por meio de ajustes de modelos de regressão (SILVEIRA *et al.*, 2007; FONSECA; ALICE; REY-BB, 2009). Como o custo e a demanda por tempo são duas desvantagens para os métodos diretos de quantificação, tornam-se necessários estudos que resultem em métodos indiretos mais abrangentes e, conseqüentemente, em modelos mais flexíveis, de fácil ajustamento e boa precisão.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado a partir de dados dendrométricos e de biomassa (fuste, casca, galho e folha), coletados em plantios experimentais de *Eucalyptus* spp. com 5,5 anos de idade e em sua segunda rotação, na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA – em Araripina-PE. A estação experimental está localizada na Chapada do Araripe (Figura 1), a uma altitude de 831 metros nas coordenadas 07°27'37" S e 40°24'36" W. O clima da região é caracterizado como BshW' (semiárido), segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 25°C e precipitação média de, aproximadamente, 472 mm de 2010 a 2018. A classificação do solo local é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico de textura argilosa (ROCHA, 2012; EMBRAPA SOLOS, 2018).

Figura 1 – Localização dos plantios experimentais de *Eucalyptus* spp. na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA.



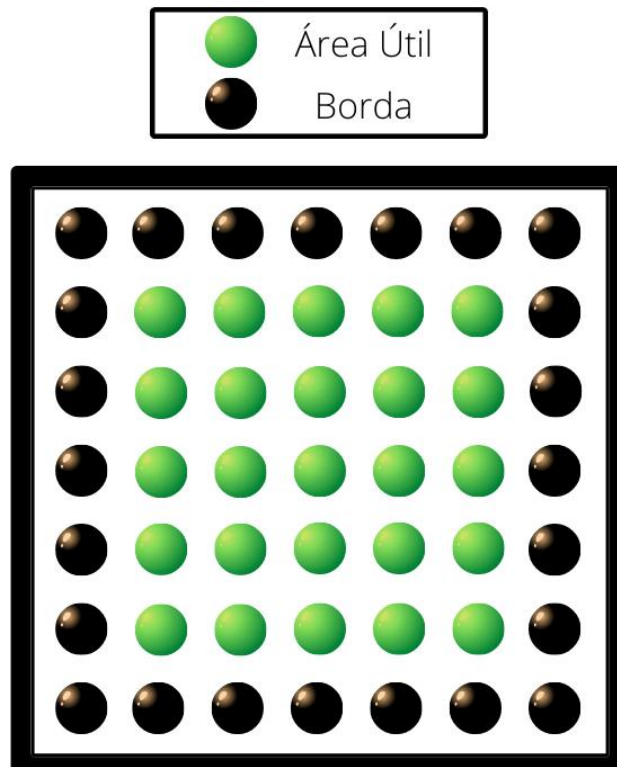
Fonte: MODESTO, 2021.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DO EXPERIMENTO E COLETA DE DADOS

Os experimentos com clones de *Eucalyptus* spp. na região do Araripe foram implantados em março de 2002, na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco, por iniciativa do curso Engenharia Florestal do Departamento de Ciência Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco – DCFL-UFRPE. O experimento é composto por 15 tratamentos (clones) com quatro repetições para cada tratamento, em parcelas com dimensões de 14 m x 21 m (área total de 294 m<sup>2</sup>) com espaçamento 3 m x 2 m. Cada parcela é constituída por 49 árvores, contudo, para eliminar o efeito de borda, são consideradas como área útil as 25 árvores centrais (Figura 2).

De acordo com Silva (2016), para a obtenção dos dados dendrométricos e de biomassa, foi utilizado o processo de amostragem inteiramente aleatória, onde foram amostradas 10 árvores por tratamento, totalizando 150 indivíduos. Como não houve diferença significativa entre clones para a análise e modelagem, todo o povoamento foi considerado como *Eucalyptus* spp. e, portanto, todos os procedimentos posteriores a coleta foram realizados com base nesta modificação.

Figura 2 – Croqui da parcela do experimento, com representação da área útil, na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA.



Fonte: AUTORA, 2022.

Os dados são do Laboratório de Biometria e Manejo Florestal (DCFL – UFRPE) e foram coletados ao final da segunda rotação do plantio experimental, em junho de 2015, finalizando a segunda colheita do experimento. Para as variáveis dendrométricas, foi feita a cubagem rigorosa seguindo os seguintes procedimentos: medição do diâmetro à altura do peito (DAP – medição a 1,30 m em relação ao solo), altura total, altura comercial. A fórmula de Smalian foi utilizada para calcular o volume das seções dos fustes comerciais (4.1) e volume individual total (4.2), com base no cálculo das áreas basimétricas dos segmentos (4.3):

$$v_i = \frac{g_1 + g_2}{2} * l \quad (4.1)$$

Em que:

$v_i$  = volume da seção  $i$  (m<sup>3</sup>);

$g_1$  = área basimétrica no início da seção (m<sup>2</sup>);

$g_2$  = área basimétrica no fim da seção (m<sup>2</sup>);

$l$  = comprimento da seção (m).

$$V_i = \sum_{i=1}^n v_i \quad (4.2)$$

Em que:

$V_i$  = volume da árvore  $i$  (m<sup>3</sup>).

$$g_i = \frac{\pi * d_i^2}{4} \quad (4.3)$$

Em que:

$g_i$  = área basimétrica da seção (m<sup>2</sup>);

$d_i$  = diâmetro da seção na altura  $h_i$ .

Para os dados de biomassa, foram realizados os seguintes procedimentos: determinação da densidade básica da madeira (4.4), cálculo da biomassa do fuste comercial (4.5) e amostragem dos componentes da parte aérea (casca, galho e folha) (4.6). Todos os métodos de determinação e quantificação da biomassa foram feitos conforme as propostas de Soares *et al.* (1996) e Vieira *et al.* (2008).

$$DBM = \frac{m_3}{(m_2 - m_1)} \quad (4.4)$$

Em que:

$DMB$  = densidade básica da madeira ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_1$  = massa seca em estufa (g);

$m_2$  = massa do recipiente com água e disco imerso (g);

$m_3$  = massa do recipiente com água (g).

$$BS_F = V * DBM \quad (4.5)$$

Em que:

$BS_F$  = biomassa seca do fuste (kg);

$V$  = volume rigoroso do fuste ( $\text{m}^3$ );

$DBM$  = densidade básica da madeira do fuste ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$$BS_{PA} = \frac{P_u(c) * P_s(a)}{P_u(a)} \quad (4.6)$$

Em que:

$BS_{PA}$  = biomassa total da parte aérea (kg);

$P_u(c)$  = peso úmido total no campo (kg);

$P_s(a)$  = peso seco da amostra (kg);

$P_u(a)$  = peso úmido da amostra (kg).

#### 4.3 MODELOS VOLUMÉTRICOS E DE BIOMASSA

Com a estimativa do volume e da biomassa total, foram realizados ajustes em nove modelos de regressão para a estimação dos coeficientes. Os modelos considerados são do tipo linear e não linear, e foram selecionados com base em estudos produzidos por Figueiredo Filho (2014), Ribeiro, Gama e Melo (2014) e Silva (2016).

Quadro 1 – Modelos volumétricos selecionados para o ajuste e estimação dos dados de volume e biomassa total em árvores de *Eucalyptus* spp. (Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA).

Nº	Modelos	Autores
1	$Y_i = \beta_0 DAP_i^{\beta_1} H_i^{\beta_2} \varepsilon_i$	Schumacher e Hall
2	$Y_i = \beta_0 DAP_i^{\beta_1} DAP_i^{2\beta_2} H_i^{\beta_3} H_i^{2\beta_4} \varepsilon_i$	Prodan
3	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.DAP_i + \beta_2.DAP_i^2 + \beta_3.(DAP.Ht)_i + \beta_4.(DAP^2Ht)_i + \beta_5.Ht_i + \varepsilon_i$	Meyer
4	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.DAP_i^2 + \beta_2.(DAP^2Ht)_i + \beta_3.Ht_i + \varepsilon_i$	Stoate
5	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.(DAP^2Ht)_i + \varepsilon_i$	Spurr Variável Combinada
6	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.DAP_i^2 + \beta_2.(DAP^2Ht)_i + \beta_3.(DAPHt^2)_i + \beta_4.Ht_i^2 + \varepsilon_i$	Naslund
7	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.DAP_i + \beta_2.DAP_i^2 + \beta_3.(DAPHt)_i + \beta_4.(DAP^2Ht)_i + \varepsilon_i$	Meyer Modificado
8	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.DAP_i + \beta_2.DAP_i^2 + \varepsilon_i$	Dissescu e Meyer
9	$Y_i = \beta_0 + \beta_1.DAP_i^2 + \beta_2.\ln(DAP^2Ht)_i + \beta_3.DAPHt_i^2 + \beta_4.Ht_i^2 + \varepsilon_i$	Naslund Modificado

Em que:  $Y_i$  = volume ( $m^3$ /fuste) ou biomassa total (kg) da árvore  $i$ ;  $\beta$ 's = parâmetros dos modelos; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Ht = altura (m) da árvore  $i$ ;  $\varepsilon_i$  = erro aleatório da árvore  $i$ .

Os modelos de Schumacher e Hall e o de Prodan foram linearizados, usando logaritmos, para ajustar pelo método dos mínimos quadrados. Após os ajustes, as equações resultantes foram retransformadas para a forma não linear, aplicando o antilogaritmo, de forma que todas as equações resultantes tivessem a variável dependente na mesma natureza ( $m^3$  ou kg).

Com as equações retransformadas, foram calculadas as Somas de Quadrados da Regressão  $\left[ \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \right]$  e, de posse da Soma de Quadrados total, o quadro da análise de variância foi reconstruído para as equações não lineares, para que fosse possível aplicar as estatísticas comparativas.

#### 4.4 ANÁLISE DOS DADOS

A preparação da planilha de dados e os ajustes dos modelos, por meio dos dados de volume (m<sup>3</sup>) e de biomassa total (kg) por árvore, foram feitos utilizando os softwares Microsoft Excel e o SYSTAT (12.0), respectivamente. No primeiro, foi feito o somatório da biomassa dos compartimentos arbóreos (fuste, casca, galho e folha), para a obtenção dos valores de biomassa total como primeira etapa. Na sequência, foram tabuladas as variáveis dependentes e independentes para a análise de regressão (segundo os modelos escolhidos). Optou-se por usar a ferramenta “regressão por Stepwise” para selecionar as variáveis que realmente são de importância na equação ajustada (ABBAD; TORRES, 2002). O processo Stepwise (*backward*) foi o método escolhido para a seleção de variáveis independentes neste trabalho.

Após a primeira etapa de cálculos e aplicação das técnicas, foram estabelecidos os seguintes critérios para a escolha da melhor equação: significância dos coeficientes de regressão ( $b_i$ ), erro padrão da estimativa ( $S_{xy}$ ) (4.7), critério de informação de Akaike (AIC) (4.8) (AKAIKE, 1974), Índice de Ajuste corrigido (IA<sub>c</sub>) (4.9) (SCHLAEGEL, 1981), análise gráfica dos resíduos e, em conjunto, o valor ponderado dos escores estatísticos (VP). A significância dos coeficientes de regressão foi o primeiro critério a ser avaliado empregando o método Stepwise (*backward*).

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{SQR}{n - p}} \quad (4.7)$$

Em que:

$S_{xy}$  = erro padrão da estimativa;

$SQR$  = soma dos quadrados dos resíduos;

$n$  = número de observações;

$p$  = número de parâmetros no modelo.

O erro padrão da estimativa ( $S_{xy}$ ) explica a dispersão entre os valores observados e estimados. Quanto mais próximo de zero, mais preciso o modelo ajustado. O Critério de Informação de Akaike (AIC) desenvolvido por Akaike em 1973, de modo geral, verifica em primeiro lugar a adequação do modelo aos dados observados e em segundo a ordem do modelo. O melhor modelo é aquele que apresentar o menor valor de AIC (AKAIKE, 1974):



$$AIC = -2\text{Log}L(\hat{\theta}) + 2p \quad (4.8)$$

Em que:

$AIC$  = critério de informação de Akaike;

$L(\hat{\theta})$  = máximo da função de verossimilhança;

$p$  = número de parâmetros.

Uma métrica que usa o princípio do coeficiente de determinação e que permite comparar modelos de diferentes naturezas da variável dependente é o Índice de Ajuste (IA) que é expresso por (SCHLAEGEL, 1981):

$$IA = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right]$$

O índice de ajuste corrigido (IA<sub>c</sub>) é expresso por:

$$IA_c = \left[ 1 - (1 - IA) * \left( \frac{n - 1}{n - p} \right) \right] \quad (4.9)$$

Em que:

$IA$  = índice de ajuste que varia de 0 a 1,0;

$IA_c$  = índice de ajuste corrigido;

$n$  = número de parâmetros;

$p$  = número de parâmetros.

Para o Índice de Ajuste corrigido, quanto mais próximo de um, maior a correlação entre as variáveis estudadas. Ao final, foram atribuídos pesos de 1 a 9 para os valores de cada parâmetro, seguindo os novos critérios estabelecidos: para valores relacionados ao Índice de Ajuste, quanto maior o valor, maior o peso aplicado; e para valores relacionados ao erro padrão

da estimativa e critério de informação de Akaike, quanto menor o valor, maior o peso aplicado. O maior somatório dos valores (pesos) finais compõem o valor ponderado dos escores estatísticos, que corresponde a melhor equação ajustada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os respectivos cálculos apontaram uma média geral de valores 17,95 kg de biomassa total por árvore e 0,0194 m<sup>3</sup> por fuste. Por meio da análise de regressão por Stepwise (*backward*), foram encontrados valores significativos, ao nível de 1% de significância, para todos os coeficientes das equações, de acordo com os modelos ajustados de Schumacher e Hall, Prodan, Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund, Meyer (Modificado), Dissescu e Meyer e Naslund (Modificado) (Tabelas 1 e 2).

Alguns modelos de regressão podem possuir variáveis não significativas quando comparadas a outras, ou correlacionadas entre si, e tal situação influencia diretamente no valor e na significância dos coeficientes de regressão. A análise por meio do método Stepwise (*backward*) seleciona as variáveis na equação, avaliando suas importâncias, e retirando as menos correlacionadas com a variável dependente (ABBAD; TORRES, 2002).

Tabela 1 – Valores das estatísticas para as variáveis independentes, em relação à variável volume (m<sup>3</sup>/fuste), nas equações dos modelos ajustados de Schumacher e Hall, Prodan, Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund, Meyer (Modificado), Dissescu e Meyer e Naslund (Modificado).

Schumacher e Hall			
Coeficientes	Valores de b <sub>i</sub>	Teste de t	Valor de ρ
b <sub>0</sub>	0,000121130	-104,0478427	1,4272E-139**
b1 (DAP <sub>i</sub> )	1,832747470	52,26329459	7,55801E-97**
b2 (Ht <sub>i</sub> )	0,681688270	10,96552975	8,08536E-21**
Prodan			
b <sub>0</sub>	0,000121	-103.747296	1,4272E-139**
b1 (DAP <sub>i</sub> )	0,916498	52.034783	7,55801E-97**
b2 (Ht <sub>i</sub> )	0,340349	10.998512	8,08536E-21**
Meyer			
b <sub>0</sub>	-0,004319354	-3,79281224	0,00021697**
b1 (DAP <sub>i</sub> )	0,001686342	6,099461882	8,96385E-09**
b2 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	2,68007E-05	16,27089687	1,0832E-34**

Stoate			
b0	0,000493329	0,944405768	0,34651199**
b1 (DAP <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,000153682	4,912676431	2,36691E-06**
b2 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	2,4798E-05	10,38308177	2,76408E-19**
Spurr (Variável Combinada)			
b0	0,002260073	5,547565209	1,29939E-07**
b1 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	3,60823E-05	51,29689672	3,75935E-96**
Naslund			
b0	-0,001971345	-4,645726449	7,46367E-06**
b1 (DAP <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,000299718	18,68796929	1,14045E-40**
b2 (DAPHt <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	1,12043E-05	11,97984594	1,66912E-23**
Meyer (Modificado)			
b0	-0,004319354	-3,79281224	0,00021697**
b1 (DAP <sub>i</sub> )	0,001686342	6,099461882	8,96385E-09**
b2 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	2,68007E-05	16,27089687	1,0832E-34**
Dissescu e Meyer			
b0	-0,002215236	-3,730411024	0,000271777**
b1 (DAP <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,000466074	41,45698197	2,36558E-83**
Naslund (Modificado)			
b0	-0,001971345	-4,645726449	7,46367E-06**
b1 (DAP <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,000299718	18,68796929	1,14045E-40**
b2 (DAPHt <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	1,12043E-05	11,97984594	1,66912E-23**

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 2 – Valores das estatísticas para as variáveis independentes, em relação à variável biomassa total (kg) por árvore, nas equações dos modelos ajustados de Schumacher e Hall, Prodan, Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada) Naslund, Meyer (Modificado), Dissescu e Meyer e Naslund (Modificado).

Schumacher e Hall			
Coeficientes	Valores de b <sub>i</sub>	Teste de t	Valor de ρ
b0	0,126516700	-10,69091152	4,28586E-20**
b1 (DAP <sub>i</sub> )	1,830881450	17,84433542	1,28772E-38**
b2 (Ht <sub>i</sub> )	0,626130180	8,174362275	1,26812E-13**

Prodan			
b0	0,126517	-10.690912	4,28586E-20**
b1 (DAP <sub>i</sub> )	0,915437	17.844335	1,28772E-38**
b2 (Ht <sub>i</sub> )	0,313069	8.174362	1,26812E-13**
Meyer			
b0	3,003340651	4,603393448	8,8775E-06**
b1 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	0,031493092	27,95795856	6,26609E-61**
Stoate			
b0	3,003340651	4,603393448	8,8775E-06**
b1 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	0,031493092	27,95795856	6,26609E-61**
Spurr (Variável Combinada)			
b0	3,003340651	4,603393448	8,8775E-06**
b1 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	0,031493092	27,95795856	6,26609E-61**
Naslund			
b0	3,003340651	4,603393448	8,8775E-06**
b1 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	0,031493092	27,95795856	6,26609E-61**
Meyer (Modificado)			
b0	3,003340651	4,603393448	8,8775E-06**
b1 (DAP <sup>2</sup> Ht <sub>i</sub> )	0,031493092	27,95795856	6,26609E-61**
Dissescu e Meyer			
b0	-0,804991514	-0,943544587	0,346940148**
b1 (DAP <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,404684828	25,05499786	4,1802E-55**
Naslund (Modificado)			
b0	-0,59514228	-0,765540008	0,445177453**
b1 (DAP <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,261548417	8,901387935	1,89598E-15**
b2 (DAPHt <sub>i</sub> <sup>2</sup> )	0,009640449	5,626251474	9,02539E-08**

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Ao utilizar a análise de regressão por Stepwise (*backward*), observou-se que alguns modelos volumétricos e de biomassa sofreram modificações importantes dentro do seu formato, resultando na supressão de variáveis independentes e resultando em igualdade entre equações. Tal conjuntura ocorreu nas equações de Meyer e Naslund para volume, igualando-se as fórmulas de Meyer (Modificado) e Naslund (Modificado), respectivamente, e nas fórmulas matemáticas de Meyer, Stoate, Naslund e Meyer (Modificado) para biomassa, tornando-se idênticas a equação de Spurr (Variável Combinada) (Tabelas 3 e 4).

A supressão e redundância entre variáveis e fórmulas matemáticas também foram identificadas por Roecker (1991) e Abbad (1999) em suas pesquisas, e ambos concluíram que procedimentos como o Stepwise (*backward*) podem simplificar de forma excessiva alguns modelos de regressão, sendo necessários outros critérios para a escolha da melhor equação ajustada. As estatísticas  $IA_c$ ,  $S_{xy}$ , AIC e análise gráfica dos resíduos foram essenciais para a seleção da(s) melhor(es) equação(ões).

Tabela 3 – Equações para estimar volume ( $m^3/fuste$ ) de *Eucalyptus* spp. na Estação Experimental do Instituto Agrônômico de Pernambuco – IPA.

Nº	Equações	Autores	
1	$\hat{V}_i = 0,0001 \cdot DAP_i^{1,8327} Ht_i^{0,6817}$	Schumacher e Hall	
2	$\hat{V}_i = 0,0001 \cdot DAP_i^{0,9165} Ht_i^{0,3403}$	Prodan	
3	$\hat{V}_i = -0,0043 + 0,0017 \cdot DAP_i + (2,68E-05) \cdot DAP_i^2 Ht_i$	Meyer	Meyer Modificado
4	$\hat{V}_i = 0,0005 + 0,0002 \cdot DAP_i^2 + (2,48E-05) \cdot DAP_i^2 Ht_i$	Stoate	
5	$\ln(\hat{V}_i) = 0,0023 + (3,61E-05) \cdot DAP_i^2 Ht_i$	Spurr Variável Combinada	
6	$\hat{V}_i = -0,0020 + 0,0003 \cdot DAP_i^2 + (1,12E-05) \cdot DAP_i Ht_i^2$	Naslund	Naslund Modificado
7	$\hat{V}_i = -0,0022 + 0,0005 \cdot DAP_i^2$	Dissescu e Meyer	

Em que:  $Y_i$  = volume ( $m^3/fuste$ ); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Ht = altura.

Tabela 4 – Equações para estimar biomassa total (kg) por árvore de *Eucalyptus* spp. na Estação Experimental do Instituto Agrônômico de Pernambuco – IPA.

Nº	Equações	Autores
1	$\hat{B}_i = 0,1265 \cdot DAP_i^{1,8309} Ht_i^{0,6261}$	Schumacher e Hall

2	$\hat{B}_i = 0,1265 \cdot \text{DAP}_i^{0,9134} \text{Ht}_i^{0,3131}$	Prodan		
3	$\hat{B}_i = 3,0033 + 0,0315 \cdot \text{DAP}^2 \text{Ht}_i$	Meyer	Stoate	Spurr
		Naslund		Meyer Modificado
4	$\hat{B}_i = -0,8050 + 0,4047 \cdot \text{DAP}_i^2$	Dissescu e Meyer		
5	$\hat{B}_i = -0,5951 + 0,2615 \cdot \text{DAP}_i^2 + 0,0096 \cdot \text{DAP} \text{Ht}_i^2$	Naslund Modificado		

Em que:  $Y_i$  = biomassa total (kg) por árvore; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Ht = altura (m).

Após aplicação das técnicas de análise, observou-se que todos os modelos propostos apresentaram boa relação entre as estimativas volumétricas e de biomassa total, em função do DAP e altura dos indivíduos arbóreos, comprovando a afirmação de Soares *et al.* (2017) sobre a alta correlação entre estas variáveis. No entanto, ao analisar a Tabela 5, pode-se visualizar que, para a variável volume ( $\text{m}^3/\text{fuste}$ ), os modelos de Naslund, Naslund (Modificado), Schumacher e Hall, Meyer, Meyer (Modificado), Prodan e Stoate foram os que apresentaram melhor ajuste e precisão. Os valores dos Índices de Ajuste corrigido (IA) para estes modelos foram de 0,9593; 0,9593; 0,9554; 0,9569; 0,9569; 0,9554 e 0,9536, respectivamente, e os valores ponderados dos escores estatísticos (VP) variaram de 25 a 19.

Para a variável biomassa total (kg) por árvore, os modelos de Prodan, Schumacher e Hall, Naslund (Modificado), Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund e Meyer (Modificado) foram os que apresentaram melhor ajuste e precisão. Os valores de VP para estes modelos variaram de 25 a 22, e os valores de  $\text{IA}_c$  para os modelos de Prodan, Schumacher e Hall e Naslund (Modificado) foram de 0,8414; 0,8414 e 0,8409, respectivamente, enquanto que para os demais modelos o valor foi de 0,8397. Os modelos de Dissescu e Meyer para volume e para biomassa total foram os que apresentaram menor  $\text{IA}_c$  e valor ponderado dos escores estatísticos, sendo classificados como os menos adequados para esta situação.

Para Silva (2016), os dois modelos que melhor se ajustaram em relação a biomassa total foram os modelos de Spurr (Logaritmizado) e Schumacher e Hall, para plantios de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe, diferindo da presente pesquisa. Contudo, foi observado que, para o modelo de Spurr, assim como para qualquer modelo logaritmizado, é necessário calcular o  $\text{IA}_c$  e não apenas o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ). O IA é uma métrica estatística comparável ao  $R^2_{aj}$  para modelos lineares, no entanto, quando se trata de equações logaritmizadas, deve-se recorrer ao  $\text{IA}_c$ , pois o valor será diferente do coeficiente de determinação ajustado (SCHLAEGEL, 1981).

Tabela 5 – Valores das estatísticas obtidas nos ajustes dos modelos volumétricos e de biomassa total, para *Eucalyptus* spp. na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA.

	Modelos	$S_{xy}$	AIC	IA	$S_{xy}^{VP}$	AIC <sup>VP</sup>	IA <sup>VP</sup>	VP
Volume (m <sup>3</sup> )	Naslund	0,0025	-0,0014	0,9593	9	7	9	25
	Naslund (Modificado)	0,0025	-0,0014	0,9593	9	7	9	25
	Schumacher e Hall	0,0026	-164,9971	0,9554	8	9	7	24
	Meyer	0,0026	-0,0014	0,9569	8	7	8	23
	Meyer (Modificado)	0,0026	-0,0014	0,9569	8	7	8	23
	Prodan	0,0026	-157,1280	0,9554	8	8	7	23
	Stoate	0,0027	-0,0013	0,9536	7	6	6	19
	Spurr	0,0029	-0,0013	0,9464	6	6	5	17
	Dissescu e Meyer	0,0035	-0,0013	0,9202	5	6	4	15
Biomassa Total (kg)	Prodan	4,5890	43,3579	0,8414	7	9	9	25
	Schumacher e Hall	4,5890	45,6854	0,8414	7	8	9	24
	Naslund (Modificado)	4,5650	886,4523	0,8409	9	6	8	23
	Meyer	4,5816	886,4485	0,8397	8	7	7	22
	Stoate	4,5816	886,4485	0,8397	8	7	7	22
	Spurr	4,5816	886,4485	0,8397	8	7	7	22
	Naslund	4,5816	886,4485	0,8397	8	7	7	22
	Meyer (Modificado)	4,5816	886,4485	0,8397	8	7	7	22
	Dissescu e Meyer	5,0155	913,5942	0,8079	6	5	6	17

Já para Gouveia *et al.* (2015), os modelos que melhor se ajustaram em relação ao fator volume, de clones de *Eucalyptus* para a mesma região, foram os modelos mistos não lineares, sendo melhores, inclusive, do que o modelo clássico de Schumacher e Hall. Os autores optaram por usar outros critérios para a seleção de equações como, por exemplo, o critério de informação de Akaike (AIC), que foi utilizado para compor o valor ponderado dos escores estatísticos (VP) do presente trabalho, Teste da Razão de Máxima Verossimilhança (TRMV), Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) e o Teste de Vuong.

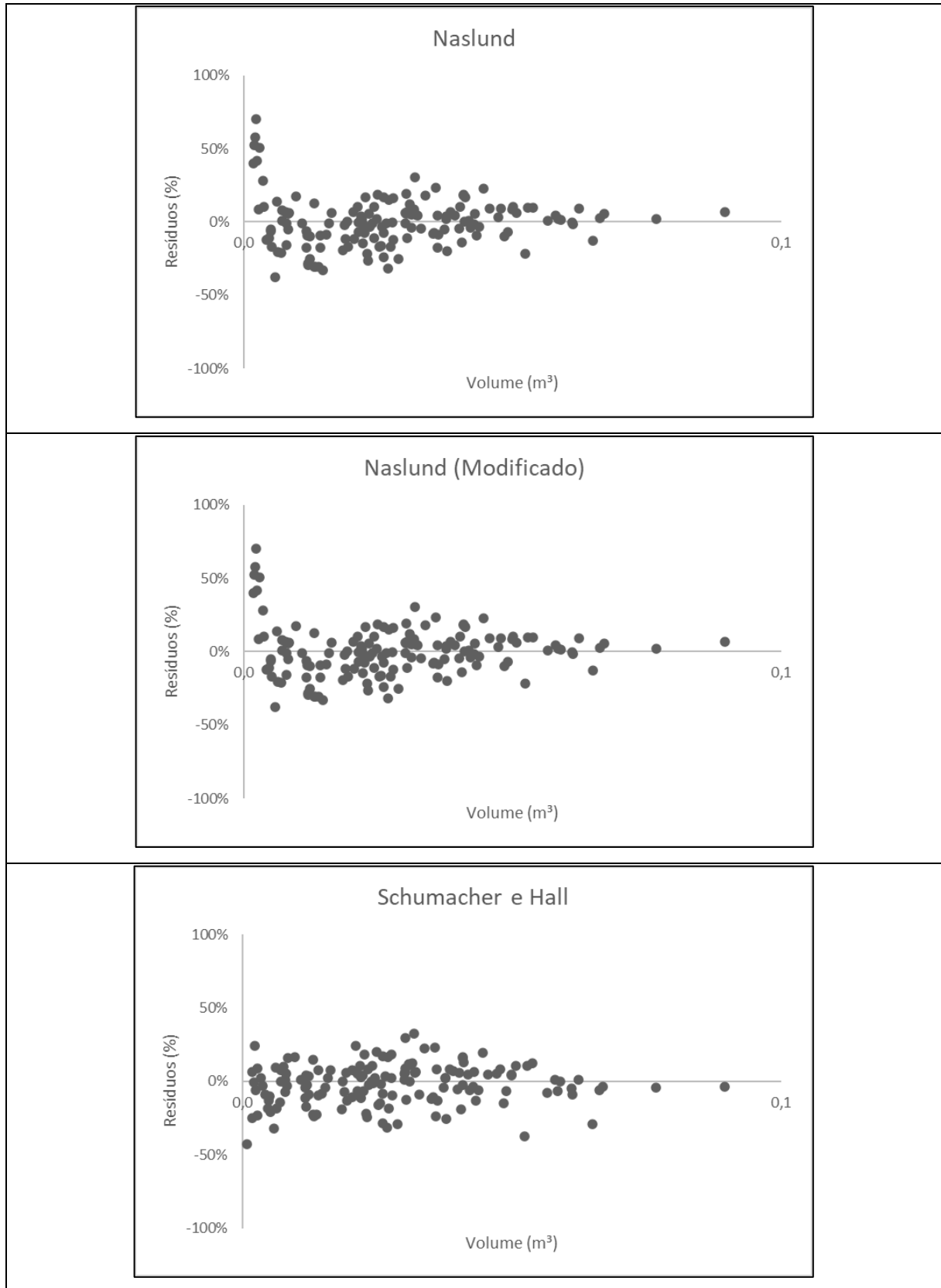
Como o erro padrão da estimativa ( $S_{xy}$ ) explica a dispersão entre os valores observados e estimados, quanto mais próximo de zero, mais preciso o modelo ajustado, todos os modelos volumétricos e de biomassa ajustados, com exceção dos modelos de Spurr (Variável Combinada) e Dissescu e Meyer para a variável volume, assim como Dissescu e Meyer para a

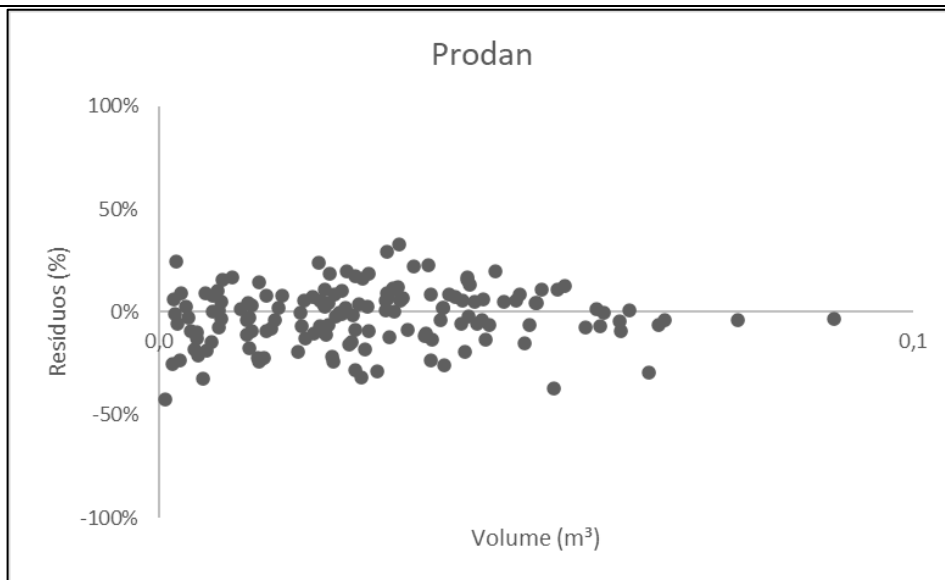
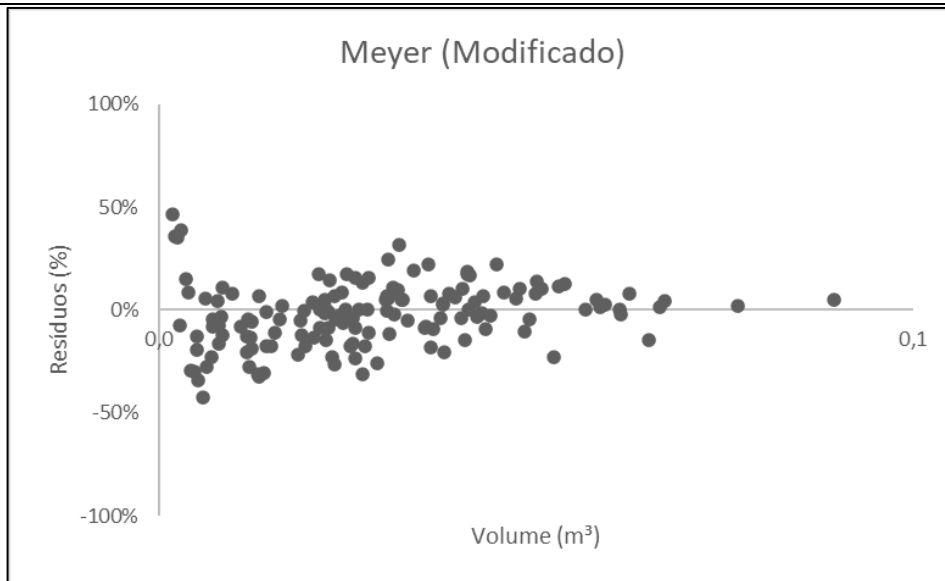
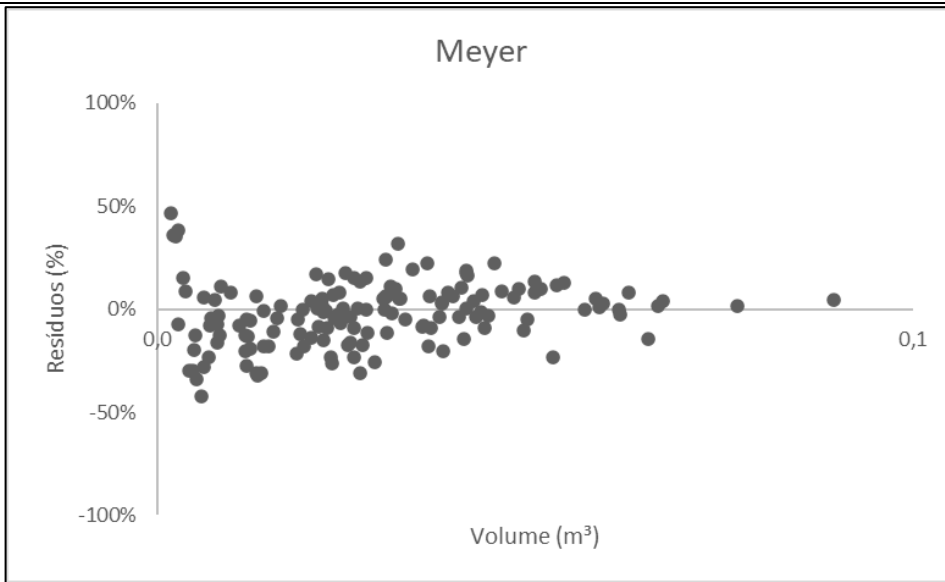


variável biomassa total, apresentaram os menores valores para  $S_{xy}$ . A mesma situação ocorreu com o critério de informação de Akaike (AIC), em que os modelos que apresentaram os menores valores foram os mesmos. A análise gráfica dos resíduos também foi utilizada para avaliar as melhores equações, contudo, todas se comportaram de forma similar (Figuras 3 e 4). Poucos indivíduos arbóreos apresentaram valores de resíduos mais dispersos e, no geral, os valores dos resíduos foram bem distribuídos ao longo dos gráficos.

Assim, considerando a significância dos coeficientes da análise de regressão, os melhores valores de precisão e ajuste para as equações, com uma distribuição balanceada e homogênea dos resíduos em torno da média zero, os modelos de Naslund, Naslund (Modificado), Schumacher e Hall, Meyer, Meyer (Modificado), Prodan e Stoate para a variável volume ( $m^3/fuste$ ) foram os que apresentaram os melhores valores, assim como os modelos de Prodan, Schumacher e Hall, Naslund (Modificado), Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund e Meyer (Modificado) para a variável biomassa total (kg) por árvore, sendo os mais viáveis para futuros inventários florestais em plantios de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe.

Figura 3 – Distribuição gráfica dos resíduos (%) de modelos volumétricos, que apresentaram os melhores ajustes e precisão, para plantios de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe.





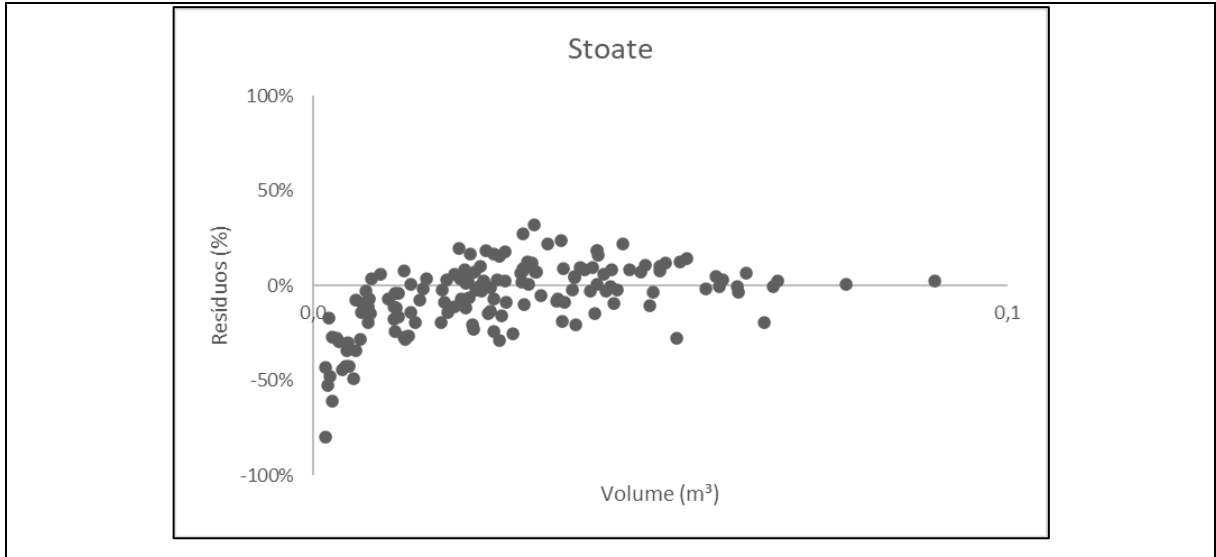
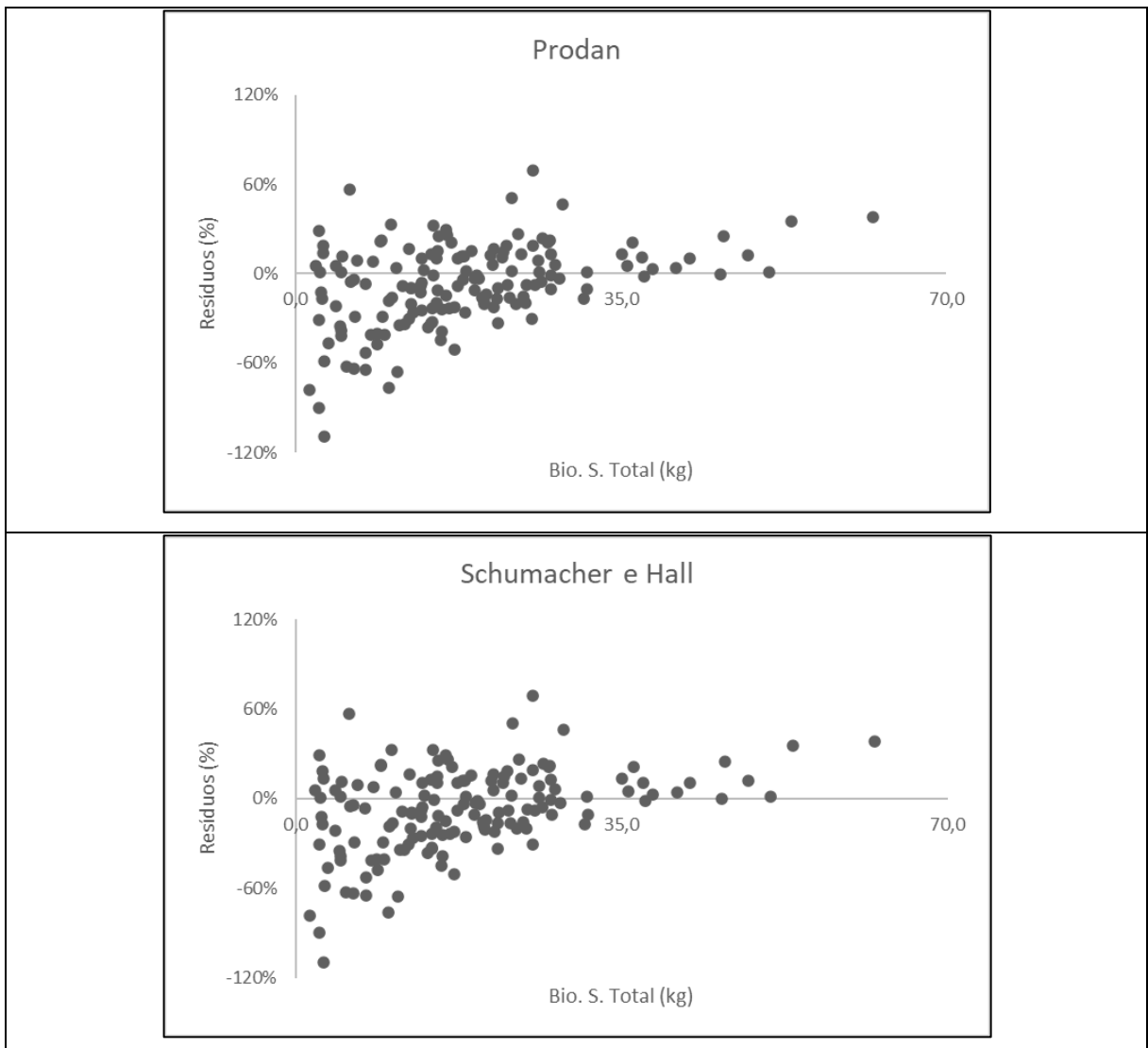
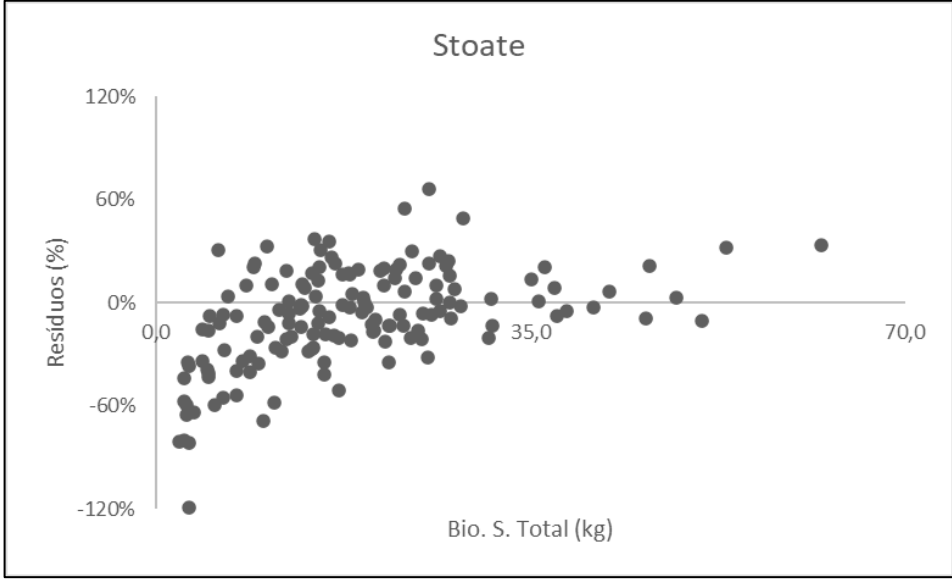
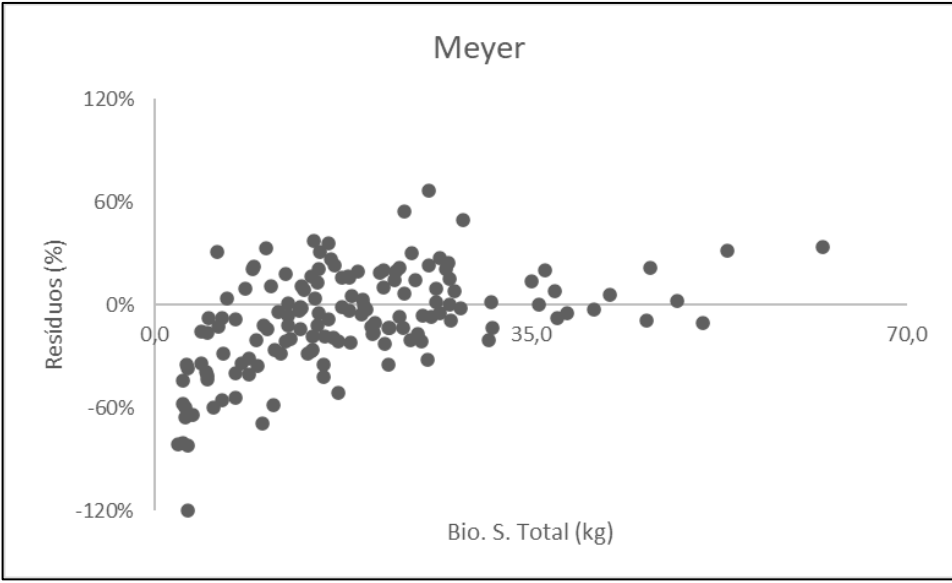
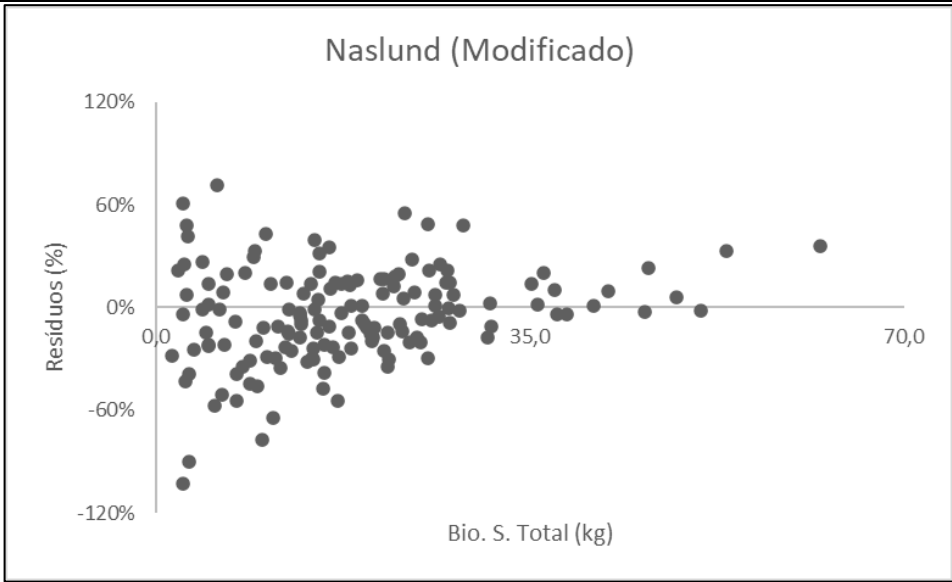
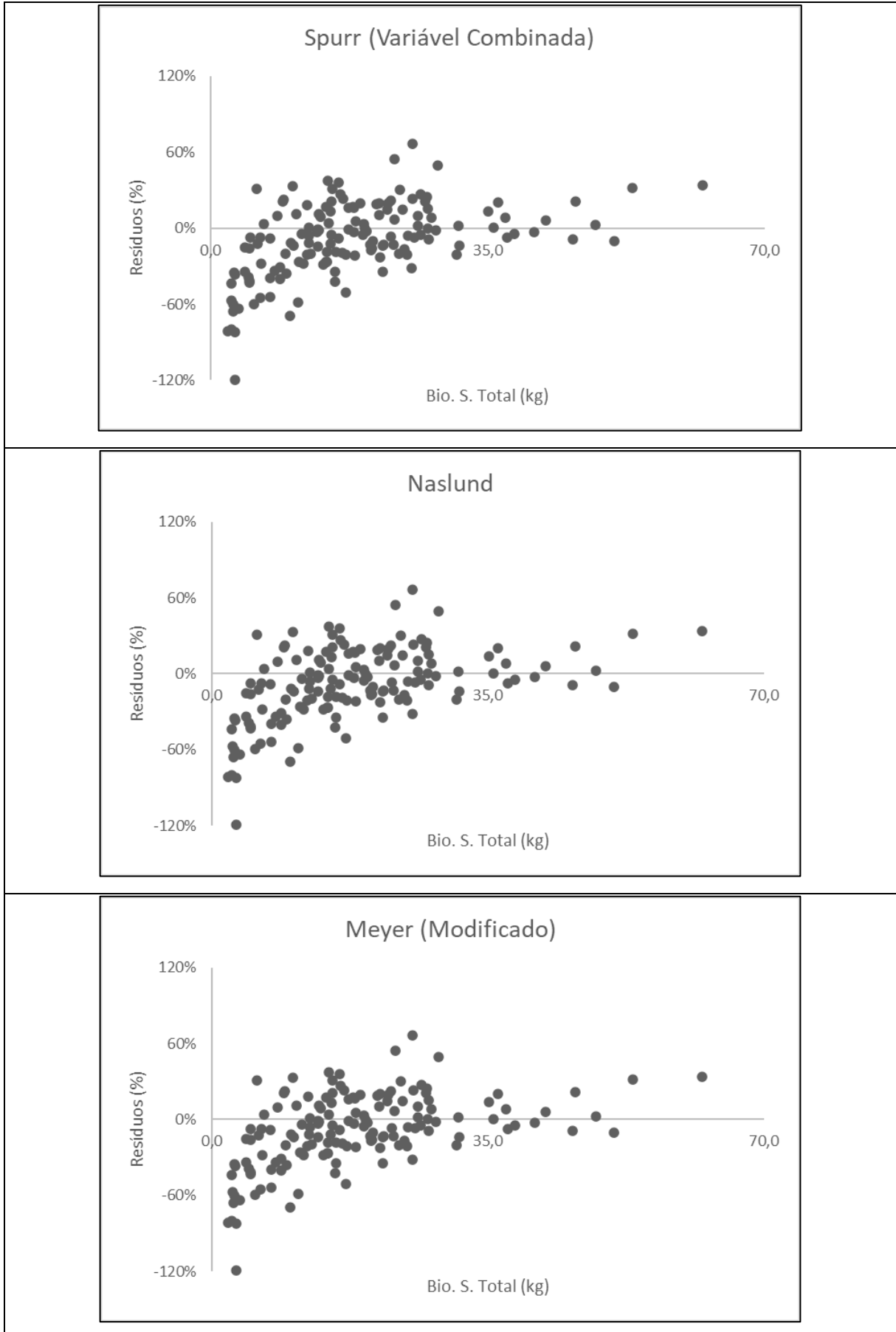


Figura 4 – Distribuição gráfica dos resíduos (%) de modelos de biomassa total, que apresentaram os melhores ajustes e precisão, para plantios de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe.







## 6. CONCLUSÃO

Por meio da análise de regressão Stepwise (*backward*), utilizando o software SYSTAT (12.0), foram encontrados valores significativos, ao nível de 1% de significância, para todos os coeficientes das equações. Contudo, observou-se que alguns modelos volumétricos e de biomassa sofreram modificações importantes dentro do seu formato, resultando na supressão de variáveis independentes e igualdade entre equações. Tal conjuntura ocorreu nas equações de Meyer e Naslund para volume, igualando-se as fórmulas de Meyer (Modificado) e Naslund (Modificado), respectivamente, e nas fórmulas matemáticas de Meyer, Stoate, Naslund e Meyer (Modificado) para biomassa, tornando-se idênticas a equação de Spurr (Variável Combinada).

Após aplicação das técnicas de análise, observou-se que todos os modelos propostos apresentaram boa relação entre as estimativas volumétricas e de biomassa total, em função do DAP e altura dos indivíduos arbóreos. No entanto, pode-se visualizar que, para a variável volume ( $m^3$ /fuste), os modelos de Naslund, Naslund (Modificado), Schumacher e Hall, Meyer, Meyer (Modificado), Prodan e Stoate foram os que apresentaram os melhores ajustes e precisões, enquanto que, para a variável biomassa total (kg) por árvore, os modelos de Prodan, Schumacher e Hall, Naslund (Modificado), Meyer, Stoate, Spurr (Variável Combinada), Naslund e Meyer (Modificado) foram os que apresentaram os melhores ajustes, sendo os modelos mais viáveis para futuros inventários florestais em plantios de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAD, G. **Um modelo integrado de avaliação de impacto do treinamento no trabalho**. 1999. Tese (doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1999.
- ABBAD, G.; TORRES, C.V. Regressão múltipla stepwise e hierárquica em psicologia organizacional: aplicações, problemas e soluções. **Estudos em Psicologia Natal**, Natal, v.7, Edição Especial, p.19-29, 2002.
- ABREU, J. C. **Alternativas para estimar o volume de árvores individuais em formações florestais no estado de Minas Gerais**. 2019. 82 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- ANDRADE, E. N. **Manual do plantador de eucalyptus**. São Paulo: Typographia Brazil de Rothschild & Comp., 1911, 335 p.
- ARÁUJO, S. M. S. Gargalos de desenvolvimento e ações do Estado no polo gesseiro do Araripe. **Revista Mercator**, Fortaleza, v. 9, n. 19, p. 65-79, mai-ago. 2010.
- BATISTA, J. L. F; COUTO, H. T. Z. Escolha de modelos matemáticos para a construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus* spp. no estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n.32, p.33-42, 1986.
- CARMO, J. F. A. *et al.* Potencial climático do estado de Pernambuco para o plantio de *Eucalyptus brassiana* ST Blake. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em Anais de Congresso (ALICE)**. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 5., 2010, Petrolina. Anais... Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.
- DRUMOND, M. A. A importância e contribuições do setor florestal para o desenvolvimento do semiárido. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em Anais de Congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS NO SEMI-ÁRIDO MINEIRO, 1., 2007, Janaúba. Desenvolvimento sustentável regional: anais. Janaúba: UNIMONTES: UFMG: UFVJM, 2007.
- EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 356p.
- FIGUEIREDO FILHO, A. *et al.* **Compêndio de Equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil**. Curitiba, Brasil. Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2014, 306 p.
- FONSECA, G; W.; ALICE, G, F.; REY-BB, J. M. Modelos para estimar la biomassa de espécies nativas en plantaciones y bosques secundários em la zona caribe de costa rica. **Bosque**, v. 30, n. 1, p. 36-47, 2009.



GADELHA, F. H. L. **Desempenho silvicultural e avaliação econômica de clones híbridos de eucaliptos plantados em diferentes regimes de manejo para fins energéticos**. 2014. 149 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, 2014.

GOUVEIA, J. F. *et al.* Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. **Revista Floresta**, v. 45, n. 3, p. 587-598, 2015.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório, 2020**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em 22 de abril de 2022.

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

LIMA, J. P. R.; GATTO, M. F. Economia do Semiárido de Pernambuco: ainda “sem produção”. **Revista Economia e Desenvolvimento**, Recife, v. 12, n. 2, 2013.

REGO, A. M. *et al.* Modelos de equações volumétricas para um povoamento de eucalipto situado em Codó (MA). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.4, p.1-8, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0001>.

RIBEIRO, R.B.S.; GAMA, J.R.V.; MELO, L.O. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a floresta nacional do Tapajós. **Revista Cerne**, v.20, n.4, p.605-6912, 2014. <https://doi.org/10.1590/01047760201420041400>.

ROCHA, K. D. **Produtividade volumétrica de clones de *Eucalyptus* spp. na região do Polo Gesseiro do Araripe**. 111 p. Tese (Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, 2012.

ROECKER, E. B. Prediction error and its estimation for subset-selected models. **Technometrics**. 1991, p. 459–68. <<https://www.jstor.org/stable/1269417>>. Acesso em 15 de maio de 2022.

SCHLAEGEL, B. D. Testing, reporting, and using biomass estimation models. Pages 95-112, **In: Proceedings of 1981, Southern Forest Biomass Workshop**, Clemson University, Clemson, South Carolina. USDA Forest Serv. Southern For. Expt. Sta., New Orleans. p. 95-112, 1981.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. S. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**, 2.ed. Santa Maria: UFSM/FACOS, 2009, 294 p.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M. Ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto. **Silvicultura do eucalipto no Brasil**, Santa Maria: UFSM, 2016. 306 p.

SILVA, J. A. A. Potencialidades de florestas energéticas de *Eucalyptus* no Polo Gesseiro do Araripe – Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciências Agrônomicas**, Recife, v. 5 e 6, p. 301-319, 2008-2009.

SILVA, J. A. A. da. Conceitos e princípios básicos de modelagem matemática em ciências florestais. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, Recife, v. 11/12, p.195-215, 2015.

SILVA, J. A. A. *et al.* Modelagem do crescimento volumétrico de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) no Polo Gesseiro do Araripe-PE. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, 13: 173-190, 2016-2017.

SILVA, J. W. L. **Modelagem da biomassa e da quantidade de carbono de clones de *Eucalyptus* da Chapada do Araripe-PE**. 2016. 88 f. Dissertação (Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

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**. 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

SILVEIRA, P. *et al.* O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 185-206, jan/mar 2007.

SOARES, C. P. B. *et al.* Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 20, n. 2, p. 179-189, 1996.

VIEIRA, S. A. *et al.* Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the atlantic forest. **Biota Neotropical**, v. 8, n. 2, p. 21-29, abr/jun 2008.

WINCK, R. A. *et al.* Modelos predictivos de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* para el noreste de Argentina. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 595-606, jul/set 2015.