

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO CAVALHEIRO

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE PROGNÓSE DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO  
PARA PLANTAÇÕES DE *Pinus taeda* L. NO PLANALTO NORTE CATARINENSE

CURITIBA

2017

RICARDO CAVALHEIRO

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE PROGNOSE DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO  
PARA PLANTAÇÕES DE *Pinus taeda* L. NO PLANALTO NORTE CATARINENSE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Co-Orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

CURITIBA

2017

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Cavalheiro, Ricardo

Aplicação de sistemas de prognose do crescimento e produção para plantações de Pinus taeda L. no planalto norte catarinense / Ricardo Cavalheiro. – Curitiba, 2017.

77 f. : il.

**Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado**

**Coorientadores: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho**

**Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari**

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 23/06/2017.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas – Crescimento. 2. Povoamento florestal. 3. Pinus taeda. 4. Florestas – Métodos estatísticos. 5. Teses. I. Machado, Sebastião do Amaral. II. Figueiredo Filho, Afonso. III. Pelissari, Allan Libanio. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.52



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
Setor CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RICARDO CAVALHEIRO** intitulada: **APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE PROGNOSE DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO PARA PLANTAÇÕES DE *Pinus taeda* L. NO PLANALTO NORTE CATARINENSE**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 23 de Junho de 2017.

SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

RODRIGO GERONI MENDES NASCIMENTO  
Avaliador Externo (UNICENTRO)

NELSON YOSHIHIRO NAKAJIMA  
Avaliador Interno (UFPR)



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Luiz Vilmar Cavalheiro e Diomara D. Cavalheiro e meus irmãos Ana Cláudia Cavalheiro, Ana Paula Cavalheiro e Luiz Eduardo Cavalheiro por toda força, apoio e amor.

Aos professores Doutores Sebastião do Amaral Machado, Afonso Figueiredo Filho e Allan Libanio Pelissari pela orientação, amizade e exemplo como pessoas e profissionais.

À empresa WestRock que possibilitou a realização deste trabalho, mais especificamente ao Diretor da Divisão Florestal Ali Abdul Ayoub e ao Gerente de Pesquisa e Tecnologia Ricardo Mayvorme Paim.

Aos colegas de trabalho do departamento de Pesquisa e Tecnologia, Manoel Salvador, Edson Worell, Edi Uilson Somoskovitz, Gilmar Rubiel, Hildefonso Gomes, Douglas Jacob que contribuíram de forma direta ou indireta para realização do trabalho.

Ao demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade oferecida para execução do programa de mestrado.

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar sistemas de crescimento e produção existentes na literatura florestal para estimativas do volume futuro de povoamentos de *Pinus taeda* L. Os dados utilizados neste trabalho foram provenientes de remedições de 104 parcelas permanentes de *Pinus taeda*, com formato quadrado de 0,04 ha de área. Foram avaliados quatro sistemas de modelos globais, quatro sistemas de modelagem em classes de diâmetros, um sistema para modelagem de árvores individuais e estimativas provenientes do programa SisPinus. Para avaliação das projeções, foram utilizadas as estatísticas de erros médios absoluto ( $E_{abs}$ ) e relativo ( $E_r$ ), raiz quadrada do erro médio quadrático (REMQ) e índice de concordância de Willmott ( $d$ ). Para avaliação da projeção do volume em diferentes classes de idade, calculou-se as estatísticas de viés e acurácia. Na categoria de modelos globais, a equação ajustada por Wolff II apresentou estatísticas superiores para estimativa do volume, com viés médio de  $13,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (1,7%) e acurácia média de  $34,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (5,7%). Na modelagem em classes de diâmetro, o sistema de Eisfeld foi o mais preciso e acurado, com viés médio de  $21,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (4,3%) e acurácia média de  $42,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (7,6%). Na modelagem por árvores individuais de Miranda, observou-se resultados tendenciosos para a estimativa dos crescimentos em diâmetro e em altura, apesar de resultados satisfatórios para a projeção do volume total por hectare. O simulador SisPinus subestimou o volume em todas as classes de idade, com viés médio de  $102 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (15,8%) e acurácia média de  $103,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (16,1%). De acordo com os critérios estatísticos utilizados, dentre as categorias de modelos selecionados, o sistema de equações global apresentado por Wolf II é o mais preciso, acurado e não tendencioso para estimativa da produção em volume em diferentes classes de idade nos plantios avaliados.

**Palavras-chave:** Modelos Globais, Modelagem em Classes de Diâmetro, Predição do volume do povoamento, Validação.

## ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate growth and yield systems available in the forestry literature for estimates the future volume in *Pinus taeda* L. stands. Data were obtained from 104 permanent plots of *Pinus taeda* stands, with square format of 0.04 ha of area. Four Whole Stand Models, four Diameter Distribution Models, one Individual Tree Models and estimates from SisPinus were evaluated. In order to evaluate the predictions, the statistics of absolute error (Eabs), relative error (Er), root mean square error (REMQ), and Willmott's concordance index (d) were used. To evaluate the projection of the volume in different age classes, the bias and accuracy statistics were calculated. In the Whole Stand Models, the Wolff II's equation presented best statistics for volume estimation, with a mean bias of  $13.6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (1.7%) and a mean accuracy of  $34.6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (5.7%). In the modeling of diameter classes, the Eisfeld's system was the most precise and accurate, with a mean bias of  $21.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (4.3%) and a mean accuracy of  $42.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (7.6%). The Miranda's individual tree modeling system presented biased results for estimating diameter and height growth, despite satisfactory results for volume projection. The SisPinus simulator underestimated the volume in all age groups, with a mean bias of  $102 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (15.8%) and a mean accuracy of  $103.6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (16.1%). According to the statistical criteria proposed, among the categories of models selected, the system of Whole Stand Model presented by Wolf II's was the most precise, accurate and non-biased to estimate volume yield in different age classes in the evaluated stands.

**Key-words:** Whole Stand Models, Diameter Distribution Models, Stand Volume Prediction, Validation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	CURVAS DE PRODUÇÃO (a) E DE CRESCIMENTO (b).....	22
FIGURA 2 -	DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	33
FIGURA 3 -	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE MODELAGEM GLOBAL, EM CLASSES DE DIÂMETRO E DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	43
FIGURA 4 -	VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA IDADE (a) E DESVIOS OBSERVADOS ENTRE A ALTURA DOMINANTE OBSERVADA E A ESTIMADA NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> (b).....	48
FIGURA 5 -	RESÍDUOS ENTRE AS ÁREAS BASAIS OBSERVADAS E AS ÁREAS BASAIS PROJETADAS NOS POVOAMENTOS DE <i>PINUS TAEDA</i> PELAS EQUAÇÕES (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) SCHUCHOVSKI (2014); (d) ROMANIUK (2015).....	49
FIGURA 6 -	RESÍDUOS ENTRE OS VOLUMES OBSERVADOS E OS VOLUMES PROJETADOS NOS POVOAMENTOS DE <i>PINUS TAEDA</i> PELAS EQUAÇÕES (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) SCHUCHOVSKI (2014); (d) ROMANIUK (2015).....	50
FIGURA 7 -	VOLUMES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VOLUMES OBSERVADOS NOS POVOAMENTOS DE <i>PINUS TAEDA</i> PELAS EQUAÇÕES: (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) SCHUCHOVSKI (2014); (d) ROMANIUK (2015).....	51
FIGURA 8 -	DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS A PARTIR DO SISTEMA DE EQUAÇÃO DOS ATRIBUTOS AJUSTADO POR VIANA (2016).....	55
FIGURA 9 -	DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS A PARTIR DO SISTEMA DE EQUAÇÃO DOS ATRIBUTOS AJUSTADO POR RETSLAFF (2014).....	57



FIGURA 10 -	DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS A PARTIR DO SISTEMA DE EQUAÇÃO DOS ATRIBUTOS AJUSTADO POR EISFELD (2004).....	58
FIGURA 11 -	RESÍDUOS ENTRE OS VOLUMES OBSERVADOS E OS VOLUMES PROJETADOS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> PELOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES. (a) EISFELD (2004); (b) VIANA 1 (2016); (c) VIANA 2 (2016); (d) RETSLAFF (2014).....	61
FIGURA 12 -	VOLUMES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VOLUMES OBSERVADOS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> PELOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES. (a) EISFELD (2004); (b) VIANA 1 (2016); (c) VIANA 2 (2016); (d) RETSLAFF (2014).....	62
FIGURA 13 -	RESÍDUOS ENTRE OS VALORES OBSERVADOS E OS VALORES PROJETADOS DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> PELO SISTEMA DE MODELAGEM POR ÁRVORES INDIVIDUAIS DE MIRANDA (2016). (A) PROJEÇÃO DO DIÂMETRO (cm); (b) PROJEÇÃO DA ALTURA (m); (c) PROJEÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (ár.v.ha <sup>-1</sup> ); (d) PROJEÇÃO DA ÁREA BASAL (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ); (e) PROJEÇÃO DO VOLUME (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ).....	64
FIGURA 14 -	VALORES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DOS ATRIBUTOS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> PELO SISTEMA DE MODELAGEM POR ÁRVORES INDIVIDUAIS DE MIRANDA (2016). (a) PROJEÇÃO DO DIÂMETRO (cm); (b) PROJEÇÃO DA ALTURA (m); (c) PROJEÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (ár.v.ha <sup>-1</sup> ); (d) PROJEÇÃO DA ÁREA BASAL (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ); (e) PROJEÇÃO DO VOLUME (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ).....	65
FIGURA 15 -	RESÍDUOS ENTRE OS VOLUMES OBSERVADOS E OS VOLUMES PROJETADOS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> PELOS SISTEMAS (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) MIRANDA (2016); (d) SISPINUS.....	67
FIGURA 16 -	VOLUMES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VOLUMES OBSERVADOS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> PELOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES. (a) WOLF II (2012); (b) EISFELD (2004); (c) MIRANDA (2016); (d) SISPINUS .....	68

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2 -	EQUAÇÕES GLOBAIS AVALIADAS PARA PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	35
TABELA 2 -	SISTEMA DE PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> AJUSTADO POR VIANA (2016).....	38
TABELA 3 -	SISTEMA DE PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> AJUSTADO POR RETSLAFF (2014).....	40
TABELA 4 -	SISTEMA DE PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> AJUSTADO POR EISFELD (2004).....	41
TABELA 5 -	SISTEMA DE ÁRVORES INDIVIDUAIS DE <i>Pinus taeda</i> AJUSTADO POR MIRANDA (2016).....	42
TABELA 6 -	AMPLITUDE DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO DE DADOS.....	46
TABELA 7 -	RESUMO DOS DADOS DE AVALIAÇÃO EM NÚMERO DE PARCELAS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	47
TABELA 8 -	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA MODELAGEM GLOBAL NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	49
TABELA 9 -	ESTATÍSTICAS DA AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR MODELAGEM GLOBAL POR UNIDADE DE ÁREA NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	52
TABELA 10 -	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE VIANA (2016) UTILIZADAS PARA MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	54
TABELA 11 -	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE RETSLAFF (2014) UTILIZADAS PARA MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	54
TABELA 12 -	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE EISFELD (2004) UTILIZADAS PARA	

	MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	56
TABELA 13 -	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE EISFELD (2004) UTILIZADAS PARA MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	59
TABELA 14 -	ESTATÍSTICAS FINAIS DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR UNIDADE DE ÁREA NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	59
TABELA 15 -	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS POR MIRANDA (2016) PARA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	63
TABELA 16 -	ESTATÍSTICAS DA PROJEÇÃO DO VOLUME EM CLASSES DE IDADE POR UNIDADE DE ÁREA NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> .....	66

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	14
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
3.1 SETOR DE FLORESTAS PLANTADAS NO BRASIL .....	15
3.2 CARACTERÍSTICA DA ESPÉCIE PINUS TAEDA L. ....	16
3.3 MANEJO FLORESTAL.....	17
3.4 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	19
3.5 MODELAGEM DO POVOAMENTO TOTAL.....	22
3.6 MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO.....	24
3.6.1 fdp de Weibull.....	25
3.7 MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS .....	28
3.8 SIMULADORES DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO.....	30
3.8.1 SisPinus.....	31
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO E FONTE DE DADOS .....	33
4.2 SISTEMAS DE EQUAÇÕES GLOBAIS AVALIADOS .....	34
4.3 SISTEMAS DE MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO AVALIADOS .....	36
4.4 SISTEMA DE MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS AVALIADO .....	41
4.5 PROGNOSE DO VOLUME TOTAL NO SISPINUS.....	41
4.6 CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS .....	43
4.6.1 Avaliação dos sistemas de equações utilizados .....	43
4.6.2 Teste para avaliação do ajuste na modelagem em classes de diâmetro.....	44
4.6.3 Critérios estatísticos para avaliar a projeção do volume em diferentes classes de idade nos povoamentos de Pinus taeda .....	45
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS .....	46
5.2 AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR EQUAÇÕES GLOBAIS.....	47
5.2.1 Avaliação da equação de altura dominante.....	47
5.2.2 Avaliação das equações globais para estimativa da área basal e do volume ..	48
5.2.3 Avaliação da projeção do atributo volume em classes de idade .....	51

5.3 AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO .....	53
5.3.1 Avaliação das equações dos sistemas de atributos avaliados .....	53
5.3.2 Teste de qualidade dos ajustes das distribuições .....	58
5.4 AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS.....	62
5.4.1 Avaliação das projeções dos atributos do povoamento.....	62
5.5 COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DOS SISTEMAS AVALIADOS COM OS RESULTADOS ADVINDOS DO SISPINUS .....	66
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O plano estratégico de uma empresa de base florestal tem como intuito direcionar as estratégias da companhia num curto, médio e longo período de tempo. A responsabilidade é ainda maior quando a floresta está integrada ao abastecimento regular de uma fábrica, cujas estimativas imprecisas de suprimento de matéria-prima, no longo prazo, podem causar a interrupção de uma linha de produção ou até mesmo inviabilizar o investimento em uma nova planta.

O planejamento florestal gera a sequência de atividades que devem ser realizadas de modo a atingir os objetivos da empresa, tal como o máximo retorno financeiro para os seus proprietários. Manejar a floresta sem um plano traçado pode até ser efetivo num curto período de tempo para as atividades operacionais, no entanto, pode gerar resultados insatisfatórios no longo prazo e comprometer a sustentabilidade do empreendimento (DEMERS, 2001).

As decisões do manejo florestal a ser adotado são baseadas em informações sobre o estoque presente e a produção futura dos recursos existentes. Os inventários florestais fornecem as informações de volume somente no momento da medição. As florestas são sistemas biológicos dinâmicos que estão em constante mudança (crescimento), tornando-se necessário projetar essas mudanças para obter informações relevantes na tomada de decisão correta (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Para isso, os modelos de crescimento e produção, são essenciais para guiar as estratégias da empresa. Nos últimos anos, grandes esforços foram desencadeados para o desenvolvimento de modelos precisos que predizam as características futuras do povoamento, como volume, área basal, número de árvores por unidade de área, altura e distribuição dos diâmetros, considerando um período específico de tempo no ciclo de produção. Prognoses provenientes desses modelos podem ser requeridas para um período curto ou longo no tempo, visando volume total ou por tipo de produto e classe de diâmetro (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Recentemente, houve significativa evolução das ferramentas computacionais que auxiliam no processamento de um grande volume de informações, bem como da simulação de inúmeros cenários, envolvendo tanto a parte biológica quanto a econômica. No entanto, a chave do planejamento preciso e acurado advém de dados confiáveis e contínuos que representem as características de produção da floresta simulada.

Existem várias questões sobre qual meio é mais eficiente para ajustar modelos com propósitos diferentes. Na escolha do método de ajuste, os usuários dos modelos de crescimento e produção devem estar atentos ao nível de detalhamento demandado, visando uma tomada de decisão específica que considere a eficiência na geração da informação requerida. Se várias opções de manejo são simuladas, é desejável que se tenha um sistema de equações de crescimento e produção capaz de fornecer estimativas lógicas e consistentes, variando em seu nível de detalhamento (BURKHART; TOMÉ, 2012).

No Brasil, para o gênero *Pinus*, a maioria das grandes empresas utilizam modelos generalizados de povoamentos totais (globais) para construção dos cenários de produção futura (WOLF II, 2012; NASCIMENTO, 2015; ROMANIUK, 2015; SCHUCHOVSKI, 2015). Nesse gênero, o uso de sistemas de predição da produção mais complexos, como modelos de distribuição diamétrica (EISFELD, 2004; RETSLAFF, 2014; VIANA, 2016) e árvores individuais (MIRANDA, 2016), até o momento já foram explorados, mas pouco validadas em grande escala e implementadas operacionalmente.

Grande parte da dificuldade na avaliação de sistemas de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* se deve aos fatores: falta de séries temporais que abranjam todo o ciclo, ausência de dados consistentes, alto custo de remedição de parcelas permanentes, representatividade dos dados (sítios, idades e densidade), mudança do proprietário da terra, mudança do regime de manejo e da espécie utilizada, troca de material genético e dificuldade na criação e implementação de *scripts* e *softwares* que utilizem um sistema de equações mais complexo.

Assim, tendo em vista a importância e a complexidade do assunto no meio acadêmico e nas empresas florestais, torna-se imprescindível a condução de pesquisas que avaliem e validem sistemas de modelagem da produção para plantios de *Pinus taeda* L. em diferentes locais, visando recomendações para futuras pesquisas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar equações de crescimento e produção existentes na literatura para povoamentos de *Pinus taeda* L. estabelecidos no Sul do Brasil , baseados nas modelagens em nível de povoamento, em classes diamétricas e de árvores individuais.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Avaliar a predição do crescimento e da produção utilizando-se equações globais;
- Avaliar a predição do crescimento e da produção por modelagem em classes de diâmetro;
- Avaliar a predição do crescimento e da produção utilizando um sistema de modelagem de árvores individuais;
- Comparar resultados da simulação da produção de plantios de *Pinus taeda* obtidas a partir da avaliação da modelagem global, em classes de diâmetro e de árvores individuais com os resultados obtidos pelo simulador SisPinus.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 SETOR DE FLORESTAS PLANTADAS NO BRASIL

As árvores plantadas para fins industriais são fonte de centenas de produtos e subprodutos, e geram diversos serviços culturais, recreativos, turísticos e outros relacionados à pesquisa e à regulação do fluxo hídrico e de nutrientes. Por essa importante contribuição, o setor tem sido destaque na busca por soluções que atendam a um dos maiores desafios do século XXI: a crescente demanda por madeira, energia e fibras (IBÁ, 2016).

Produtos de origem florestal estão presentes no nosso dia a dia e vão desde os mais evidentes, como papel e móveis, até produtos de beleza, medicamentos, alimentos e roupas. Entre os segmentos que usam a madeira como principal matéria-prima, podem-se citar o de celulose e papel, o de painéis de madeira, o de pisos laminados, o de serrados e compensados, o de siderurgia a carvão vegetal e o de energia. Já no setor de bens de consumo, destacam-se as indústrias gráfica, de embalagem, moveleira, química, têxtil e farmacêutica e a construção civil (IBÁ, 2016).

O setor brasileiro de florestas é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no País. A área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 7,8 milhões de hectares em 2015, crescimento de 0,8% em relação ao ano de 2014. Os plantios de eucalipto ocupam 5,6 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). Os plantios de pinus ocupam 1,6 milhão de hectares e concentram-se no Paraná (42%) e em Santa Catarina (34%). (IBÁ, 2016).

A indústria brasileira de base florestal é mundialmente reconhecida pela alta produtividade das árvores plantadas no País. O setor brasileiro apresenta a maior produtividade (volume de madeira produzido por área ao ano) e a menor rotação (período entre o plantio e a colheita das árvores) do mundo. Esses altos índices são resultado dos investimentos contínuos das empresas do setor no Brasil para aprimorar o manejo florestal.

Em 2015, o Brasil manteve sua liderança no ranking global de produtividade florestal. A produtividade média dos plantios de eucalipto no Brasil, reportada pelas empresas de base florestal, foi de 36 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano, enquanto a dos plantios de pinus,

foi de 31 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano. Nos últimos cinco anos, a produtividade do eucalipto aumentou em uma taxa de 0,7% a.a., enquanto a do pinus apresentou um decréscimo de 1,1% a.a, em decorrência da conversão em áreas de eucalipto, especialmente no estado do Paraná (IBÁ, 2016).

### 3.2 CARACTERÍSTICA DA ESPÉCIE *Pinus taeda* L.

A família Pinaceae é a maior e mais importante da ordem Coniferae, abrangendo nove gêneros e duzentas e dez espécies. O gênero *Pinus* é o de maior destaque nessa ordem, abrangendo muitas espécies, amplamente distribuídas pelo Hemisfério Norte até os países tropicais e subtropicais nas Índias Ocidentais, Arquipélago das Filipinas, Antilhas, Ilhas Bahamas, México, Guatemala, Honduras, Nicarágua, com maior ocorrência nos climas temperados, mas sem ultrapassar o Equador (ALMEIDA, 1991). O *Pinus taeda* L. é uma das espécies florestais mais plantadas no mundo e a mais importante cultivada no Sul e Sudeste dos Estados Unidos (ZOBEL, 1982).

No Brasil diversas espécies de pinus vêm sendo plantadas há mais de um século. Muitas delas foram trazidas por imigrantes europeus para fins ornamentais e produção de madeira (SHIMIZU, 2006). Os primeiros estudos referentes às espécies dos chamados *Pinus* subtropicais foram conduzidos a partir de 1936 pelo atual Instituto Florestal de São Paulo, oportunidade em que foram introduzidas as primeiras sementes de *P. elliotii* var. *elliotii* e de *P. taeda*.

Durante o período desses incentivos, sob a experiência, aporte técnico e logístico do Instituto Florestal e da Companhia Agroflorestal Monte Alegre - CAFMA, muitos empreendimentos se estabeleceram na região central de São Paulo, notadamente nas terras fracas de cerrados e campos, onde foram criados Distritos Florestais. Foi, sem dúvida, o pólo florestal mais importante de *Pinus* spp. da época levando, também, a desenvolver núcleos para o Oeste (Mato Grosso do Sul) e para o Norte (Minas Gerais), onde também foram estabelecidas florestas de *Pinus* (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

As condições de adaptação do *Pinus* aos solos ligeiramente ácidos, que constituem a grande maioria dos solos do País, permitiram a implantação de extensas áreas que, juntamente com a adoção de práticas silviculturais adequadas, tornam as espécies deste gênero importante fonte de matéria-prima, proveniente de florestas

estabelecidas dentro dos padrões de sustentabilidade (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

A grande vantagem dos plantios de *Pinus* é sua flexibilidade no uso da madeira na produção de diversos produtos. Dentre esses, tem-se a celulose de fibra longa não branqueada, pasta mecânica, molduras, painéis de madeira reconstituída, lâmina, madeira serrada bruta e beneficiada, madeira bruta seca em estufa, móveis e pré-cortado para móveis, laterais de gavetas, palito de fósforo, lâmina de caixa de fósforos, grampo, prendedor de roupa, pazinha, cavaco, cerca, "pallet", compensado anatômico, sarrafo, refilado, caixa de brinquedo, tora, torete, lenha, porta, assoalho, meia-cana, prancha, tábua, forro, rodapé, tapete de sarrafo, papel e celulose, estrado, embalagem, embalagem pré-cortada e aplainada, ripão (SCHUCHOVSKI, 2003).

As espécies que mais tiveram destaque nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil foram *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (SHIMIZU, 2006), sendo a última a espécie de maior desenvolvimento na Região Sul, alcançando incremento médio anual (IMA) superior a  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$  aos 18 anos, apresentando um dos maiores níveis de produtividade do mundo (FERREIRA et al., 2001), bastante superiores aos das plantações dos Estados Unidos, onde a média de IMA na mesma idade é de  $14 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$  (IBÁ, 2016).

Tendo grande plasticidade e ampla variação de produtividade em função das condições edafoclimáticas, *Pinus taeda* pode ser plantado em regiões tropicais e subtropicais com altitudes entre 0 e 900 metros, precipitação média anual entre 900 e 2.200 milímetros, estação seca de 0 a 4 meses, temperatura média anual entre  $14^\circ\text{C}$  e  $24^\circ\text{C}$ , temperatura máxima média do mês mais quente entre  $20^\circ\text{C}$  e  $35^\circ\text{C}$  e temperatura mínima média do mês mais frio entre  $-2^\circ\text{C}$  e  $18^\circ\text{C}$ . É uma espécie tolerante a geadas, e suporta períodos de alagamento do solo bem como déficit hídrico (BOOTH; JOVANOVIC; NEW, 2002).

### 3.3 MANEJO FLORESTAL

O gestor do negócio florestal deve considerar a sua floresta como um capital que rende juros. Retirar sistematicamente quantias maiores do que os juros conduzirá à exaustão do capital. Também retirar sistematicamente menos do que os juros induzirá a um aumento exagerado do capital no final de um período longo de tempo. Então, existe a necessidade de se saber o que se tem no momento. Isto envolve a

quantificação do estoque em crescimento, assim como a produtividade e a produção esperada, o que envolve a avaliação da taxa de crescimento em idades sucessivas. Nesta parte o gestor obtém informações para a tomada de decisões sobre o que pode ser retirado de sua floresta para que ela se transforme num empreendimento permanente. A combinação dos dois itens: conhecimento do estoque e de sua produtividade fornece meios para planejar o abastecimento de indústrias florestais com diversos produtos na sua forma primária (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

De acordo com Scolforo (2006) o manejo florestal está centrado no conceito da utilização de forma sensata e sustentada dos recursos florestais, de modo que as gerações futuras possam usufruir pelo menos os mesmos benefícios da geração presente.

Essa terminologia, pode ser abordada segundo dois enfoques. O primeiro é de que o Manejo florestal é visto como uma prática em que o objetivo maior é aumentar a qualidade do produto final, sua dimensão e se possível a sua quantidade. Observando em todas as fases a viabilidade sócio-econômica e ambiental do processo produtivo. Um segundo enfoque, considera Manejo Florestal como um processo de tomada de decisão. Neste contexto o profissional florestal necessita ter uma visão global de planejamento florestal, utilizando-se para tal, modelos matemáticos que possibilitem a previsão da produção, assim como gerenciar toda esta gama de informações de planos de manejo em que a otimização seja a tônica do processo (SCOLFORO, 2006).

Sua função básica é conduzir o recurso florestal para o atendimento dos objetivos de uma organização. Antes de qualquer decisão técnica/operacional, deve vir o posicionamento estratégico, dados pela alta administração, normalmente traduzidos na missão e visão do negócio. Uma vez definidas as diretrizes estratégicas, o manejo florestal (no seu conceito mais amplo é o próprio gerenciamento florestal), lança mão dos recursos disponíveis para alcançar tais objetivos (SCOLFORO, 2006).

O manejo requer um plano de longo prazo aliado a sequência de atividades operacionais que visem atingir aos objetivos do negócio. Outros pontos a serem considerados são o reconhecimento da importância ecológica da floresta e os impactos sociais que todas as atividades podem causar nas comunidades envolvidas (BETTINGER et al., 2009).

Finalmente, o manejo florestal envolve a integração das práticas silviculturais com os objetivos do uso da floresta para determinado empreendimento visando sempre o máximo retorno do investimento para o proprietário da terra. O controle das atividades silviculturais é realizado para que a floresta permaneça sadia e vigorosa. As atividades podem abranger a produção de mudas, o plantio, o manejo integrado de pragas, o combate de plantas infestantes, adubação, aplicação de calcário, subsolagem, desbastes, podas, combate a incêndios, dentre outros. Cada etapa tem o seu custo e benefício e está atrelado ao objetivo do negócio como um todo (BETTINGER et al., 2009).

### 3.4 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

O crescimento de uma árvore ou de um povoamento é o mais importante fenômeno na floresta. Consiste no alongamento e engrossamento das raízes, tronco e galhos. Causa mudanças na árvore, influenciando o seu peso, volume e forma. O crescimento longitudinal de todas as partes da árvore é proveniente do meristema primário. Já o crescimento do diâmetro é proveniente do meristema secundário ou câmbio através da disposição de camadas justaposta do lenho (SCOLFORO, 2006).

Um modelo de crescimento é uma expressão da dinâmica natural dos povoamentos florestais, e pode envolver crescimento, mortalidade, e outras mudanças na composição e estrutura da floresta. Comumente o termo “modelo de crescimento” refere-se a um sistema de equações, os quais podem prever o crescimento e a produção de povoamentos florestais sob uma ampla variedade de condições (VANCLAY, 1994).

Utiliza-se a modelagem do crescimento e da produção para atender três objetivos principais de prever e projetar o crescimento: 1) do povoamento e auxiliar na tomada de decisões no plano de manejo; 2) em um local específico, para que sejam realizadas as análises de opções de investimento; 3) de povoamentos submetidos à diferentes regimes de manejo e práticas silviculturais (PHILLIP, 1994).

Os fatores mais relacionados com o crescimento e a produção dos plantios florestais, não considerando os tratos silviculturais, são o período de tempo do plantio, a qualidade do sítio e o nível de ocupação do talhão. Para plantios florestais equiâneos, esses fatores podem ser expressos pelas variáveis idade, índice de sítio e área basal, respectivamente (BURKHART; TOMÉ, 2012).

De acordo com Scolforo (2006), existem diferentes maneiras de se expressar o crescimento, podendo-se citar o incremento corrente anual (ICA) sendo o crescimento ocorrido ou a diferença na produção do elemento dendrométrico considerado dentro do período de um ano, incremento médio anual (IMA) dado pela razão entre a produção do elemento dendrométrico considerado a partir do ano zero e a idade da população florestal e o incremento periódico (IP) que expressa o crescimento do elemento dendrométrico considerado durante um determinado período no tempo.

É fundamental, a observação de que estudos de crescimento e produção até 1962, foram desenvolvidos sem que fosse observado o princípio de compatibilidade entre eles, ou seja, os modelos de crescimento eram desenvolvidos independentemente dos modelos de produção. Assim, quando sucessivos incrementos estimados eram adicionados a um volume inicial, eles geralmente não apresentavam os mesmos valores de volumes preditos pela equação de produção, considerando-se o mesmo povoamento nas mesmas condições de idade, sítio e densidade (SCOLFORO, 2006).

Segundo Burkhart (2012), os pesquisadores Buckman (1962) e Clutter (1963) foram os primeiros pesquisadores nos Estados Unidos que reconheceram a relação matemática entre a produção total e o incremento em suas análises. Esses autores resolveram o problema de incompatibilidade dos modelos com o uso do cálculo integral e diferencial. Da primeira derivada do modelo de produção, obteve-se o modelo de crescimento, e com o procedimento inverso, ou seja, com a integral do modelo de crescimento obteve-se o modelo de produção, de maneira que o problema de inconsistência entre a produção final e a soma dos crescimentos foi eliminada.

Para um determinado índice de sítio e um nível inicial de densidade, a produção (volume por unidade de área) se projeta pelas idades em forma de uma curva sigmoideal. A curva de produção (Figura 1a) pode ser denominada de curva integral e apresenta características com um crescimento inicial moderado, ascendendo convexamente até atingir o ponto de inflexão, onde passa a crescer de forma côncava para o eixo x passando pelo ponto de máxima tangência, seguindo seu crescimento a pequenas taxas com o avanço da idade até atingir o crescimento máximo ou valor assintótico (SCOLFORO, 2006).

A curva de incremento corrente anual (ICA), que é a primeira derivada da função de produção, sobe até o ponto de inflexão da curva de produção e depois sofre

um decréscimo. A curva de incremento corrente anual (ICA) alcança um máximo relativamente cedo na vida do povoamento e então declina. Seu máximo ocorre onde a forma da curva de produção é íngreme, ou seja, coincide com o ponto de inflexão da curva de crescimento acumulado. Já a curva de incremento médio anual (IMA) atinge seu máximo mais tarde, sendo interceptada pela curva de ICA em seu valor máximo. Destas relações, pode-se estabelecer que se o ICA é maior que o IMA este último deve estar ainda aumentando e quando o ICA é menor que o IMA este último deve estar decrescendo (SCOLFORO, 2006).

Plotados num gráfico de crescimento em função da idade (Figura 1b), quando a curva de IMA cruza a curva de ICA, tem-se o momento em que o crescimento atingiu seu máximo e nos fornece assim a idade técnica de rotação (BURKHART; TOMÉ, 2012). Essa informação tem considerável importância para o manejo, uma vez que define o momento de interferir na população, através de desbaste ou de corte raso. Assim para um proprietário florestal cujo objetivo é maximizar a produção de volume, a idade de rotação poder ser o “momento do máximo incremento médio anual” (SCOLFORO, 2006).

De acordo com Burkhart (2012), os modelos de crescimento e produção para florestas equiâneas podem ser classificados da seguinte forma:

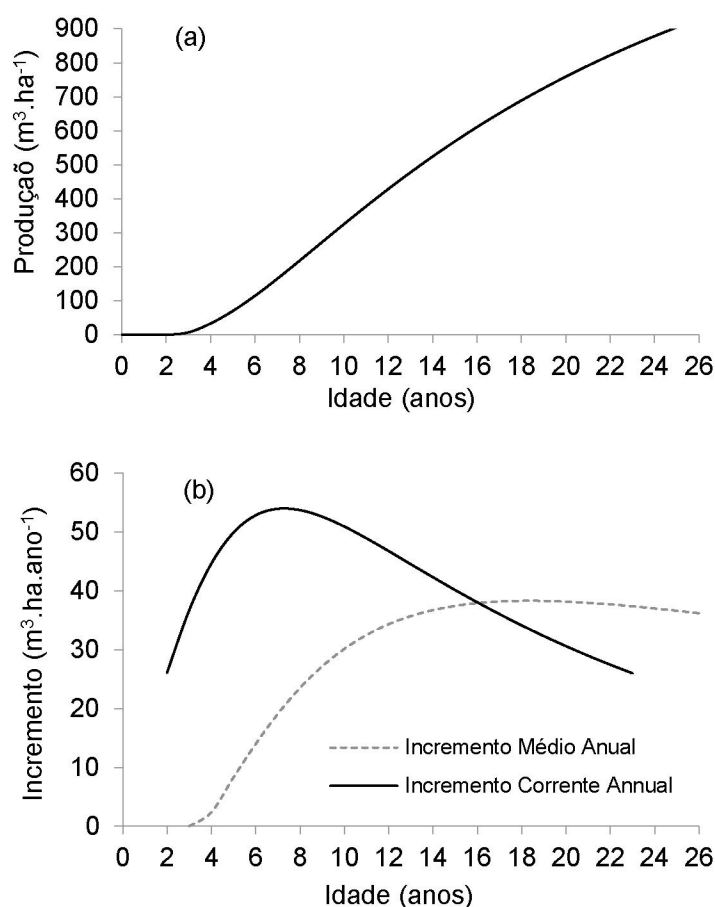
a) sistema de produção explícita ou modelos em nível de povoamento total; nos quais as variáveis de entrada ou de previsão básicas são geralmente idade, índice de sítio e densidade (número de árvores plantadas por unidade de área para plantações florestais, área basal inicial de povoamentos naturais).

b) sistemas de produção implícita ou de distribuição diamétrica (ou valores agregados): que utilizam as funções densidade de probabilidade (fdp's), e dependem de valores globais do povoamento como unidade básica de modelagem;

c) modelos para árvores individuais: que utilizam um sistema de equações para simular a dinâmica do povoamento por meio do incremento de cada árvore durante um período de crescimento. Podem ser subdivididos em duas categorias, conforme a disponibilidade da informação sobre a localização de cada árvore:

- independente da distância;
- dependente da distância.

FIGURA 1 - CURVAS DE PRODUÇÃO (a) E DE CRESCIMENTO (b).



FONTE: O autor (2017).

### 3.5 MODELAGEM DO POVOAMENTO TOTAL

Modelos pertencentes ao sistema de produção explícita são também denominados de modelos do tipo povoamento total. De acordo com Campos e Leite (2006), os modelos tipo povoamento total têm como melhor representante os modelos de densidade variável, os quais incluem a variável densidade como uma parte dinâmica do sistema de equações, sendo úteis quando o *output* pretendido é o volume por unidade de área, em especial em plantios não desbastados.

No Brasil, predomina o emprego desses modelos e sua grande utilização é justificada pelo maior percentual de plantios destinados a suprir a demanda dos setores de celulose, papel e carvão vegetal, cuja informação por unidade de área é suficiente para subsidiar o planejamento dessas empresas (MIRANDA, 2016).

Esses modelos geram tabelas de produção normal, empírica e de densidade variável. Nos modelos de produção normal, as tabelas são de dupla entrada, nas quais o volume máximo por unidade de área é função da idade e do sítio, fornecendo



estimativas do crescimento líquido e da produção de povoamentos puros de mesma idade e completamente estocados. Os modelos de produção empíricos são similares aos modelos de produção normais, mas ao invés de se basearem em unidades amostrais com densidade completa, baseiam-se em áreas de estoque médio. Já os modelos de produção de densidade variável apresentam tabelas de produção usando três variáveis independentes, com a adição da densidade (SCOLFORO, 1990).

De acordo com Campos e Leite (2009) o modelo de crescimento e produção do tipo povoamento global mais difundido no Brasil é o modelo de Clutter (1963). Esses mesmos autores, destacaram as quatro características desse modelo: (1) é do tipo povoamento total porque a variável estimada é o volume por unidade de área; (2) é do tipo densidade variável, permitindo estimar a produção para diferentes níveis de área basal inicial; (3) tem característica compatível, pois a equação de crescimento quando integrada fornece a equação de produção e a derivada desta resulta na equação de crescimento; (4) trata-se de um modelo explícito, porque a produção em volume é calculada diretamente.

O estudo que deu origem ao modelo de Clutter foi publicado no ano 1963 e teve como intuito expressar a relação entre crescimento e incremento em plantios de *Pinus taeda*, Clutter utilizou dados de 102 parcelas permanentes com 5 e 10 remedições distribuídas em três estados diferentes nos Estados Unidos. As equações desenvolvidas possibilitaram a estimativa de crescimento e incremento em área basal e volume. Ele concluiu que as equações ajustadas no trabalho apresentaram resultados consistentes e podem ser utilizadas para estimar a produção para várias idades e regimes de manejo.

Leite et al. (2001) avaliaram a eficiência do modelo de Clutter (1963) em povoamentos de *Pinus taeda* localizados no estado de Santa Catarina. A base de dados contou com 72 parcelas permanentes que foram medidas anualmente dos 7 aos 23 anos. O sistema de equações desenvolvido permitiu fazer a projeção do crescimento para diferentes idades e sítios. Ao final esse autor concluiu que o modelo testado foi muito eficiente na avaliação da produção presente e futura.

Ochi e Cao (2002) desenvolveram um modelo de crescimento e produção para plantios de *Pinus taeda* localizados no sudeste dos Estados Unidos. Esses autores utilizaram dados de 162 parcelas permanentes com idades entre 10 e 27 anos. O modelo desenvolvido forneceu resultados mais precisos de sobrevivência, área

basal e volume em relação aos modelos compatíveis de Sullivan e Clutter (1972) e Pienaar e Harrison (1989).

Wolff II (2012) desenvolveu um estudo de crescimento e produção em plantios de *Pinus taeda* localizados no Centro Sul do estado do Paraná com dados provenientes de análise de tronco completa em 144 árvores. Dentre os modelos testados, o modelo de Clutter (1963) foi o que resultou as melhores projeções da área basal e volume para os povoamentos estudados.

Nascimento (2015) avaliou o modelo de Clutter (1963) para predição do crescimento e da produção em plantios de *Pinus taeda* na região Norte do estado de Santa Catarina. Para realização do estudo foi utilizado dados de inventário contínuo de 2016 parcelas entre 5 e 33 anos de idade. Concluiu que o modelo de Clutter (1963) mostrou-se eficiente para estimativa do crescimento e da produção do ponto de vista estatístico e biológico.

Romaniuk (2015) realizou ajustes de modelos matemáticos para representar o crescimento e produção de plantios de *Pinus taeda* localizados na região centro-sul do Paraná. Ao final do estudo citou que o modelo de Clutter (1963) mostrou-se o mais adequado estatisticamente para estimativas de volume e área basal.

### 3.6 MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO

A distribuição de diâmetros é o meio mais simples e potente para descrever as propriedades de estrato de árvores. O diâmetro é bem correlacionado com outras variáveis importantes principalmente com o volume, preço, custos de conversão e especificações do produto. A quantificação da distribuição diamétrica e sua relação com o sítio, idade e densidade é frequentemente valiosa para propósitos econômicos e biológicos (BAILEY, 1973).

Na modelagem por classes de diâmetro, o número total de árvores por unidade de área é distribuído por meio do uso de funções de densidade e de probabilidade (fdp) as quais fornecem a frequência relativa dos indivíduos por classes de diâmetro. O emprego de uma equação de volume individual, tendo como entrada o centro e a altura de uma determinada classe de diâmetro, resulta no volume individual para essa classe. A produção total pode ser obtida da multiplicação desse volume pelo número de árvores observados nessa classe. A soma desses volumes resulta na produção total por unidade de área (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os diferentes modelos de fdp são diferenciados pela função que descreve a distribuição dos diâmetros (Weibull, SB de Johnson, Normal, Lognormal, Gama, dentre outras). Independente da função utilizada, para se ter as características futuras do povoamento utiliza-se o procedimento chamado de recuperação ou predição dos parâmetros, e que é normalmente ajustado pelo método de máxima verossimilhança, dos momentos ou de percentis (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Bailey e Dell (1973) citaram que muitos modelos para distribuição de diâmetros para povoamentos florestais foram propostos, mas nenhum exibe tantas características desejáveis como a função Weibull. De acordo com Guimarães (1994) existe um consenso sobre a superioridade da função Weibull, em relação às demais funções empregadas em amostras de distribuições diamétricas de florestas equiâneas. A explicação está no fato dessas florestas equiâneas tenderem a apresentar distribuições assimétricas à direita, em razão das árvores maiores apresentarem maiores taxas de crescimento que as árvores menores (efeito de competição), gerando uma configuração que coincide com as condições ideais para o ajuste da função Weibull.

### 3.6.1 fdp de Weibull

Scolforo e Machado (1996) desenvolveram um sistema de predição do crescimento e da produção com simulador de desbastes. Como base de dados utilizaram 1.204 parcelas permanentes de *Pinus caribea* com até seis remedições. A geração do sistema de crescimento e produção foi realizada a partir da fdp de Weibull. Como resultados foi verificado que os 10 regimes de manejo simulados se apresentaram consistentes. Os autores concluíram que o sistema desenvolvido constitui um instrumento que fornece estimativas confiáveis das características abordadas na população considerada.

Acerbi (2002) utilizou um sistema de prognose e produção de *Pinus taeda* com o objetivo de simular e avaliar economicamente diversos regimes de manejo no município de Jaguariaíva, estado do Paraná. O software *SPPinus* foi construído por Scolforo (1999) a partir de 432 parcelas permanentes. Esse sistema baseou-se na distribuição de Weibull de três parâmetros. O autor concluiu ao final que o modelo de crescimento e produção desenvolvido para a pesquisa expressou de forma precisa e sem tendenciosidade os atributos do povoamento.

Arce (2004) avaliou o comportamento de diferentes distribuições probabilísticas para descrever a estrutura diamétrica de plantios clonais de *Populus deltoides* localizados na Argentina. Dentre as seis funções testadas (normal, gama, Sb de Johnson, beta e Weibull com dois e três parâmetros) a fdp de Weibull com dois parâmetros apresentou excelentes estatísticas para as distribuições diamétricas nos plantios avaliados.

Ferraz Filho (2009) desenvolveu e validou um sistema de prognose em plantios de *Pinus taeda* localizados no norte do Uruguai. Utilizou 1.552 parcelas permanentes com idade variando entre 4 e 26 anos. Testou diversos modelos para compor o sistema de prognose e utilizou a fdp de Weibull para descrever a estrutura diamétrica futura do povoamento. Esse autor concluiu que na fase de validação o sistema de prognose apresentou uma boa capacidade de projeção apresentando valores de precisão e acurácia satisfatórios.

Retslaff (2014) desenvolveu um simulador para a prognose da produção em povoamentos de *Pinus taeda* utilizando Diagrama de Manejo da Densidade associado a modelagem em classes de diâmetro. Após ajustado um sistema de equações com os atributos do povoamento, desenvolveu um sistema de modelagem por classes de diâmetro utilizando a fdp de Weibull. Ao final comparou os resultados obtidos a partir do sistema de predição criado com estimativas geradas pelo SisPinus. O sistema desenvolvido foi capaz de prever os atributos do povoamento (diâmetro médio quadrático, número de árvores, área basal, altura dominante) gerando resultados válidos e compatíveis quando comparados com o programa SisPinus.

Considerando as diversas técnicas de recuperação e predição dos parâmetros, Santana (2008) citou que o método da máxima verossimilhança foi aplicado por BAILEY e DELL (1973), CAMPOS e TURNBULL (1981), FINGER (1982), GADOW (1983), GLADE (1986) e THIRSCH (1997). O método dos momentos foi empregado por BURK e NEWBERRY (1984), SCOLFORO (1990), THIRSCH (1997), ABREU (2000) e MAESTRI (2003). O método dos percentis foi utilizado por BAILEY e DELL (1973), CAO e BURKHART (1984), BORDERS et al. (1987), SILVA e BAILEY (1987), MAESTRI (1992), THIRSCH (1997), KANGAS e MALTAMO (2000) e MALTAMO et al. (2000).

Zarnoch (1985) testou dois métodos de predição dos parâmetros da fdp de Weibull em plantios de *Pinus taeda*. Concluiu que o método da máxima

verossimilhança apresentou maior precisão na estimativa dos parâmetros em relação ao método dos percentis.

Brooks (1992) utilizou o método dos percentis para predição da fdp de Weibull em plantios de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* localizados em várias regiões dos USA. Sua pesquisa contou com dados de 475 parcelas permanentes. Para projeção dos diâmetros percentis utilizou metodologia proposta por Borders (1987) a qual utiliza a análise de regressão para estimativa futura dos percentis da posição 0, 25, 50 e 95 e recupera os parâmetros da fdp de Weibull pelo método proposto por Bailey (1989). Com os ajustes realizados esse autor construiu com êxito tabelas de produção futuras por classe de diâmetro.

Eisfeld (2004) testou a fdp de Weibull para a estimativa do crescimento e da produção em florestas de *Pinus taeda* no município de Arapoti, estado do Paraná. Utilizou a distribuição de Weibull para estimativa das distribuições diamétricas a partir do método dos momentos. Para a validação das predições dos atributos, utilizou 70 parcelas independentes. Concluiu que os resultados foram satisfatórios para estimativa da frequência por classe de diâmetro, número de árvores, área basal e volume.

Santana (2008) desenvolveu um simulador da produção de plantios desbastados de *Eucalyptus grandis* testando diferentes possibilidades de obtenção dos parâmetros da função Weibull. Trabalhou com 151 parcelas localizadas no Nordeste no estado do Paraná. Mediu a eficiência dos diferentes métodos de obtenção dos parâmetros da Weibull por meio do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e calibração dos atributos estimados em relação aos observados em 15 parcelas independentes. Concluiu que o método mais adequado para realizar recuperação dos parâmetros foi o método de ajuste ótimo proposto por Barra (2004).

Cao (2004) testou dois novos métodos de máxima verossimilhança para obtenção dos parâmetros da fdp de Weibull em plantios de *Pinus taeda* localizados no estado de Louisiana, nos EUA. Utilizou dados de 20 parcelas permanentes com 8 remedições realizadas entre 5 e 21 anos de idade. Os novos métodos apresentados propiciaram os melhores resultados e o método de ajuste chamado de *Cumulative Distribution Function (CDF) Regression* apresentou as melhores estatísticas de qualidade dos ajustes das distribuições superando métodos comumente utilizados como os de percentis e dos momentos.

Schneider (2008) desenvolveu um estudo com o objetivo de estimar os parâmetros da fdp de Weibull para povoamento desbastados de *Pinus taeda* com a finalidade de prognosticar as frequências por unidade de área e classes de diâmetro. Os parâmetros da fdp foram recuperados pelo método de regressão aninhada proposto por Cao (2004). Nesse estudo foram utilizadas 366 parcelas permanentes localizadas no município de Telêmaco Borba, estado do Paraná. Segundo esse autor os resultados obtidos permitiram concluir que a distribuição diamétrica e sua dinâmica no tempo para diferentes situações de manejo podem ser descritas, com alta precisão, pela função de densidade probabilística de Weibull, utilizando o método de regressão aninhada.

Figura (2010), em um estudo realizado em plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Telêmaco Borba, estado do Paraná, testou o desempenho do uso do método dos momentos no ajuste da distribuição da Weibull e validou sua aplicação na descrição da estrutura diamétrica dos povoamentos, variando-se a estimativa do parâmetro de locação dessa distribuição.

Viana (2016) comparou método de predição e recuperação do parâmetros da fdp de Weibull na modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Pinus taeda* localizados no município de Telêmaco Borba no estado do Paraná. O autor ajustou modelos para projeção dos atributos do povoamento os quais produziram projeções consistentes e precisas. O método de recuperação dos parâmetros empregado para projeção dos coeficientes da função Weibull se mostrou superior ao método de predição dos parâmetros pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

### 3.7 MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Modelos de Árvores Individuais consistem num sistema de equações que simulam a dinâmica do povoamento por incrementos de cada árvore durante um dado período. O crescimento da árvore, a competição e a mortalidade compõe o sistema, de modo a estimar a produção total do povoamento. Essa metodologia também permite a estimativa de volume e produtos por classes de diâmetro. Os modelos de árvores individuais representam o mais alto nível de resolução dentre os métodos conhecidos de modelagem do crescimento e da produção (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os modelos de árvores individuais podem ser divididos em duas classes: dependentes e independentes da distância, os quais, respectivamente, utilizam ou não a localização das árvores como atributo de entrada no sistema de equação. Os modelos independentes da distância projetam o crescimento por indivíduos ou por classes de diâmetro em função do tamanho presente e de variáveis do povoamento, como idade, índice de sítio e área basa). Quando se usa essa classe, a distância das árvores não é necessária. Normalmente os modelos independentes da distância consistem em quatro componentes básicos: (1) crescimento em diâmetro, (2) crescimento em altura, (3) mortalidade e (4) competição. Já os modelos dependentes da distância incluem a localização de cada árvore em seu sistema de equações de competição (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Essa categoria de modelos de crescimento e produção foi proposta na década de 1960, sendo empregada há alguns anos nos Estados Unidos e na Europa. No Brasil, a maior parte dos trabalhos se restringem ao emprego de um de seus submodelos, sendo escassos aqueles que empregam a modelagem de árvores individuais em sua totalidade. Mais recentemente, são encontrados trabalhos publicados empregando-se essa categoria de modelo para povoamentos, em especial para eucalipto (MIRANDA, 2016).

Martins (2011) propôs um modelo completo de crescimento em nível de árvore individual para Eucalipto. Utilizou dados de 63 parcelas permanentes de plantios de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* localizadas no município de Monte Dourado no estado do Pará. O modelo de árvore individual superestimou, em média, 4% o volume projetado em relação ao volume real de parcelas testemunhas considerando três classes de produtividade e quatro idades de projeção diferentes. Ao final, a autora concluiu que o modelo de crescimento ajustado para árvore individual resultou em estimativas precisas e estatisticamente consistentes.

Considerando o gênero *Pinus*, Cao (2000) testou métodos iterativos de obtenção dos parâmetros de modelos de sobrevivência e crescimento em diâmetro para a modelagem de árvores individuais. Utilizou dados de 111 parcelas permanentes de plantios de *Pinus taeda* distribuídos no Sul dos Estados Unidos. De acordo com os resultados apresentados, o método proposto propiciou maior precisão em relação aos métodos tradicionais para a estimativa da sobrevivência e do crescimento em diâmetro.

Miranda (2016) propôs um sistema completo de modelagem de árvores individuais independente da distância a partir de dados provenientes de plantios de *Pinus taeda* localizados no município de Telêmaco Borba, no estado do Paraná. De acordo com o autor, o sistema de equações ajustado proporcionou resultados estatisticamente iguais às médias observadas. O modelo proposto foi o primeiro modelo completo de crescimento e de produção de árvores individuais para *Pinus taeda* no Brasil com resultados satisfatórios.

### 3.8 SIMULADORES DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO

Na elaboração de um plano de ordenamento florestal deve-se planejar a produção da empresa florestal que vise não somente a produção momentânea, mas também uma estrutura de empresa que permita em longo prazo uma produção e um manejo equilibrado. Para se atender a esse objetivo, torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas de construção de tabelas de produção florestal, baseadas em simuladores que possibilitem a determinação da tendência de desenvolvimento futuro de povoamentos florestais (WENDLING, 2007).

Um simulador do crescimento e produção florestal é a ferramenta que proporciona uma visão futura do povoamento e do efeito de práticas de manejo. Em função do modelo utilizado, podem-se ter simuladores que predizem em nível de povoamento, em classes diamétricas e de árvores individuais (CAMPOS e LEITE, 2009).

Para Sanquetta (1996), um modelo de simulação da produção florestal é como um sistema, geralmente de equações matemáticas implementadas em computador, que pode ser usado para prever o desenvolvimento de um povoamento florestal. Um modelo, para ser de fato simulador da produção florestal, deve propiciar condições ao usuário de investigar as consequências de interferências hipotéticas, naturais ou artificiais, na floresta objeto da modelagem.

De acordo com Wendling (2007) o uso de simuladores no meio florestal teve seus primeiros registros no ano de 1963. Desde então, com a evolução computacional, o desenvolvimento de simuladores de crescimento florestal só aumentou. Para plantios de *Pinus taeda* alguns simuladores podem ser citados como o PTAEDA (DANIELS e BURKHART, 1975), o PISAPRO (SCOLFORO, 1997) e o SisPinus (OLIVEIRA, 1995).



### 3.8.1 SisPinus

No Brasil o SisPinus é o sistema computacional mais utilizado para prognosticar o crescimento e a produção para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* (EISFELD, 2005). Ele vem sendo aplicado em grande escala desde 1989 por diversas empresas que possuem plantios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, no Sul do Brasil e países do Mercosul.

O programa SisPinus é um sistema para simulação do manejo, do crescimento e da produção de *Pinus*. Juntamente com o *software* PLANIN, ele tem sido utilizado para o planejamento estratégico da produção, definição de regimes de manejo, cálculo da produção florestal, sortimento de madeira e análise econômica, inclusive para os cálculos de captura de carbono e de exportação de nutrientes ao longo do processo de produção florestal (OLIVEIRA, 2011).

Para a construção inicial do modelo de crescimento e produção desse sistema, foram utilizados dados de altura total e diâmetro à altura do peito de árvores de *Pinus taeda*, provenientes de diversas parcelas localizadas em empresas florestais do Sul no Brasil e provenientes de 40 parcelas do Inventário Florestal Contínuo das florestas Nacionais de Irati, estado do Paraná, Três Barras, estado de Santa Catarina e São Francisco de Paula, estado do Rio Grande do Sul. As idades variavam de 6 a 30 anos, com média de 4 medições sucessivas. Duas de cada três parcelas haviam sofrido desbastes usuais (seletivos, sistemáticos ou a combinação destes). A validação e calibração ao longo dos anos dos modelos ajustados foi realizada com inventários contínuos em outras localidades e também em empresas florestais (OLIVEIRA, 1995).

Para a obtenção das equações de afilamento e equação de volume foram utilizados dados provenientes de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina, relativos à 200 árvores de *Pinus taeda*, nos quais foram medidos os diâmetros com casca na base das árvores e nas proporções dos 10%, 30%, 50%, 70% e 90% da altura total (OLIVEIRA, 1995).

De acordo com Oliveira (1995) esse simulador teve como base o *NCSU – Managed Pine Plantation Growth & Yield Simulator*, desenvolvido por William L. Hafley, professor de Ciências Florestais e Estatística da "*School of Forest Resources da North Carolina State University, USA*". A obtenção dos parâmetros da distribuição Sb de Johnson e da função de mortalidade, bem como a introdução destes resultados

no simulador, foi realizada na EMBRAPA Florestas com supervisão direta de W.L. Hafley em 1989/1990.

Para operacionalizar o sistema, o usuário deve fornecer os dados de inventário da floresta. Os inputs necessários para a utilização do sistema são (OLIVEIRA, 2011):

- Índice de sítio (idade índice de 15 anos);
- Número de árvores plantadas por hectare;
- Porcentagem de sobrevivência após um ano do plantio;
- Equação de volume (e unidades associadas);
- Tipo de desbaste (sistemático, seletivo ou misto);
- Idades selecionadas para os relatórios.

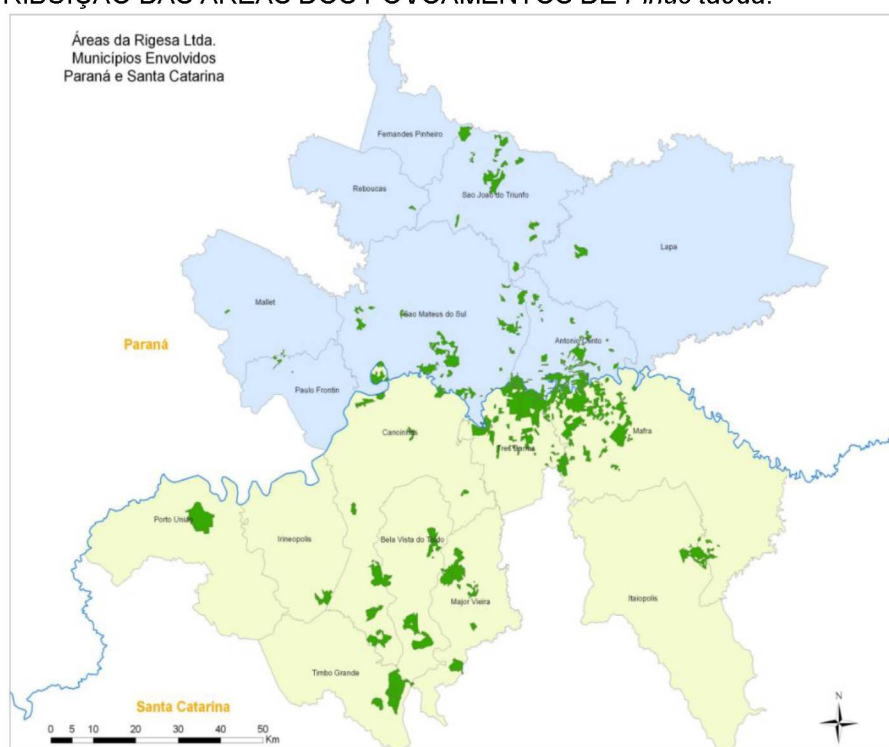
As tabelas de crescimento geradas pelo *software* SisPinus apresentam resultados anuais de alturas dominante e média das árvores, diâmetro médio, número de árvores por hectare, volume total e incrementos médio e corrente anual. Para cada colheita, tanto de desbastes como da rotação final, são geradas tabelas de produção por classe de DAP, com sortimento por tipo de utilização industrial como laminação, serraria, produção de celulose e geração de energia. Mostra, também, o crescimento e a produção da floresta, a produção por classes de diâmetro e o volume de madeira por tipo de utilização industrial (ex: laminação, desdobro, produção de celulose e geração de energia) (OLIVEIRA, 2011).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO E FONTE DE DADOS

Os dados para a avaliação dos sistemas de crescimento e produção foram cedidos pela empresa *WestRock* localizada no município de Três Barras, Norte do estado de Santa Catarina. A área de estudo compreende 19 municípios localizados nos estados do Paraná e Santa Catarina (Figura 2).

FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.



FONTE: O autor (2017)

Na região de Três Barras, o clima é do tipo Mesotérmico Úmido (Cfb) segundo a classificação de Köppen, em que a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C e a do mês mais frio inferior a 18°C. A precipitação tem distribuição equilibrada em todos os meses, com média de 1.800 mm por ano e sem déficit hídrico. As classes de solos predominantes nos plantios estudados, seguindo o método de classificação da Embrapa (2006), são: Argissolos amarelos e vermelhos, Nitossolos vermelhos, Cambissolos húmicos e háplicos e Neossolos flúvicos.

Os dados utilizados para essa avaliação foram provenientes de remedições de 104 parcelas permanentes alocadas em povoamentos de *Pinus taeda* sem desbaste, com dimensões de 20 m x 20 m. As medições ocorreram ao longo de 24 anos a partir do ano de 1988, sendo que a amplitude de idade foi de 5 a 22 anos. As remedições das parcelas ocorreram nos intervalos de um ou dois anos resultando no total de 682 pares de dados remediados.

A altura dominante de cada parcela foi obtida pelo critério proposto por Assmann (1970) a partir da altura média das 100 árvores de maior diâmetro por hectare. A estimativa da altura dominante em função da idade, assim como a classificação de sítios na idade índice de 18 anos, foi realizada em função da equação apresentada por Miranda (2016):

$$h_{dom} = 41,224399[1 - e^{(-0,061832I)}]^{1,156161} \quad (1)$$

Em que:  $h_{dom}$  = altura dominante (m); e  $I$  = idade do povoamento (anos).

Para a estimativa do volume individual das árvores de *Pinus taeda*, foi utilizado o modelo de Pienaar (1988) ajustado pela empresa *WestRock* a partir da cubagem de 360 árvores nas parcelas utilizadas neste estudo.

## 4.2 SISTEMAS DE EQUAÇÕES GLOBAIS AVALIADOS

Na Tabela 1 são apresentados os sistemas de equações avaliados com suas respectivas estatísticas de ajuste e precisão. O primeiro sistema avaliado foi ajustado por Wolff II (2012) para o modelo global de Clutter (1963). Os dados para realização do ajuste foram coletados a partir de análise de tronco completa de 144 árvores pertencentes a povoamentos de *Pinus taeda* localizados na região Centro Sul do estado do Paraná. Esses plantios ocupavam uma área de cerca 2.892 ha e foram implantados entre 1992 e 2005, com densidade inicial de 1.111 a 1.600 árv.ha<sup>-1</sup>.

O segundo sistema de equações avaliado foi ajustado por Nascimento (2015) também para o modelo global de Clutter (1963). Os dados utilizados na pesquisa foram provenientes da remedição de 216 parcelas permanentes instaladas em

plantios de *Pinus taeda* localizados no Norte do estado de Santa Catarina. A idade dos plantios variou entre 5 e 30 anos.

O terceiro sistema foi ajustado por Romaniuk (2015) que utilizou dados de 125 parcelas permanentes instaladas em plantios de *Pinus taeda* localizados no Centro Sul do estado do Paraná, com área total de aproximadamente 1.000 ha. A idade dos plantios avaliados variou de 5 a 18 anos.

TABELA 1 - EQUAÇÕES GLOBAIS AVALIADAS PARA PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Atributo	Equação	R <sup>2</sup> adj	S <sub>yx</sub> %
Clutter (1963) - Wolf II (2012)			
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$Ln(G_2) = Ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 4,8519 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) + 0,0070 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right)S$ (2)	0,977	7,67
Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$Ln(V_2) = 3,3097 + \left(\frac{-9,3418}{I_2}\right) + 0,0134S + 0,7811Ln(G_2)$ (3)	0,977	10,66
Clutter (1963) - Nascimento (2015)			
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$Ln(G_2) = Ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 4,6834 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) + 0,0055 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right)S$ (4)	0,955	5,58
Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$Ln(V_2) = 2,9475 + \left(\frac{-10,3349}{I_2}\right) + 0,0068S + 0,9727Ln(G_2)$ (5)	0,995	6,13
Clutter (1963) - Romaniuk (2015)			
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$Ln(G_2) = Ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 4,571 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) + 0,021 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right)S$ (6)	0,650	9,05
Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$Ln(V_2) = 2,453 + \left(\frac{-4,564}{I_2}\right) + 0,002S + 1,077Ln(G_2)$ (7)	0,890	6,63
Sullivan e Clutter (1972) - Schuchovski (2014)			
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$ln(G_2) = \left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right)ln(G_1) + 3,6365 \left[1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right)\right] + 0,0548S \left[1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right)\right]$ (8)	0,950	6,77
Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	$ln(V_2) = 0,8425 + 0,0337S - 5,7676 \left(\frac{1}{I_2}\right) + 1,2406ln(G_2)$ (9)	0,974	8,66

Em que:  $V_2$  = volume futuro (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $G_2$  = área basal estimada na idade de projeção (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $G_1$  = número área basal na idade atual (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $I_2$  = idade de projeção (anos);  $I_1$  = idade inicial (anos);  $N_1$  = número de árvores na idade atual (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $S$  = índice de sítio (m); e  $Ln$  = logaritmo neperiano.  
 FONTE: O autor (2017).

O quarto sistema avaliado foi ajustado por Schuchovski (2014) para o modelo global de Sullivan e Clutter (1972). Nesse estudo, a autora utilizou dados de 1.472 parcelas permanentes instaladas em povoamentos de *Pinus taeda* localizados no Sudeste e Nordeste do estado do Paraná, Norte de Santa Catarina e Sudoeste de São Paulo. Esses plantios tinham entre 3,7 e 33,2 anos e densidade inicial de 1.333 árv.ha<sup>-1</sup> e 1.666 árv.ha<sup>-1</sup>.

### 4.3 SISTEMAS DE MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO AVALIADOS

Para a estimativa das alturas de cada classe de diâmetro em todas as avaliações, foi utilizada a equação hipsométrica genérica ajustada por Schuchovski (2014), que apresentou em seus resultados um  $R^2_{adj} = 0,9501$  e  $S_{YX\%} = 6,77$ .

$$h = 5,19024 + 0,31069d_i + 1,35108h_{dom} - 5,45576\ln(h_{dom}) - 0,00624(d_i h_{dom}) - 0,09678d_g \quad (10)$$

Em que:  $h$  = altura total estimada (m);  $h_{dom}$  = altura média das árvores dominantes na idade atual (m);  $d_g$  = diâmetro médio quadrático na idade de projeção; e  $d_i$  = diâmetro do centro da classe (cm).

Na avaliação da modelagem em classes de diâmetro, optou-se por avaliar sistemas que utilizavam a fdp de Weibull com 3 parâmetros. Os parâmetros dessa função foram obtidos pela seguinte formulação:

$$F(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} e \left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (11)$$

Integrando-se essa função obteve-se as distribuições acumulativas:

$$f(x) = 1 - e \left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (12)$$

Para calcular a probabilidade da ocorrência de árvores em cada classe de diâmetro, utilizou-se:

$$P(Li < x < Ls) = \left\{ e \left[-\left(\frac{Li-a}{b}\right)^c\right] \right\} - \left\{ e \left[-\left(\frac{Ls-a}{b}\right)^c\right] \right\} \quad (13)$$

Em que:  $F(x)$  = fdp da Weibull;  $x$  = variável aleatória, representando o diâmetro à altura do peito (DAP);  $a$  = parâmetro de locação, representando o diâmetro mínimo;  $b$  = parâmetro responsável pela escala, que define a amplitude da distribuição;  $c$  = parâmetro responsável pela forma.  $P(Li < x < Ls)$  = probabilidade de  $x$  estar entre  $Li$  e  $Ls$ ;  $Li$  = limite inferior da classe de diâmetro (cm); e  $Ls$  = limite superior da classe de diâmetro. Com:  $a \leq x < \infty$ ,  $a \geq 0$ ,  $b$  e  $c > 0$ .

Na ausência de uma equação ajustada, as estimativas do diâmetro médio quadrático ( $d_g$ ), variância dos diâmetros ( $s^2d_2$ ) e da média aritmética do diâmetro à altura do peito ( $\bar{d}$ ) utilizaram as seguintes formulações (SCOLFORO, 1990):

$$d_g^2 = \frac{G}{0,0000785398N} \quad (13)$$

$$\bar{d} = (d_g^2 - s^2d_2)^{0,5} \quad (14)$$

Em que:  $d_g$  = diâmetro médio quadrático (cm);  $\bar{d}$  = média aritmética dos diâmetros à altura do peito (cm);  $N$  = número de árvores estimado a partir do modelo de sobrevivência (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $G$  = área basal estimada a partir do melhor modelo de projeção da área basal ajustado (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>); e  $s^2d_2$  = variância dos diâmetros obtida do modelo de variância.

O primeiro sistema de projeção do crescimento e produção avaliado nessa categoria foi construído por Viana (2016). No estudo que deu origem a esse sistema, esse autor comparou um método de predição e outro de recuperação dos parâmetros da fdp de Weibull na modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Pinus taeda* pertencentes a empresa Klabin S.A. localizados nos Campos Gerais do estado do Paraná. Utilizou dados de 826 parcelas permanentes com idades entre 3 e 20 anos. O material genético desses plantios foram provenientes de pomar clonal de sementes de 1ª geração não desbastados da própria empresa. Na Tabela 2 são apresentadas as equações que compuseram o sistema de projeção dos atributos do povoamento.

Para a avaliação do sistema construído por Viana (2016), optou-se por avaliar os dois métodos de obtenção dos parâmetros da fdp de Weibull. No primeiro método, intitulado nesse trabalho de Viana 1 (2016), fez-se a recuperação dos parâmetros via método dos momentos utilizando a metodologia descrita por Scolforo (1998).

TABELA 2 - SISTEMA DE PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* AJUSTADO POR VIANA (2016).

Atributo/Autor	Equação	R <sup>2</sup> adj	S <sub>YX</sub> %
Sobrevivência (ár.v.ha <sup>-1</sup> ) Lenhart	$N_2 = N_1 \cdot \exp \left[ -0,0204764(I_2 - I_1) + 0,0954373 \left( \ln \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \right) \right]$ (15)	0,976	2,10
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ) Clutter (1980)	$G_2 = 0,021262 + \ln(G_1) \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + 4,39364 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + 0,005066 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S$ (16)	0,974	4,51
Diâmetro Mínimo (cm) Retslaff (2010)	$D_{min2} = 0,6431 + 0,7629D_{min1} - 3,1226 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + 0,2451dg_2$ (17)	0,829	15,50
Variância dos Diâmetros Santana (2008)	$s^2d_2 = 0,1174 + 1,2271s^2d_1 - 0,5510G_1 + 0,4656G_2$ (18)	0,937	21,03
Diâmetro Máximo Nogueira (2003)	$D_{max2} = D_{max1} \exp \left( -0,0771(I_2^{2,1581} + I_1^{2,1581}) \right)$ (19)	0,956	3,92

Em que:  $N_2$  = número de árvores na idade de projeção (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $N_1$  = número de árvores na idade atual (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $I_2$  = idade de projeção (anos);  $I_1$  = idade inicial (anos);  $G_2$  = área basal estimada na idade de projeção (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $G_1$  = número área basal na idade atual (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $S$  = índice de sítio;  $h_{dom}$  = altura média das árvores dominantes na idade atual (m);  $h_{dom2}$  = altura média das árvores dominantes na idade de projeção (m);  $D_{min1}$  = diâmetro mínimo estimado na idade atual (cm);  $D_{min2}$  = diâmetro mínimo estimado na idade de projeção (cm);  $s^2d_1$  = variância dos diâmetros na idade atual;  $s^2d_2$  = variância dos diâmetros na idade de projeção;  $\bar{d}_2$  = média do diâmetro à altura do peito na idade futura (cm);  $dg_2$  = diâmetro médio quadrático na idade de projeção;  $D_{max1}$  = diâmetro máximo na idade atual (cm); e  $D_{max2}$  = diâmetro máximo na idade futura (cm).

FONTE: O autor (2017).

Para a obtenção dos parâmetros de localização, escala e forma da função de Weibull, foram utilizadas as seguintes equações descritas por Arce (2004).

Parâmetro de localização ( $a$ )

$$a = \frac{[\bar{d} - (dg - D_{min})]}{\left[ 1 - \frac{1}{n \left( 1 + \frac{1}{c} \right)} \right]} \quad (20)$$

Parâmetro de escala ( $b$ ):

$$b = \left[ \frac{\bar{d} - D_{min}}{r \left( 1 + \frac{1}{c} \right)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{1}{n \left( 1 + \frac{1}{c} \right)} \right] \quad (21)$$



Parâmetro de forma ( $c$ ) que foi obtido por método iterativo:

$$dg^2 = \bar{d}^2 + (\bar{d} - D_{min})^2 \frac{\left[ \frac{\Gamma(1+\frac{1}{c})}{\Gamma(1+\frac{1}{c})^2} \right]^{-1}}{\left[ 1 - \left( \frac{1}{n} \right)^{(1+\frac{1}{c})} \right]^2} \quad (22)$$

Em que:  $dg$  = diâmetro médio quadrático (cm);  $\bar{d}$  = diâmetro médio aritmético (cm);  $D_{min}$  = diâmetro mínimo (cm);  $n$  = número de diâmetros;  $\Gamma$  = função gama;  $a$  = parâmetro de locação;  $b$  = parâmetro de escala; e  $c$  = parâmetro de forma.

No segundo método, intitulado nesse trabalho como Viana 2 (2016), os parâmetros da fdp de Weibull foram obtidos por predição. Nas equações ajustadas, esse autor obteve para estimativa do parâmetros de locação ( $a$ )  $R^2_{adj} = 0,8976$  e  $S_{YX\%} = 0,67$ , para o parâmetro de escala ( $b$ )  $R^2_{adj} = 0,9737$  e  $S_{YX\%} = 3,99$  e para o de forma ( $c$ )  $R^2_{adj} = 0,8781$  e  $S_{YX\%} = 2,05$ . A seguir são apresentadas as equações ajustadas:

$$a = -0,9689 + 0,10141dg + 0,03284d_{max2} + 0,81809d_{min2} + 0,01632I + 0,00297 \frac{sd_2}{d} + 0,01056S \quad (23)$$

$$b = 0,60169 - 1,134a - 0,062d_{max2} + 0,1250d_{min2} + 1,0789dg \quad (24)$$

$$c = 2,5689 + 0,46716b + 0,49076d_{min2} - 0,6253dg + 0,08641\bar{d} \quad (25)$$

Em que:  $dg$  = diâmetro médio quadrático (cm);  $d_{min2}$  = diâmetro mínimo na idade de predição (cm);  $d_{max2}$  = diâmetro máximo na idade de predição (cm);  $I$  = Idade (anos);  $sd_2$  = variância dos diâmetros na idade de predição;  $\bar{d}$  = diâmetro médio aritmético (cm);  $a$  = parâmetro de locação (VIANA, 2016);  $b$  = parâmetro de escala (SANTANA, 2008); e  $c$  = parâmetro de forma (RETSLAFF, 2010).

O segundo sistema de modelagem em classes de diâmetro avaliado foi composto por um sistema de equações ajustadas por Retslaff (2014), em estudo realizado com dados de povoamentos de *Pinus taeda* localizados em empresas privadas de várias regiões do estado do Paraná. As parcelas permanentes utilizadas nesse estudo totalizaram 1.023, com cerca de 18% dessas tendo sofrido ao menos um desbaste. Na Tabela 3 apresentam-se as equações do sistema de projeção dos

atributos. Para esse sistema, a obtenção dos parâmetros da fdp de Weibull foi realizada pelo método dos momentos (ARCE, 2004), como descrito anteriormente.

TABELA 3 - SISTEMA DE PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* AJUSTADO POR RETSLAFF (2014).

Atributo/Autor da Equação	Equação	R <sup>2</sup> adj	S <sub>yx</sub> %
Sobrevivência (ár.v.ha <sup>-1</sup> ) Feducia (1979)	$N_2 = \frac{N_1}{\left[ \exp\left( I_2(-0,00030196 \ln(N_1) - 0,00017481 h_{dom2} + 0,00182339 h_{dom2}^{0,5}) \right) \right]}$	0,983	1,64
Diâmetro Médio Quadrático Reineke (1933)	$\log(N_2) = 5,50923306 - 1,76714142 \log((dg_2)) \quad (27)$	0,823	26,31
Diâmetro Médio Retslaff (2014)	$\bar{d}_2 = -0,06293607 + 0,99024359(dg_2) \quad (28)$	0,992	0,60
Diâmetro Mínimo (cm) Santana (2008)	$D_{min2} = 4,202950694 - 2,811086420\bar{d}_2 - 2,051990802s^2d_2 - 2,540037045 \ln(G_2) + 3,954599539(dg_2) \quad (29)$	0,931	8,05

Em que:  $N_2$  = número de árvores na idade de projeção (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $N_1$  = número de árvores na idade atual (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $I_2$  = idade de projeção (anos);  $I_1$  = idade inicial (anos);  $G_2$  = área basal estimada na idade de projeção (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $G_1$  = número área basal na idade atual (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $S$  = índice de sítio;  $h_{dom}$  = altura média das árvores dominantes na idade atual (m);  $h_{dom1}$  = altura média das árvores dominantes na idade atual (m);  $h_{dom2}$  = altura média das árvores dominantes na idade de predição (m);  $D_{min2}$  = diâmetro mínimo estimado na idade de projeção (cm);  $s^2d_2$  = variância dos diâmetros na idade de projeção;  $\bar{d}_2$  = média do diâmetro à altura do peito na idade futura (cm);  $dg_1$  = diâmetro médio quadrático na idade atual; e  $s^2d_1$  = variância dos diâmetros na idade atual.

FONTE: O autor (2017).

O terceiro sistema avaliado foi construído por Eisfeld (2004) com dados de plantios de *Pinus taeda* localizados no município de Arapoti, estado do Paraná. A autora utilizou informações de 325 parcelas permanentes com duas a três medições, variando entre 4 e 25 anos de idade localizados em diferentes sítios. Esses povoamentos foram implantados com dois espaçamentos diferentes, resultando numa densidade inicial de 1.667 árv.ha<sup>-1</sup> e 2.222 árv.ha<sup>-1</sup>. A equações ajustadas desse sistema são apresentadas na Tabela 4. A obtenção dos parâmetros da FPD de Weibull também foi realizada pelo método dos momentos, conforme Arce (2004).

TABELA 4 - SISTEMA DE PROJEÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* AJUSTADO POR EISFELD (2004).

Atributo/Autor da Equação	Equação	R <sup>2</sup> adj	S <sub>YX</sub> %
Sobrevivência (ár.v.ha <sup>-1</sup> ) Silva (1987)	$N_2 = N_1 \cdot \exp[76,16092(0,999835^{I_2} - 0,999835^{I_1})]$ (30)	0,987	1,94
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ) Eisfeld (2004)	$G_2 = \ln(G_1) - 4,78032 \left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right) + 0,653767 (\ln(N_2) - \ln(N_1)) + 0,51379(\ln(h_{dom2}) - \ln(h_{dom1}))$ (31)	0,986	3,31
Variância dos Diâmetros Eisfeld (2004)	$s^2 d_2 = 1,0134s^2 d_1 - 0,1720dg_1 + 4,7507 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)$ (32)	0,978	8,08

Em que:  $N_2$  = número de árvores na idade de projeção (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $N_1$  = número de árvores na idade atual (ár.v.ha<sup>-1</sup>);  $I_2$  = idade de projeção (anos);  $I_1$  = idade inicial (anos);  $G_2$  = área basal estimada na idade de projeção (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $G_1$  = área basal na idade atual (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $S$  = índice de sítio (m);  $h_{dom}$  = altura média das árvores dominantes na idade atual (m);  $h_{dom1}$  = altura média das árvores dominantes na idade atual (m);  $h_{dom2}$  = altura média das árvores dominantes na idade de predição (m);  $s^2 d_2$  = variância dos diâmetros na idade de projeção;  $dg_1$  = diâmetro médio quadrático na idade atual; e  $s^2 d_1$  = variância dos diâmetros na idade atual.

FONTE: O autor (2017).

#### 4.4 SISTEMA DE MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS AVALIADO

O sistema de Árvores Individuais avaliado é apresentado na Tabela 5. Esse conjunto de equações foram ajustadas por Miranda (2016), com dados de 1.396 parcelas permanentes de plantios de *Pinus taeda* localizados no município de Telêmaco Borba no estado do Paraná. O plantio tinha como características uma densidade inicial de 1.600 árv.ha<sup>-1</sup>, ausência de desbastes, idade de medição de 3 a 21,4 anos e material genético proveniente de pomares de 1ª geração pertencentes à empresa.

#### 4.5 PROGNOSE DO VOLUME TOTAL NO SisPinus

Para a realização da projeção realizada no SisPinus, utilizou-se o *FlorExel* (versão 3.8.68) desenvolvido pela empresa Optimber, cuja principal função foi auxiliar no processamento de informações florestais no ambiente da planilha eletrônica do *Microsoft Office Excel*. O módulo Simulação Florestal do FlorExel foi utilizado nesta pesquisa, o qual internamente aciona o simulador SisPinus (STALL, 2012).

A equação de sítio padrão do SisPinus utilizada foi:  
 $S. exp\left(-4,6433*\left(\left(\frac{1}{Idade}\right)^{0,56}\right)-\left(\left(\frac{1}{15}\right)^{0,56}\right)\right)$ . Os *inputs* das simulações foram: área basal (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>), índice de sítio (m), densidade (árvo.ha<sup>-1</sup>) e a idade (anos), em que as condições eram conhecidas. O grau de homogeneidade selecionado foi igual a 5.

TABELA 5 - SISTEMA DE ÁRVORES INDIVIDUAIS DE *Pinus taeda* AJUSTADO POR MIRANDA (2016).

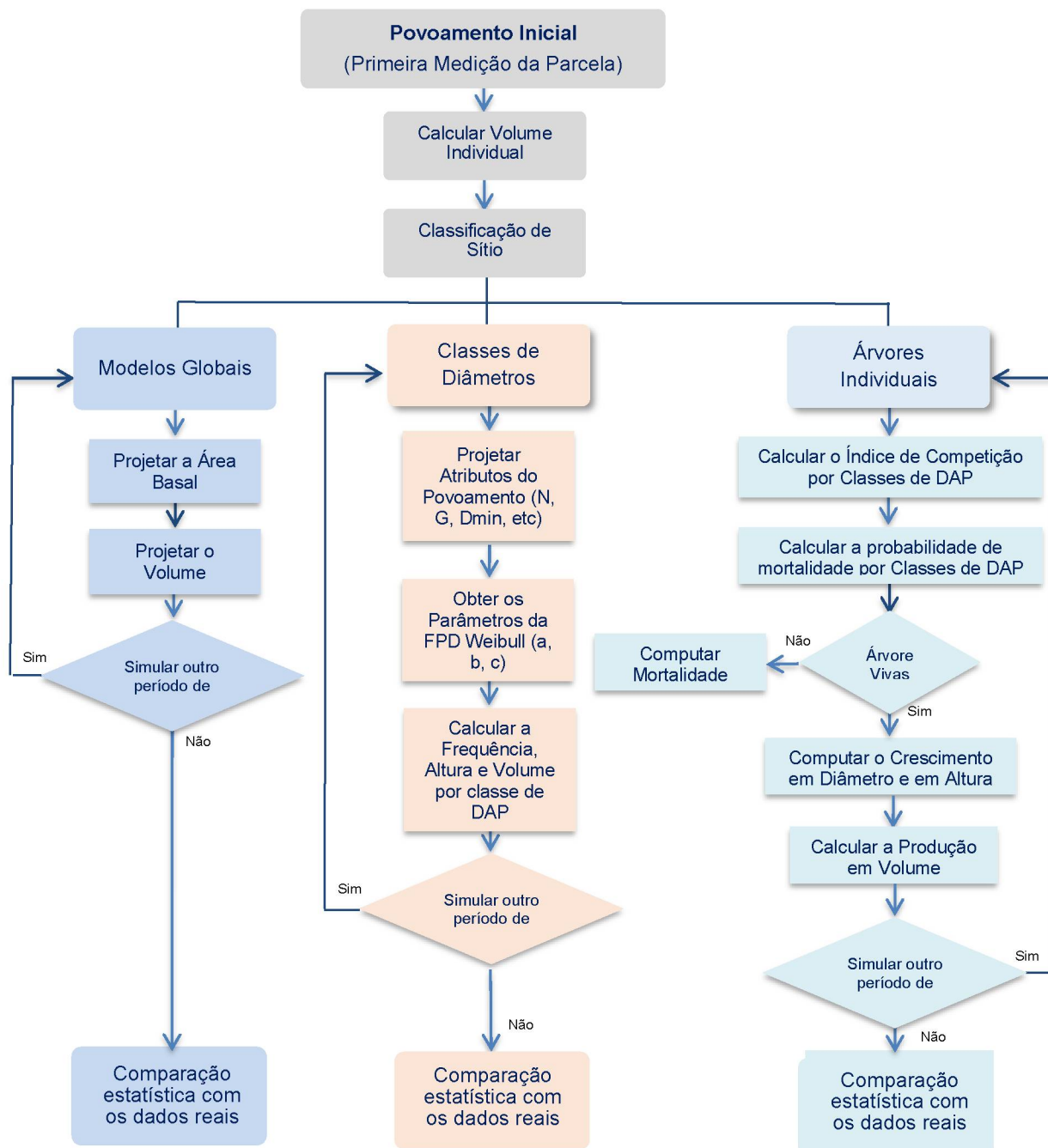
Atributo/Autor	Equação	R <sup>2</sup> adj	S <sub>YX</sub> %
Probabilidade de Mortalidade Martins (2011)	$Pm = 0,0043 + exp^{(-6,087-0,0177IC-0,0262 CC_d+0,2321I-0,7921G_{classe}+0,0535S)}$	0,987	1,94
Índice de Competição Stage (1973)	$IC = (d_i \bar{d}^{-1})^2$ (33)	-	-
Índice de Competição 1 Glover e Hool (1979)	$IC_1 = (d_i \bar{d}^{-1})^2$ (34)	-	-
Índice de Competição 2 Lorimer (1983)	$IC_2 = \sum_{j=1}^n d_j d_i^{-1}$ (35)	-	-
Diâmetro futuro (cm) Miranda (2016)	$d_2 = -1,0818 + 0,92299d_1 + 0,12225I_2 + 0,0967S - 0,0578G + 1,7812IC_1$ (36)	0,960	5,76
Altura futura (m) Miranda (2016)	$h_2 = 1,1139 + 0,3231h_1 + 0,6614I_2 + 0,1468S - 0,0517G - 0,03322IC_2$ (37)	0,970	5,91

Em que:  $Pm$  = probabilidade de mortalidade por classe diamétrica;  $IC_i$  = índice de competição;  $CC_d$  = centro da classe diamétrica (cm);  $I$  = idade da parcela (anos);  $G_{classe}$  = área basal da classe diamétrica (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>.classe);  $d_i$  = diâmetro à altura do peito da árvore-objeto (cm);  $d_j$  = diâmetro à altura do peito das árvores competidoras (cm);  $\bar{d}$  = média aritmética dos diâmetros à altura do peito das árvores da unidade amostral (cm);  $g_i$  = área transversal das árvores maiores à árvore-objeto (m<sup>2</sup>);  $d_2$  = diâmetro à altura do peito na idade de projeção (cm);  $d_1$  = diâmetro à altura do peito na idade atual (cm);  $I_2$  = idade de projeção (anos);  $S$  = índice de sítio (m);  $G$  = área basal (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>);  $h_2$  = altura na idade de projeção (m); e  $h_1$  = altura na idade atual (m).

FONTE: O autor (2017).

Na Figura 3 é possível observar o fluxograma para realização do cálculo da projeção da produção pelas diferentes categorias de modelagem avaliadas. Independente do sistema avaliado, primeiramente foram calculados os volumes individuais e realizada a classificação de sítio de cada parcela. Em seguida procedeu-se com a projeção do volume para todas as idades onde haviam remedições para posterior análise estatística.

FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE MODELAGEM GLOBAL, EM CLASSES DE DIÂMETRO E DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.



FONTE: O autor (2017).

## 4.6 CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS AVALIADOS

### 4.6.1 Avaliação dos sistemas de equações utilizados

Com o intuito de avaliar os sistemas de equações, foram utilizadas as estatísticas de erros médios absoluto ( $E_{abs}$ ) e relativo ( $E_r$ ) e raiz quadrada do erro médio quadrático (REMQ), conforme Cunha (2013). Também foi calculado o índice de

concordância de Willmott (1985), que corresponde ao grau de associação entre as medidas estimadas e as reais, com variação de zero (menor concordância) até um (maior concordância).

$$E_{abs} = \sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (38)$$

$$E_r = E_{abs} * \frac{100}{\bar{y}_i} \quad (39)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (40)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum [|\hat{y}_i - \bar{y}_i| + |y_i - \bar{y}_i|]^2} \right\} \quad (41)$$

Em que:  $E_{abs}$  = erro médio absoluto;  $E_r$  = erro médio relativo;  $REMQ$  = raiz quadrada do erro médio quadrático;  $y_i$  = valor observado;  $\hat{y}_i$  = valor estimado pela equação;  $\bar{y}$  = valor médio da variável observada;  $n$  = número de observações; e  $d$  = índice de concordância de Willmott.

Para facilitar a visualização dos desvios, foi realizada a análise gráfica de resíduos. Para construir esses gráficos, foi necessário calcular os resíduos para todos os pares de dados pela seguinte formulação:

$$res \% = \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} 100 \quad (42)$$

Em que:  $res \%$  = resíduos em porcentagem;  $y_i$  = valor da variável observada; e  $\hat{y}_i$  = valor da variável estimada pela equação.

#### 4.6.2 Teste para avaliação da qualidade do ajuste na modelagem em classes de diâmetro

Para avaliar a qualidade do ajuste da fdp de Weibull em relação as frequências observadas, foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de significância. Essa avaliação teve como objetivo comparar as frequências acumuladas estimadas e observadas e avaliar a diferença a um valor de  $D$  de

Kolmogorov-Smirnov. O intuito dessa avaliação foi encontrar a maior divergência existente ( $D_{max}$ ) em relação ao máximo valor observado ( $D_n$ ):

$$D_{max} = SUP |F(x) - S(x)| \quad (43)$$

Em que:  $D_{max}$  = maior diferença entre as distribuições, se  $D_{max} < D_n(\alpha)$ , aceita-se o ajuste;  $D_n(\alpha)$  é tabelar, nível  $\alpha$  de 5% de probabilidade para  $N$  indivíduos;  $F(x)$  = frequência acumulada estimada; e  $S(x)$  = frequência acumulada observada.

#### 4.6.3 Critérios estatísticos para avaliar a projeção do volume em diferentes classes de idade nos povoamentos de *Pinus taeda*

A seguir, são apresentados as estatísticas utilizadas para a validação dos volumes projetados em classes de idade, conforme os critérios aplicados por Cao (2000), Ochi Cao (2002) e Zhang (2010):

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \hat{y}_i) \quad (44)$$

$$Acurácia = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (45)$$

Em que: *Viés* = também conhecido por tendenciosidade ou “bias”; *Acurácia* = mede em termos absolutos a proximidade de cada observação ao valor-alvo que se procura atingir;  $y_i$  = valor observado;  $\hat{y}_i$  = valor estimado pelo modelo;  $\bar{y}$  = valor médio da variável observada; e  $n$  = número de observações.

As 104 parcelas avaliadas tiveram seus volumes observados confrontados com as estimativas obtidas pelos sistemas avaliados. Para melhor visualização, os resultados foram divididos em quatro classes de idade. As projeções de 7 a 10 anos de idade foram classificadas na classe de idade 1, as parcelas com 11 a 14 anos foram consideradas na classe 2, as parcelas com 15 a 18 anos foram enquadradas na classe 3 e as parcelas com idades acima de 18 anos foram classificadas na classe 4.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

O sumário das principais variáveis dendrométricas do povoamento é apresentado na Tabela 6. Os plantios mais antigos foram implantados em 1978 e os mais recentes em 1996. Cada parcela foi remediada, em média, 6,5 vezes, sendo que o mínimo de remedições de uma parcela foi 4 e o máximo foi 12. A densidade média do povoamento foi de 1.441 árv.ha<sup>-1</sup>, sendo que, em casos extremos, ocorreram um mínimo de 775 árv.ha<sup>-1</sup> e um máximo de 2.725 árv.ha<sup>-1</sup>. Quanto ao volume, houve parcelas com 43,2 até 1.059 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

TABELA 6 - AMPLITUDE DAS VARIÁVEIS DO CONJUNTO DE DADOS.

Variável	Mínimo	Médio	Máximo
Ano de Plantio	1978	-	1996
Remedições	4	6,5	12
Idade (anos)	5	12,8	22,0
Diâmetro mínimo (cm)	3,3	12,9	21,8
Diâmetro médio (cm)	10,9	22,8	33,6
Diâmetro máximo (cm)	15,7	32,3	48,1
Variância do diâmetro	3,1	19,8	70,8
Diâmetro quadrático médio (cm)	11,1	22,4	30,1
Altura (m)	6,6	17,7	28,4
Altura dominante (m)	7,9	20,5	33,8
Número de árvores (árv.ha <sup>-1</sup> )	775	1.441	2.725
Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	15,6	60,4	89,9
Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	43,2	516,6	1.059,8
Peso (ton.ha <sup>-1</sup> )	36,7	488,8	1.041,0

FONTE: O autor (2017).

Na Tabela 7 é apresentado um resumo das remedições das 104 parcelas utilizadas para projeção da produção. Essa projeção iniciou-se a partir da primeira medição de cada parcela (6 a 10 anos) e foi calculada para todas as idades de remedições. O conjunto total de combinações contou com 682 pares de dados projetados. A idade de 14 anos apresentou o maior número de dados, com 89 projeções, enquanto na idade de rotação (17 anos) houve 31 parcelas.



TABELA 7 – RESUMO DOS DADOS DE AVALIAÇÃO EM NÚMERO DE PARCELAS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Idade de Projeção	Idade Inicial					Total
	6	7	8	9	10	
7	2	-	-	-	-	2
8	8	3	-	-	-	11
9	8	74	-	-	-	82
10	8	25	8	-	-	41
11	8	64	8	7	1	88
12	6	24	8	7	7	52
13	6	58	8	7	7	86
14	2	65	8	7	7	89
15	6	51	4	7	6	74
16	4	32	4	3	7	50
17	7	12	3	4	5	31
18	3	9	4	3	2	21
19	4	1	7	7	6	25
20	-	3	3	5	7	18
21	-	-	2	2	4	8
22	-	-	-	2	2	4
<b>Total</b>	<b>72</b>	<b>421</b>	<b>67</b>	<b>61</b>	<b>61</b>	<b>682</b>

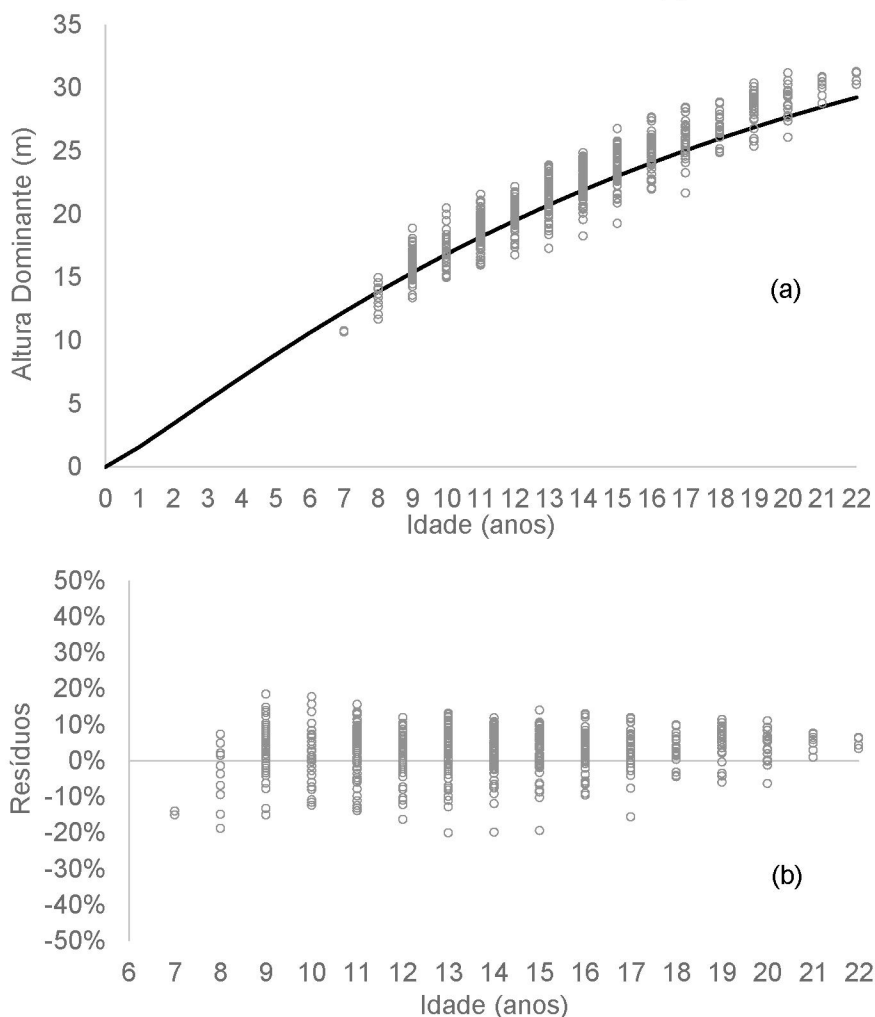
FONTE: O autor (2017).

## 5.2 AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR EQUAÇÕES GLOBAIS

### 5.2.1 Avaliação da equação de altura dominante

De acordo a avaliação estatística, a equação de altura dominante utilizada de Miranda (2016) apresentou  $E_{abs} = 1,20$  m,  $E_r = 5,56\%$ ,  $REMQ = 1,46$  m e  $d = 0,442$ . Na Figura 3 (a) é possível observar o comportamento da altura dominante em relação a idade e a curva gerada pela equação utilizada a qual explicou satisfatoriamente o crescimento em altura dominante. Essa equação gerou a classificação dos sítios de acordo com Miranda (2016). A distribuição dos resíduos é apresentada na Figura 4 (b), onde observa-se que houve apenas uma leve tendenciosidade de subestimativa da altura dominante nas idades acima de 18 anos e que, no geral, a amplitude de variação dos desvios concentrou-se entre  $\pm 20\%$ .

FIGURA 4 - VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA IDADE (a) E DESVIOS OBSERVADOS ENTRE A ALTURA DOMINANTE OBSERVADA E A ESTIMADA NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* (b).



FONTE: O autor (2017).

### 5.2.2 Avaliação das equações globais utilizadas para estimativa da área basal e do volume

Na Tabela 8 é possível observar as estatísticas das projeções dos sistemas globais avaliados para estimativa da área basal e volume por hectare. Nas equações de área basal, os melhores resultados foram apresentados pela equação de Nascimento (2015) com  $E_{abs} = 4,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $E_r = 6,7\%$ ,  $REM_Q = 5,4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  e  $d = 0,854$ . Para a estimativa do volume, a equação de Wolff II (2012) apresentou os melhores resultados estatísticos, com  $E_{abs} = 31,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $E_r = 5,5\%$ ,  $REM_Q = 41,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  e  $d = 0,983$ .

TABELA 8 - ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA MODELAGEM GLOBAL NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

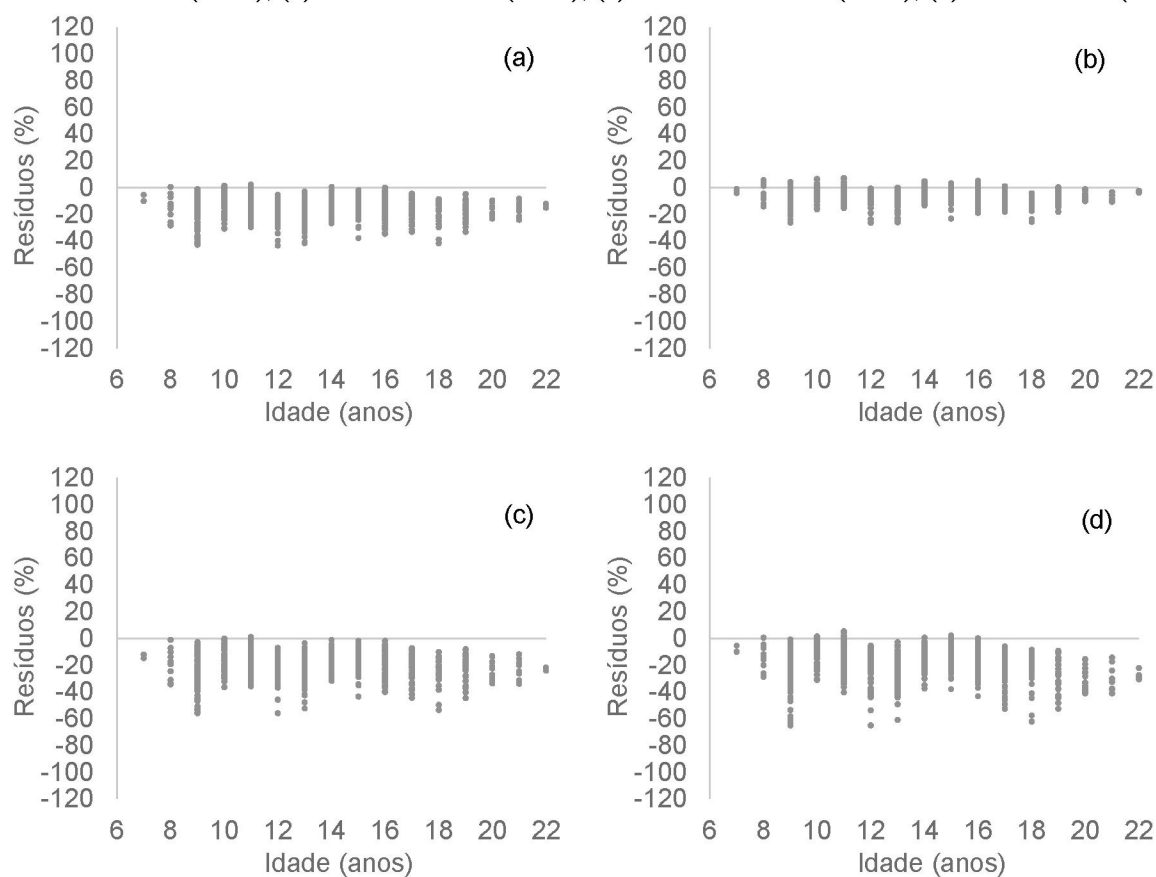
Atributo	Autor	E <sub>abs</sub>	E <sub>r%</sub>	REMQ	d
Área Basal (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Wolff II (2012)	10,4	16,2	11,9	0,927
	Nascimento (2015)	4,3	6,7	5,4	0,854
	Schuchovski (2014)	13,2	20,7	15,9	0,947
	Romaniuk (2015)	13,7	21,3	15,6	0,943
Volume (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Wolff II (2012)	31,6	5,5	41,8	0,983
	Nascimento (2015)	70,0	12,3	85,8	0,945
	Schuchovski (2014)	271,5	47,8	327,1	0,632
	Romaniuk (2015)	377,9	66,5	391,7	0,554

Em que: E<sub>abs</sub> = erro médio absoluto; E<sub>r%</sub> = erro médio relativo; REMQ = raiz quadrada dos erros médios quadráticos; e d = índice de concordância de Willmott.

FONTE: O autor (2017).

Observa-se na Figura 5 que as equações utilizadas para estimativa da área basal superestimaram suas projeções em todas as idades. A equação de Nascimento (2015) apresentou uma amplitude dos desvios de até 30%. Os maiores desvios, de até 70%, foram observados na estimativas obtidas pela equação de Romaniuk (2015).

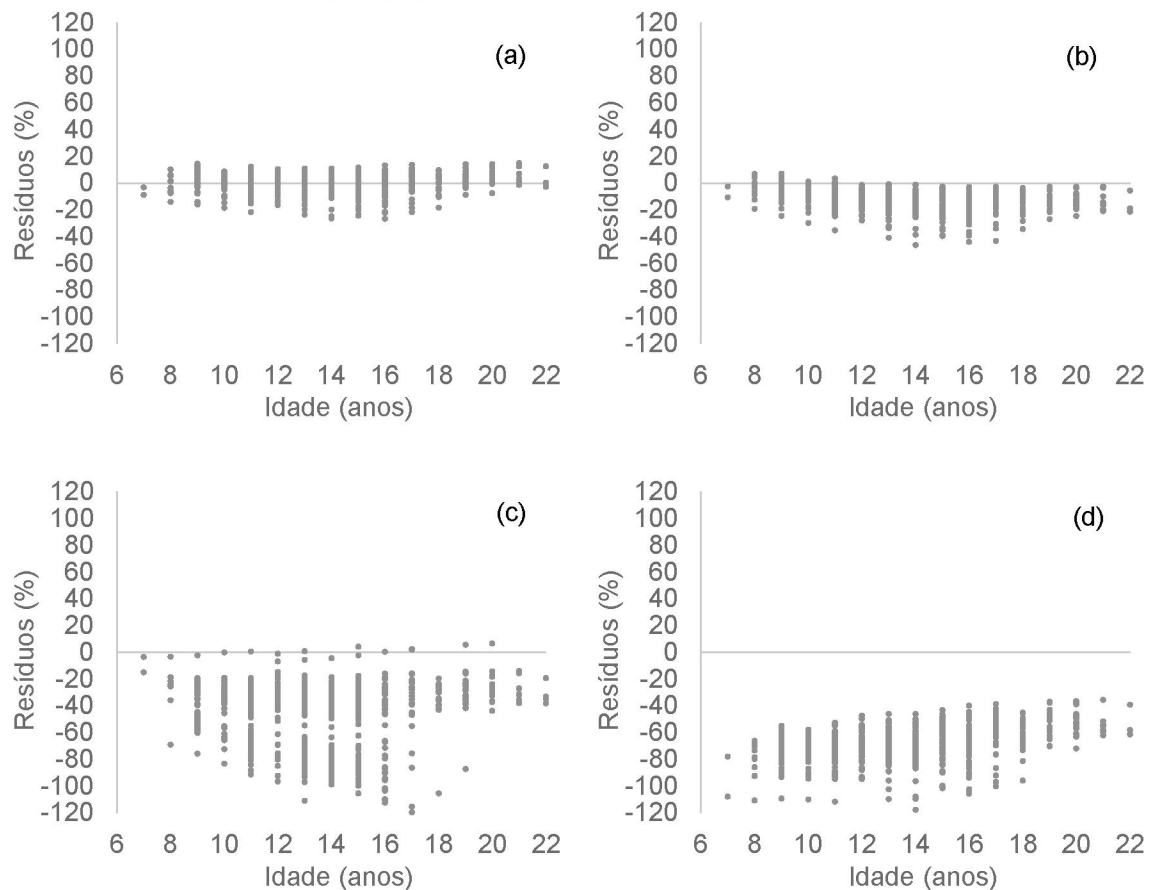
FIGURA 5 - RESÍDUOS ENTRE AS ÁREAS BASAIS OBSERVADAS E AS ÁREAS BASAIS PROJETADAS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELAS EQUAÇÕES (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) SCHUCHOVSKI (2014); (d) ROMANIUK (2015).



FONTE: O autor (2017).

A Figura 6 mostra os gráficos de resíduos das estimativas de volumes obtidas pelas quatro equações avaliadas. Observa-se que a equação de Romaniuk (2015) apresentou tendenciosidade de superestimavas dos volumes em todas as parcelas, enquanto a equação de Wolf II (2012) foi a única que apresentou resíduos bem distribuídos em todas as idades apenas com uma leve tendência de subestimativa nas idades acima de 20 anos com desvios menores que  $\pm 30\%$  no geral.

FIGURA 6 - RESÍDUOS ENTRE OS VOLUMES OBSERVADOS E OS VOLUMES PROJETADOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELAS EQUAÇÕES (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) SCHUCHOVSKI (2014); (d) ROMANIUK (2015).

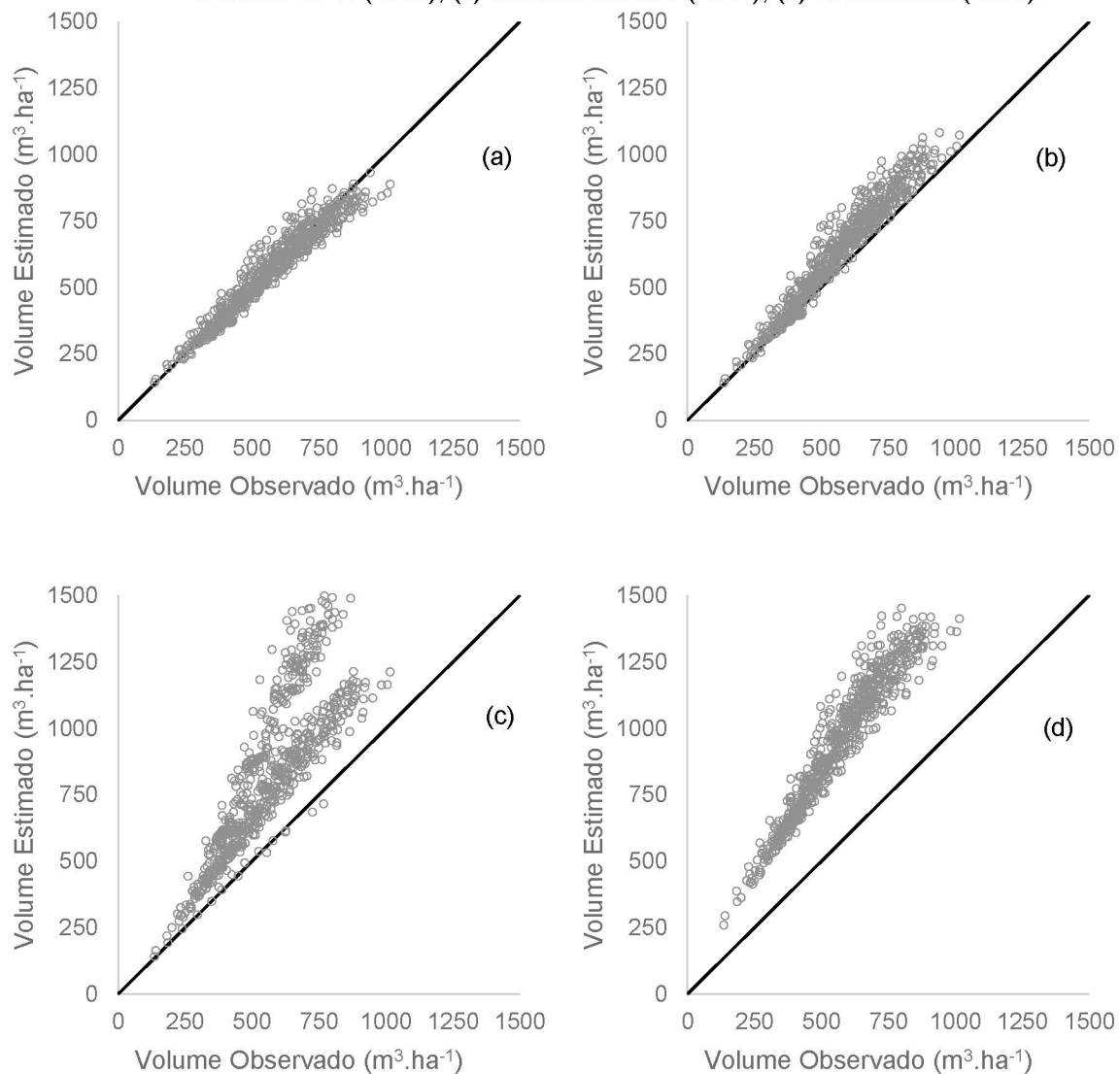


FONTE: O autor (2017).

A Figura 7 mostra os gráficos dos volumes preditos em função dos volumes observados pelas equações avaliadas. Observa-se que a equação de Nascimento (2015) superestimou os volumes maiores que  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Na equação de Wolf II (2012), o volume foi subestimado apenas nos valores acima de  $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . As

equações de Schuchovski (2014) e Romaniuk (2015) superestimaram os volumes em praticamente todos os valores.

FIGURA 7 - VOLUMES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VOLUMES OBSERVADOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELAS EQUAÇÕES: (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) SCHUCHOVSKI (2014); (d) ROMANIUK (2015).



FONTE: O autor (2017).

### 5.2.3 Avaliação da projeção do atributo volume em classes de idade

As estatísticas da projeção do atributo volume em classes de idade são apresentadas na Tabela 9. No geral, a equação de Wolff II (2012) apresentou o menor viés médio, com  $13,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (1,7%). Na classe de idade 3, de maior interesse devido a proximidade com a idade de rotação, a equação de Wolff II (2012) também

apresentou o melhor desempenho, com viés médio de  $-0,7 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (-0,7%). A equação de Romaniuk (2015) apresentou o pior viés médio, com  $-382,3 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (-65,5%).

Quanto à acurácia, o melhor desempenho também foi produzido pela equação ajustada por Wolf II (2012), onde os volumes estimados diferiram em média  $34,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (5,7%) dos volumes reais. As estimativas menos acuradas foram geradas pela equação de Romaniuk (2015), com os volumes estimados diferindo em média  $382,3 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (65,5%) dos reais. Nas projeções até 10 anos, a equação de Nascimento (2015) apresentou a melhor acurácia, com  $17,9 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (5,5%).

TABELA 9 - ESTATÍSTICAS DA AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR MODELAGEM GLOBAL POR UNIDADE DE ÁREA NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Atributo	Autor	Classes de Idade				Média
		1	2	3	4	
Viés ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	Wolff II (2012)	13,4	<b>2,4</b>	<b>-0,7</b>	<b>39,4</b>	<b>13,6</b>
	Nascimento (2015)	<b>-12,2</b>	-65,5	-105,8	-109,6	<b>-73,2</b>
	Schuchovski (2014)	-139,1	-287,4	-352,0	-244,7	<b>-255,8</b>
	Romaniuk (2015)	-246,0	-377,4	-459,3	-446,6	<b>-382,3</b>
Viés %	Wolff II (2012)	<b>3,1</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,7</b>	<b>4,3</b>	<b>1,7</b>
	Nascimento (2015)	-4,0	-12,5	-15,8	-13,3	<b>-11,4</b>
	Schuchovski (2014)	-38,1	-50,8	-49,9	-29,0	<b>-41,9</b>
	Romaniuk (2015)	-72,1	-70,1	-66,6	-53,2	<b>-65,5</b>
Acurácia ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	Wolff II (2012)	21,1	<b>27,1</b>	<b>42,6</b>	<b>47,5</b>	<b>34,6</b>
	Nascimento (2015)	<b>17,9</b>	65,6	105,8	109,6	<b>74,7</b>
	Schuchovski (2014)	139,1	287,5	352,6	248,2	<b>256,9</b>
	Romaniuk (2015)	246,0	377,4	459,3	446,6	<b>382,3</b>
Acurácia %	Wolff II (2012)	5,9	<b>5,1</b>	<b>6,3</b>	<b>5,4</b>	<b>5,7</b>
	Nascimento (2015)	<b>5,5</b>	12,5	15,8	13,3	<b>11,8</b>
	Schuchovski (2014)	38,1	50,9	50,0	29,5	<b>42,1</b>
	Romaniuk (2015)	72,1	70,1	66,6	53,2	<b>65,5</b>

FONTE: O autor (2017).

Conforme os resultados apresentados, considerando o plantios em estudo, os piores resultados de projeção foram obtidos pelo sistema de Romaniuk (2015). As possíveis causas dessa falta de precisão foram que os dados utilizados para o ajuste das equações foram coletados em uma área relativamente pequena, com cerca de 1.000 ha, e em municípios com características diferentes dos plantios em estudo, os quais não abrangeram todas as classes de sítios. Além disso os plantios foram desbastados em sua grande maioria, com o objetivo final do uso da madeira para toras de grandes dimensões.

Por outro lado, o sistema de Schuchovski (2014) utilizou dados de extensas áreas de plantio, no entanto, esses povoamentos estavam localizados em sítios e regiões climáticas diferentes dos povoamentos avaliados nesta pesquisa. Os plantios

compreendidos no trabalho dessa autora estão localizados, em sua grande maioria, no Sudeste e Nordeste do estado do Paraná e no Sudoeste do estado de São Paulo. Os plantios também apresentaram regimes de manejo com desbastes, cujo objetivo final de produção de madeira foi serraria e laminação.

A partir do uso das equações do trabalho de Nascimento (2015), os resultados das projeções do volume foram consideradas satisfatórias. Os dados foram coletados em municípios e em regiões próximas aos plantios estudados, gerando condições similares de sítios, clima e solos. No entanto, esses plantios também tinham, como objetivo final, madeira de grandes dimensões, em que desbastes foram aplicados. Eles também foram estabelecidos com material genético diferente do utilizado pela WestRock.

De acordo com todos os critérios estatísticos avaliados, o sistema de equações global apresentado por Wolf II (2012) foi considerado o mais preciso, acurado e não tendencioso para estimativa da produção em volume em diferentes classes de idade nos plantios avaliados. Um dos principais motivos é que os locais onde os dados foram coletados por esse autor estão próximos de alguns povoamentos da WestRock, fazendo com que essas áreas tenham clima e sítios semelhantes. Nessa região, é também comum que as empresas façam o “*benchmarking*” dos tratamentos silviculturais, fazendo com que os plantios tenham padrões similares. Além disso, sabe-se que a empresa dos plantios avaliados por Wolf II (2012) adquiriu por muitos anos o material genético da empresa WestRock, o que provavelmente gerou padrão similar dos plantios, resultando, assim, em excelentes projeções do volume futuro.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO

#### 5.3.1 Avaliação das equações dos sistemas de atributos avaliados

As estatísticas do sistema de atributos construído por Viana (2016) são apresentadas na Tabela 10. Em geral, somente as equações de estimativa do diâmetro mínimo e da variância dos diâmetros apresentaram erros maiores que 10%. Os atributos números de árvores e diâmetro quadrático médio apresentaram índice de concordância maiores que 0,95 e erros menores que 4%.

Na Figura 8 é possível observar a distribuição dos resíduos das estimativas dos atributos do sistema de Viana (2016). A equação de variância dos diâmetros apresentou a maior dispersão de resíduos, com erros maiores que 60% em alguns casos. Na estimativa do diâmetro médio, observou-se tendenciosidade de superestimativa nas idades acima de 13 anos. A melhor distribuição de resíduos foi observada nas estimativas do diâmetro quadrático médio, com resíduos em geral menores que 10%.

TABELA 10 - ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE VIANA (2016) UTILIZADAS PARA MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Atributo	E <sub>abs</sub>	E <sub>r</sub> %	REMQ	d
Número de Árvores (árv.ha <sup>-1</sup> )	54,2	3,7	79,0	0,969
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	3,5	5,4	4,4	0,930
Diâmetro Quadrático (cm)	0,7	2,9	0,9	0,959
Diâmetro Médio (cm)	1,3	6,0	1,8	0,813
Diâmetro Mínimo (cm)	1,8	13,3	2,4	0,790
Variância dos Diâmetros	3,5	16,7	4,8	0,927
Diâmetro Máximo (cm)	1,7	5,2	2,5	0,893

Em que: E<sub>abs</sub> = erro médio absoluto; E<sub>r</sub> = erro médio relativo; REMQ = raiz quadrada dos erros médios quadráticos; e d = índice de concordância de Willmott. FONTE: O autor (2017).

As estatísticas dos atributos pertencentes ao sistema de Retslaff (2014) são apresentadas na Tabela 11. A equação de sobrevivência apresentou as melhores estatísticas, com E<sub>abs</sub> = 73,6 árv.ha<sup>-1</sup>, E<sub>r</sub> = 5%, REMQ = 119,7 árv.ha<sup>-1</sup> e d = 0,928. O atributo variância dos diâmetros apresentou as estimativas mais imprecisas, com E<sub>abs</sub> = 10,2, E<sub>r</sub> = 48,6%, REMQ = 13,5 e d = 0,436. As estimativas da área basal também apresentaram-se imprecisas, com E<sub>abs</sub> = 13,3 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>, E<sub>r</sub> = 20,8%, REMQ = 15,3 e d = 0,425.

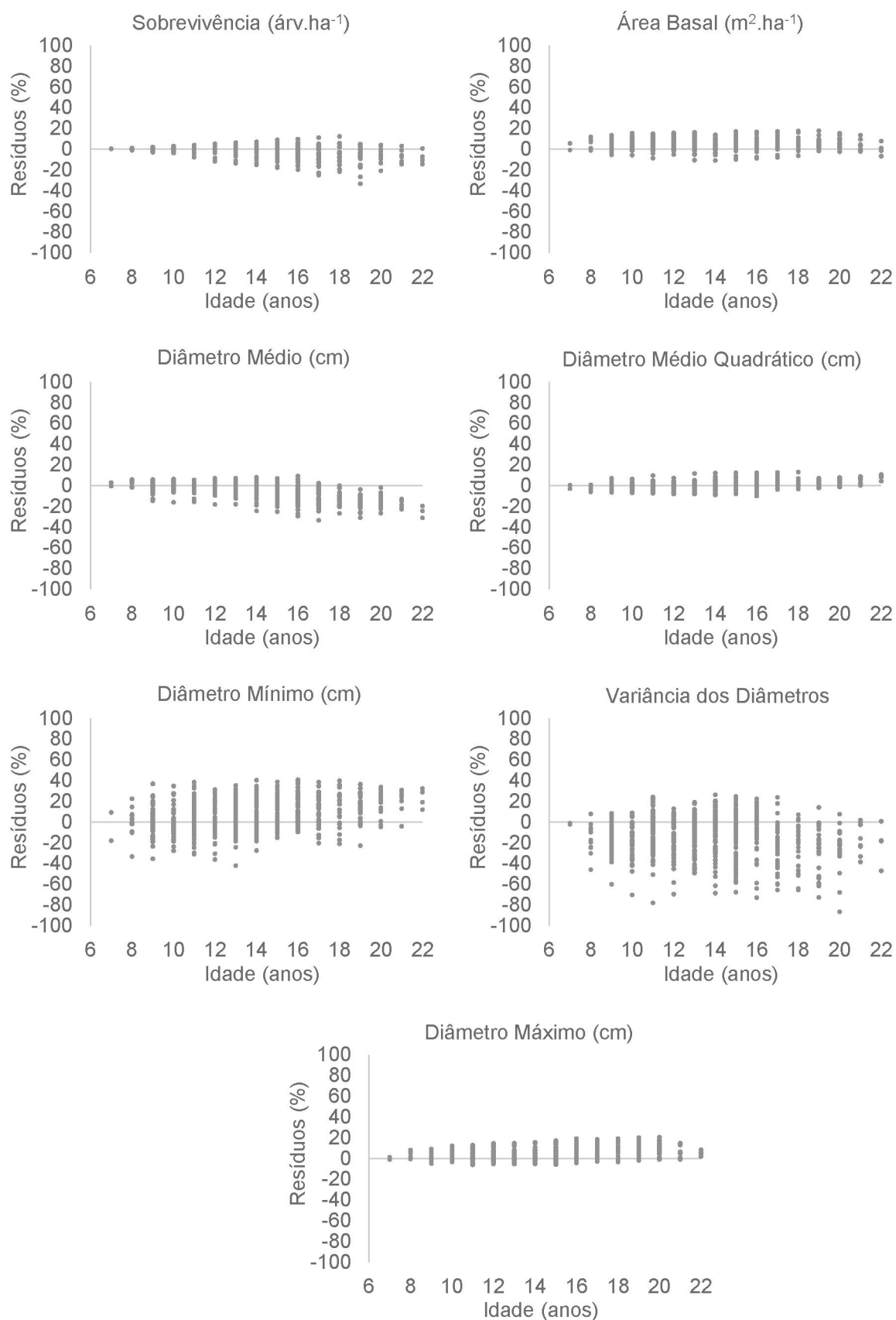
TABELA 11 - ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE RETSLAFF (2014) UTILIZADAS PARA MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Atributo	E <sub>abs</sub>	E <sub>r</sub> %	REMQ	d
Número de Árvores (árv.ha <sup>-1</sup> )	73,6	5,0	119,7	0,928
Área Basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	13,3	20,8	15,3	0,425
Diâmetro Quadrático (cm)	2,2	9,5	2,5	0,658
Diâmetro Médio (cm)	1,5	6,7	1,8	0,755
Diâmetro Mínimo (cm)	2,5	18,7	3,0	0,487
Variância dos Diâmetros	10,2	48,6	13,5	0,436

Em que: E<sub>abs</sub> = erro médio absoluto; E<sub>r</sub> = erro médio relativo; REMQ = raiz quadrada dos erros médios quadráticos; e d = índice de concordância de Willmott. FONTE: O autor (2017).



FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS A PARTIR DO SISTEMA DE EQUAÇÃO DOS ATRIBUTOS AJUSTADO POR VIANA (2016).



FONTE: O autor (2017).

A distribuição gráfica dos resíduos das equações pertencentes ao sistema ajustado por Retslaff (2014) pode ser observada na Figura 9. Nas estimativas da área basal houve tendenciosidade de subestimativa nas idades acima de 10 anos, com erros de até +40%. A equação da estimativa do diâmetro mínimo apresentou tendenciosidade de superestimativa dos diâmetros nas idades abaixo de 18 anos, com erros de até -100%. Na estimativa da variância dos diâmetros, observou-se superestimativas em todas as idades, com erros acima de -100% em algumas idades. A equação de estimativa do diâmetro médio apresentou resíduos bem distribuídos nas idades acima de 8 anos.

Observa-se na Tabela 12 as estatísticas do sistema de equações de projeção dos atributos de Eisfeld (2004). No geral, somente as estimativas do atributo variância dos diâmetros apresentaram erros maiores que 10%, no entanto, apresentaram alto índice de concordância, de 0,928. A equação da estimativa da área basal apresentou boas estatísticas, com  $E_{abs} = 4,9 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ ,  $E_r = 7,7\%$ ,  $REMQ = 6,2 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$  e  $d = 0,907$ . O método de estimativa do diâmetro médio apresentou os resultados mais imprecisos, com  $E_{abs} = 2,4 \text{ cm}$ ,  $E_r = 4,2\%$ ,  $REMQ = 3 \text{ cm}$  e  $d = 0,689$ .

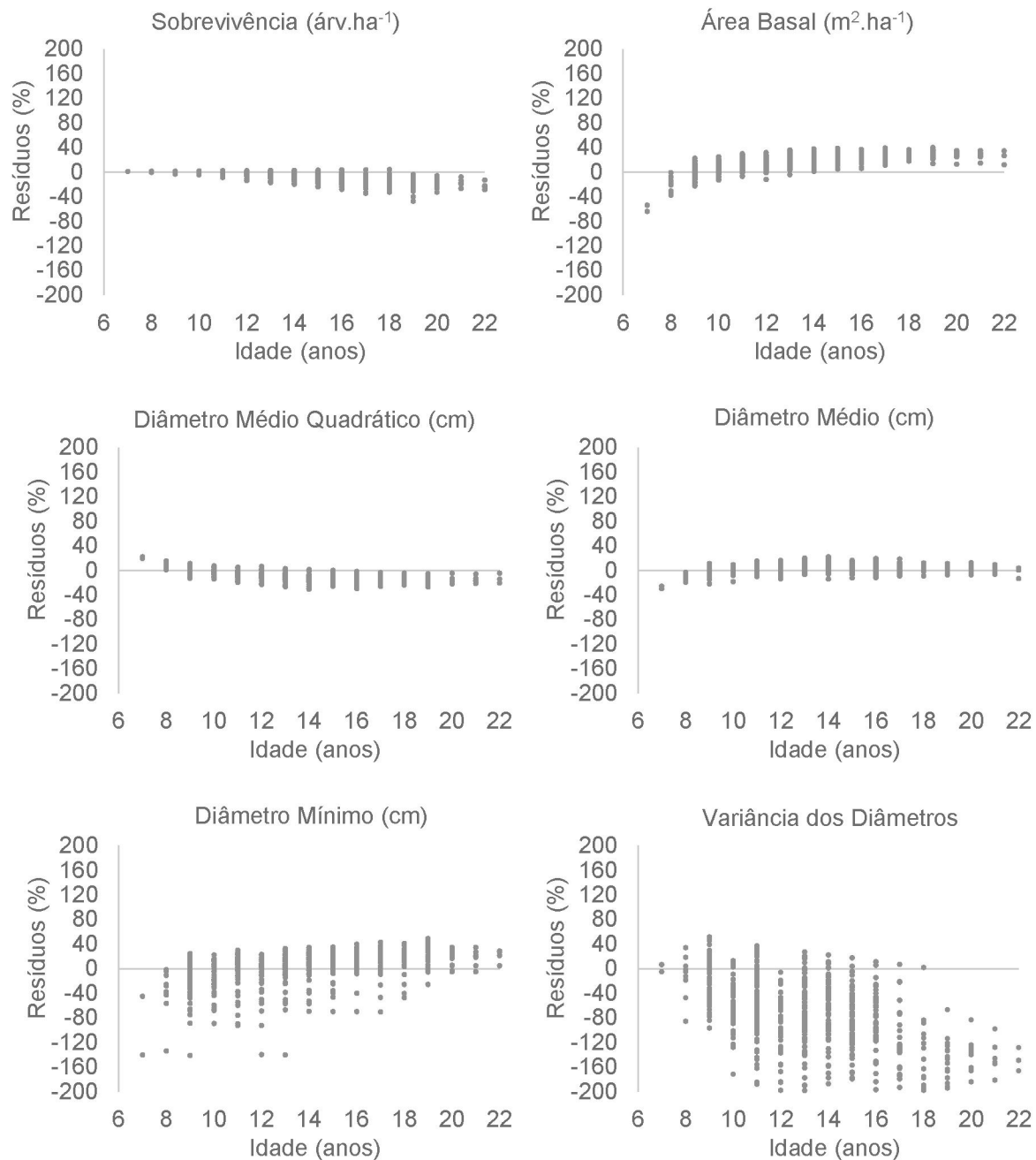
TABELA 12 - ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ATRIBUTOS DE EISFELD (2004) UTILIZADAS PARA MODELAGEM EM CLASSES DE DIÂMETRO NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Atributo	$E_{abs}$	$E_r\%$	REMQ	d
Número de Árvores (árv.ha <sup>-1</sup> )	60,9	4,2	83,0	0,965
Área Basal (m <sup>2</sup> . ha <sup>-1</sup> )	4,9	7,7	6,2	0,907
Variância dos Diâmetros	3,6	17,4	4,8	0,928
Diâmetro Médio (cm)	2,4	10,0	3,1	0,689
Diâmetro Quadrático (cm)	1,6	7,2	2,0	0,833

Em que:  $E_{abs}$  = erro médio absoluto;  $E_r$  = erro médio relativo; REMQ = raiz quadrada dos erros médios quadráticos; e d = índice de concordância de Willmott. FONTE: O autor (2017).

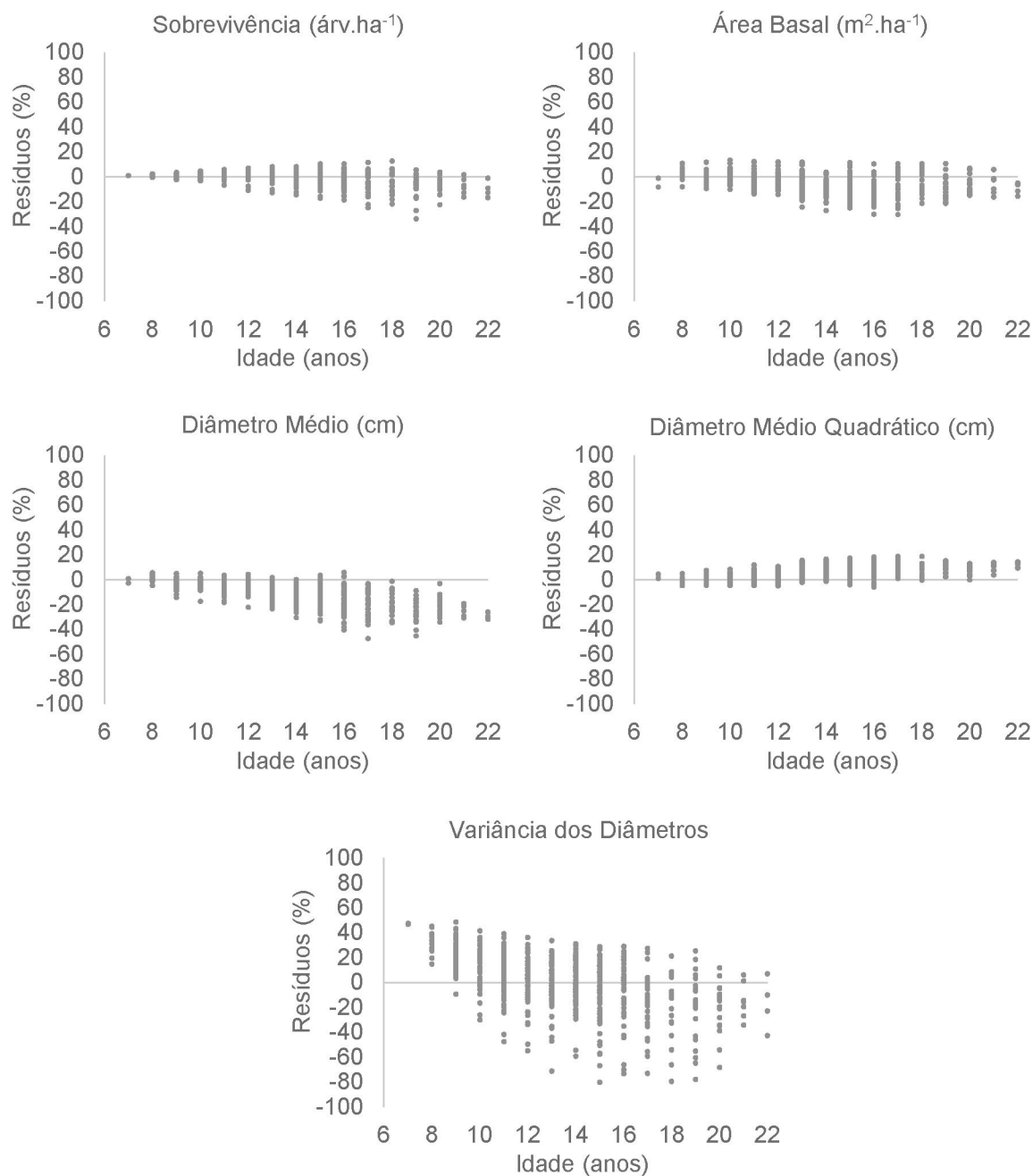
Os resíduos das equações pertencentes ao sistema ajustado por Eisfeld (2004) são apresentados na Figura 10. A equação de sobrevivência apresentou leve tendência de superestimativa do número de árvores nas idades acima de 18 anos. Os erros máximos observados não passaram de  $\pm 30\%$ . Na equação para estimativa da área basal, no geral, a distribuição de resíduos apresentou leve tendenciosidade de superestimativa nas idades acima de 12 anos, com erros de até  $\pm 30\%$ . A equação da estimativa da variância dos diâmetros apresentou os resultados mais tendenciosos, com erros acima de 80%.

FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS A PARTIR DO SISTEMA DE EQUAÇÃO DOS ATRIBUTOS AJUSTADO POR RETSLAFF (2014).



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS A PARTIR DO SISTEMA DE EQUAÇÃO DOS ATRIBUTOS AJUSTADO POR EISFELD (2004).



FONTE: O autor (2017).

### 5.3.2 Teste de qualidade dos ajustes das distribuições

Na Tabela 13 são apresentados os resultados do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Foi constatado que o sistema de Eisfeld (2004) apresentou a melhor aderência em relação às distribuições observadas, com 84% de aderência, KS médio de 0,124 e o menor desvio padrão com 0,062. O sistema Viana 2 (2016) teve aderência de apenas 8% das parcelas, KS de 0,320 e desvio padrão de 0,159. Ferraz

Filho (2009), utilizando o método dos momentos, obteve 92,6% de aderência em suas parcelas provenientes de plantios de *Pinus taeda*.

TABELA 13 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE DE ADERÊNCIA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.

Autor	Total de Dados	Não	Sim	Aderência %	Qualidade do Ajuste	
					Média	Desvio padrão
Eisfeld (2004)	682	111	571	84	0,124	0,062
Viana 1 (2016)	682	148	534	78	0,129	0,061
Retslaff (2014)	682	552	130	19	0,323	0,138
Viana 2 (2016)	682	630	52	8	0,320	0,159

Em que: Não = total de parcelas que não aderiram ao teste de aderência; e Sim = total de parcelas que aderiram ao teste de aderência.

FONTE: O autor (2017).

As estatísticas da projeção do atributo volume em diferentes classes de idade ( $m^3.ha^{-1}$ ) são apresentadas na Tabela 14. O sistema avaliado de Eisfeld (2004) foi o que apresentou o menor viés médio, considerando todas as classes de idade, com superestimativa média de  $21,8 m^3.ha^{-1}$ , equivalendo a 4,3%. Esse sistema apresentou subestimativa média de 10,8% dos volumes estimados nas idades abaixo de 10 anos e subestimativa dos volumes de 2,5% nas classes de idade acima de 18 anos.

TABELA 14 - ESTATÍSTICAS FINAIS DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR UNIDADE DE ÁREA NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*

Atributo	Autor	Classes de Idade				Média
		1	2	3	4	
Viés ( $m^3.ha^{-1}$ )	Eisfeld (2004)	39,7	19,9	<b>4,8</b>	<b>22,8</b>	<b>21,8</b>
	Viana 1 (2016)	51,0	80,6	104,3	127,1	<b>90,7</b>
	Viana 2 (2016)	<b>-10,3</b>	<b>7,6</b>	85,3	356,3	<b>109,8</b>
	Restslaff (2014)	48,1	161,2	242,1	320,0	<b>192,8</b>
Viés %	Eisfeld (2004)	10,8	3,6	<b>0,3</b>	<b>2,5</b>	<b>4,3</b>
	Viana 1 (2016)	14,1	14,2	14,4	14,8	<b>14,4</b>
	Viana 2 (2016)	<b>-3,9</b>	<b>0,3</b>	11,5	41,7	<b>12,4</b>
	Restslaff (2014)	10,2	27,9	33,8	37,4	<b>27,3</b>
Acurácia ( $m^3.ha^{-1}$ )	Eisfeld (2004)	41,5	<b>35,3</b>	<b>46,2</b>	<b>45,9</b>	<b>42,2</b>
	Viana 1 (2016)	51,1	81,3	105,5	127,1	<b>91,2</b>
	Viana 2 (2016)	<b>36,0</b>	49,1	109,1	359,4	<b>138,4</b>
	Restslaff (2014)	65,9	162,0	242,1	320,0	<b>197,5</b>
Acurácia %	Eisfeld (2004)	11,5	<b>6,6</b>	<b>6,8</b>	<b>5,4</b>	<b>7,6</b>
	Viana 1 (2016)	14,1	14,4	14,6	14,8	<b>14,5</b>
	Viana 2 (2016)	<b>11,0</b>	9,4	15,5	42,0	<b>19,5</b>
	Restslaff (2014)	18,7	28,1	33,8	37,4	<b>29,5</b>

FONTE: O autor (2017).

Quanto a acurácia, o pior resultado foi apresentado pelo método de Viana 2 (2016), onde os volumes diferiram em média em  $109,8 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (26,9%) dos volumes reais. No entanto, esse sistema apresentou os resultados mais acurados na projeções até 10 anos, com acurácia de  $36,0 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (11%).

Para a estimativa da produção futura em volume, Ferraz Filho (2009) encontrou um viés médio de  $-0,18 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , equivalente a -0,6%, e acurácia de  $5,06 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , correspondente a 12,6%. Eisfeld (2005) obteve um erro médio de  $15,5 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , sendo de 3,4%. Para as idades acima de 18 anos, obteve erro médio de  $11,1 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , equivalendo a 2,4%.

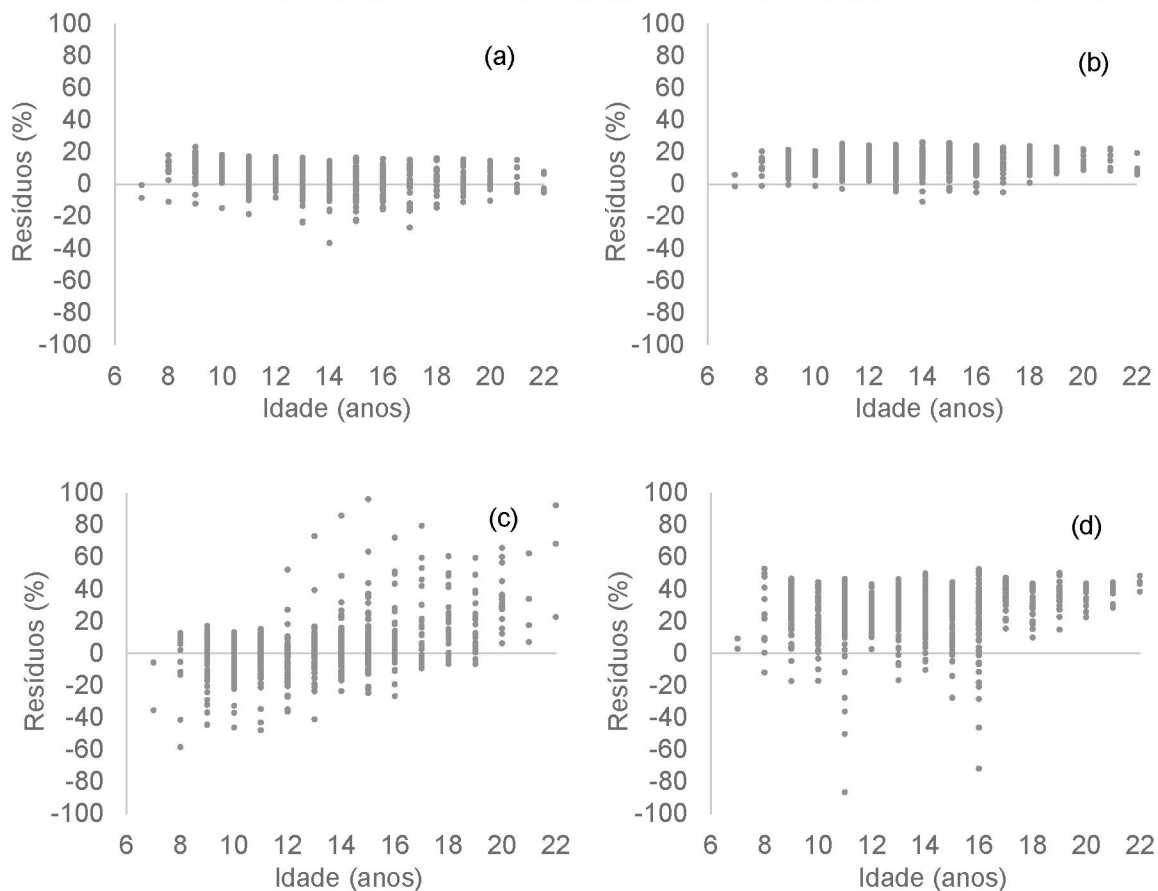
Na Figura 11 são apresentados os resíduos das estimativas obtidas pelos quatro sistemas de projeção do volume em classes de diâmetro. Pode-se observar que o método aplicado por Viana 2 (2016) apresentou tendenciosidade de superestimativas dos volumes nas idade acima de 16 anos. O sistema de Eisfeld (2004) apresentou resíduos bem distribuídos em todas as idades, com erros em geral menores que 20%. Os volumes obtidos por Retslaff (2014) apresentaram tendenciosidade de subestimativa em todas as idades, com resíduos de até +50%.

Na Figura 12 observa-se os volumes estimados em função dos volumes observados. O sistema de Eisfeld (2004) apresentou leve tendenciosidade de subestimativa nos volumes abaixo de  $400 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ . O sistema de Viana 1 (2016) subestimou os volumes principalmente nas parcelas, com volumes observados acima de  $600 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ . O sistema de Retslaff (2016) subestimou todos os volumes nas parcelas com mais de  $400 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ .

De forma geral, o sistema de Viana 1 (2016) apresentou resultados satisfatórios, mesmo com dados coletados em regiões distantes dos povoamentos estudados e com material genético diferente.

O sistema de Retslaff (2014) apresentou estimativas imprecisas. Apesar de os plantios estarem localizados em regiões não tão distantes dos plantios avaliados neste estudo, observou-se que a principal causa dessas estimativas imprecisas foi devido ao uso do Diagrama de Manejo da Densidade para estimativa do diâmetro quadrático médio, comprometendo, assim, as estimativas da variância dos diâmetros e da área basal.

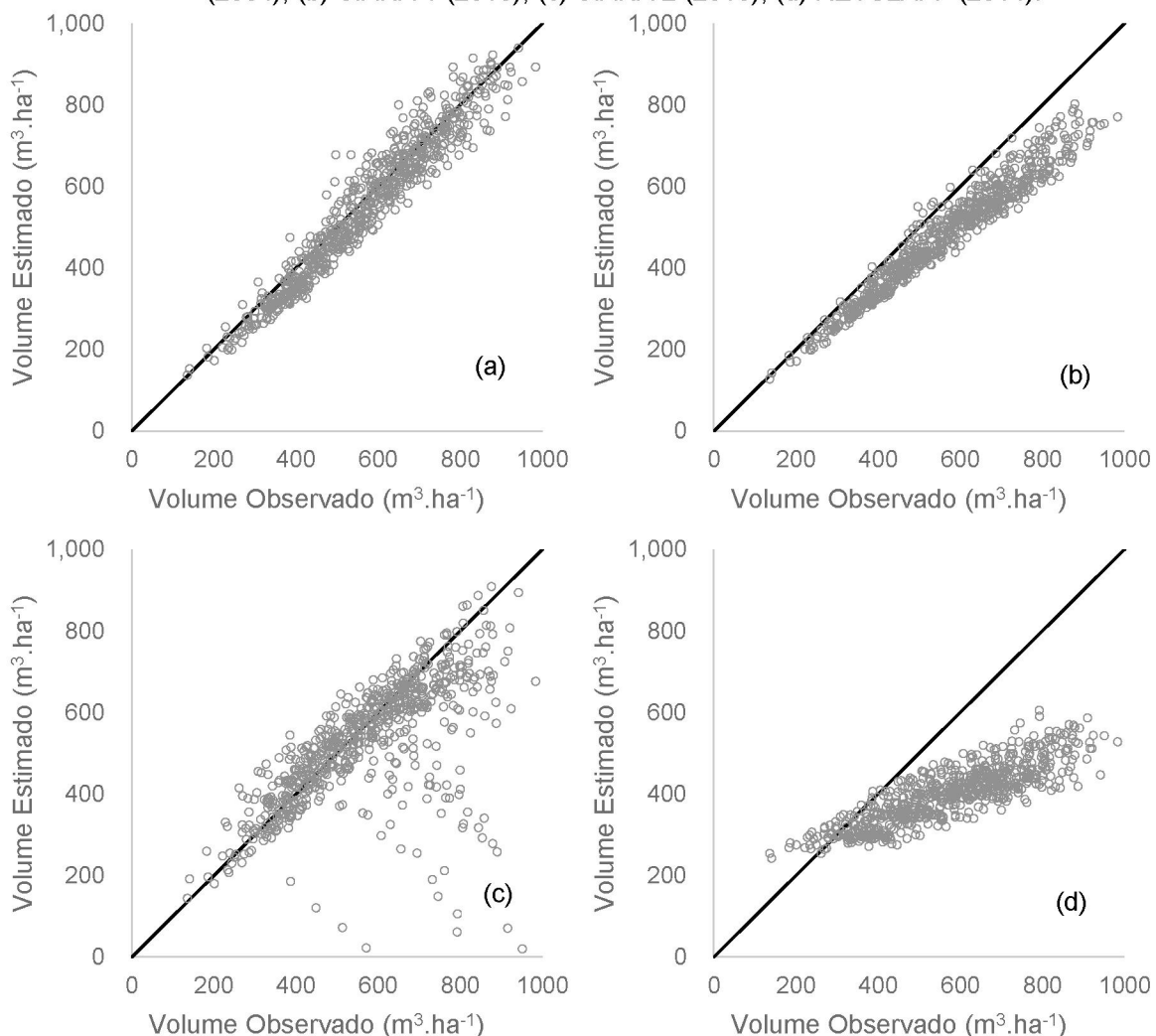
FIGURA 11 – RESÍDUOS ENTRE OS VOLUMES OBSERVADOS E OS VOLUMES PROJETADOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES. (a) EISFELD (2004); (b) VIANA 1 (2016); (c) VIANA 2 (2016); (d) RETSLAFF (2014).



FONTE: O autor (2017).

Para a modelagem do volume em classes de diâmetro, o melhor sistema foi o de Eisfeld (2004). Essa precisão é devida ao fato de que o sistema de equações dos atributos se ajustou muito bem aos dados da validação, o que facilitou a obtenção dos parâmetros futuros da fdp de Weibull, gerando, assim, alta aderência das distribuições e estimativas de volume precisas e acuradas.

FIGURA 12 - VOLUMES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VOLUMES OBSERVADOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PÉLOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES. (a) EISFELD (2004); (b) VIANA 1 (2016); (c) VIANA 2 (2016); (d) RETSLAFF (2014).



FONTE: O autor (2017).

## 5.4 AVALIAÇÃO DA PROJEÇÃO DO VOLUME POR MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

### 5.4.1 Avaliação das projeções dos atributos do povoamento

A Tabela 15 mostra as estatísticas de avaliação das equações utilizadas para estimativa dos atributos do povoamento pela modelagem de árvores individuais. A estimativa do incremento em altura apresentou os resultados mais imprecisos, com  $E_{abs} = 2,6$  m,  $E_r = 13,9$  %,  $REM_Q = 3,3$  m e  $d = 0,784$ . Os resultados mais precisos foram encontrados nas estimativas do número de árvores e incremento em diâmetro com  $E_{abs} = 39,4$  árv.ha<sup>-1</sup>,  $E_r = 2,7$  %,  $REM_Q = 60,1$  árv.ha<sup>-1</sup> e  $d = 0,982$ ; e  $E_{abs} = 1,2$  cm,  $E_r = 5,6$  %,  $REM_Q = 1,7$  cm e  $d = 0,818$ , respectivamente. As estimativas do



volume também apresentaram excelentes resultados estatísticos com  $E_{abs} = 49,8 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ,  $E_r = 8,8 \%$ ,  $REMQ = 63,4 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  e  $d = 0,962$ .

TABELA 15 - ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS POR MIRANDA (2016) PARA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

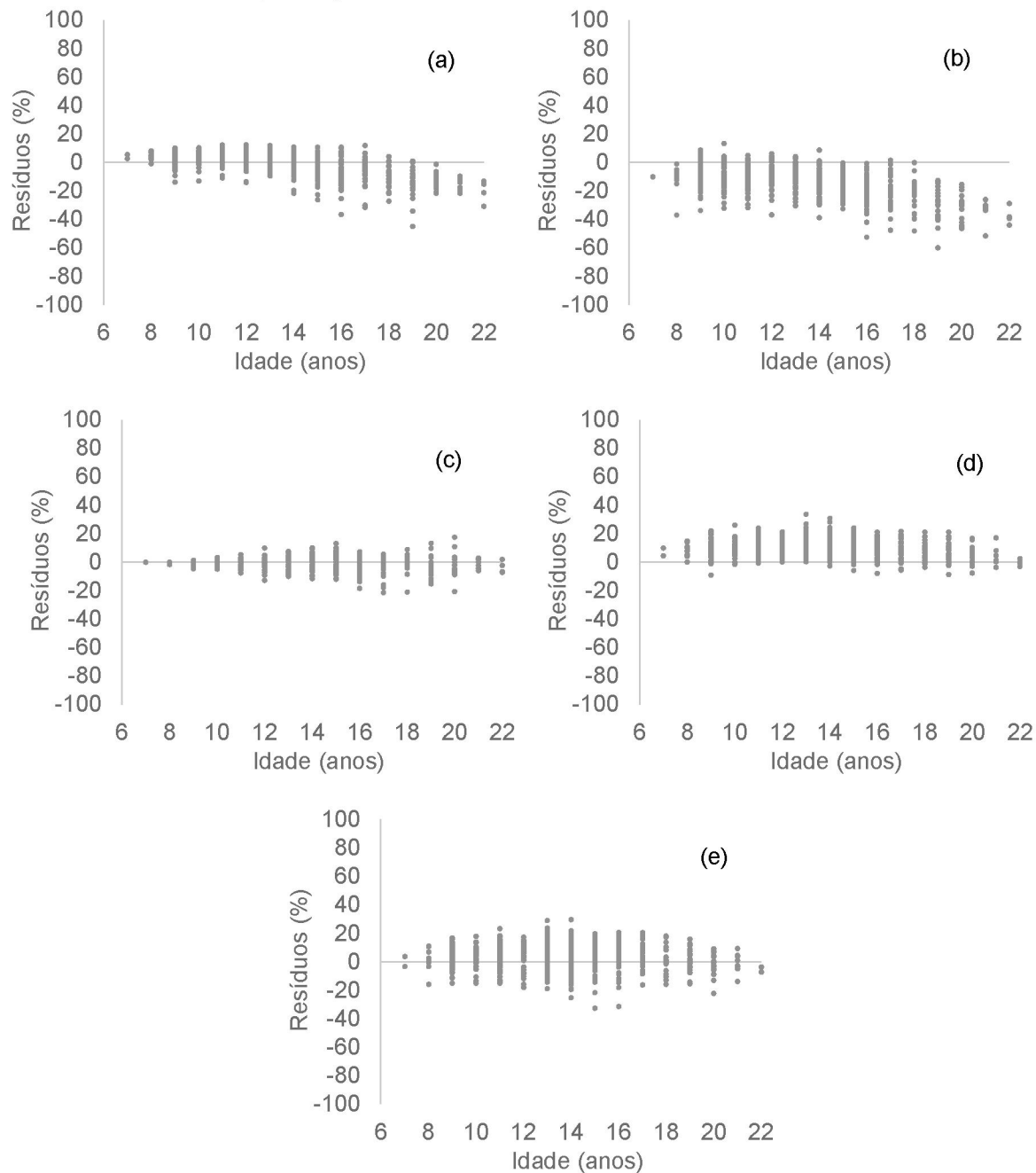
Atributo	$E_{abs}$	$E_r\%$	REMQ	d
Incremento em Diâmetro (cm)	1,2	5,6	1,7	0,818
Incremento em Altura (m)	2,6	13,9	3,3	0,784
Número de Árvores ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	39,4	2,7	60,1	0,982
Área Basal ( $\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$ )	7,1	11,1	8,2	0,796
Volume ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	49,8	8,8	63,4	0,962

Em que:  $E_{abs}$  = erro médio absoluto;  $E_r$  = erro médio relativo; REMQ = raiz quadrada dos erros médios quadráticos; d = índice de concordância de Willmott. FONTE: O autor (2017).

Na Figura 13 observa-se a distribuição gráfica dos resíduos das equações de estimativa dos atributos do povoamento. Para a estimativa do diâmetro, observou-se tendenciosidade de superestimativa nas idades acima de 14 anos, com erros de até 40%. Com relação as estimativas de projeção da altura, observou-se tendenciosidade de superestimativa em todas as idades, principalmente nas idades acima de 14 anos, com erros de até 60%. Na estimativa da área basal, houve tendenciosidade de subestimativa em todas as idades. Os únicos atributos que não apresentaram tendenciosidade em sua estimativa foram o número de árvores e volume com erros menores que  $\pm 30\%$ .

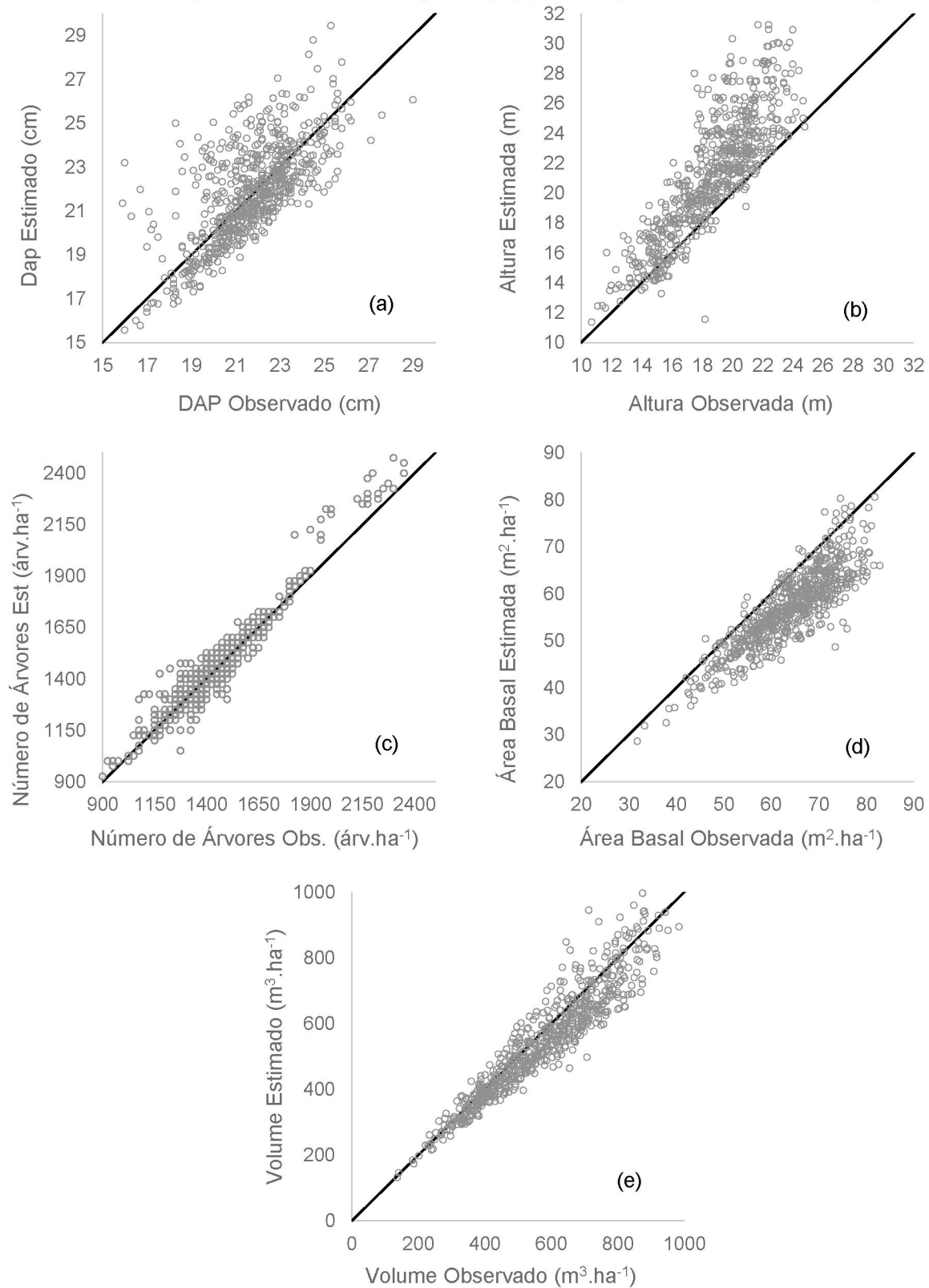
Na Figura 14 são apresentados os valores preditos em função dos valores observados. Observa-se que as estimativas das alturas foram superestimadas, principalmente nos valores acima de 20 m. Nas estimativas de área basal, os valores foram subestimados em todos os momentos. Na estimativa do volume, houve leve tendência de subestimativa nos valores acima de  $500 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ .

FIGURA 13 – RESÍDUOS ENTRE OS VALORES OBSERVADOS E OS VALORES PROJETADOS DOS ATRIBUTOS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELO SISTEMA DE MODELAGEM POR ÁRVORES INDIVIDUAIS DE MIRANDA (2016). (a) PROJEÇÃO DO DIÂMETRO (cm); (b) PROJEÇÃO DA ALTURA (m); (c) PROJEÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (árv.ha<sup>-1</sup>); (d) PROJEÇÃO DA ÁREA BASAL (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>); (e) PROJEÇÃO DO VOLUME (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>).



FONTE: O autor (2017).

FIGURA 14 - VALORES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DOS ATRIBUTOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELO SISTEMA DE MODELAGEM POR ÁRVORES INDIVIDUAIS DE MIRANDA (2016). (a) PROJEÇÃO DO DIÂMETRO (cm); (b) PROJEÇÃO DA ALTURA (m); (c) PROJEÇÃO DO NÚMERO DE ÁRVORES (árv.ha<sup>-1</sup>); (d) PROJEÇÃO DA ÁREA BASAL (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>); (e) PROJEÇÃO DO VOLUME (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>).



FONTE: O autor (2017).

## 5.5 COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DOS SISTEMAS AVALIADOS COM OS RESULTADOS ADVINDOS DO SisPinus

A Tabela 16 mostra os resultados estatísticos das projeções do atributo volume obtidos por quatro diferentes métodos de simulação da produção. Na classe de idade 3, o volume foi superestimado em média  $0,7 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  pelo modelo global (MMG) de Wolf II (2012), bem como subestimado em  $4,8 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  pela modelagem em classe de diâmetros (MCD) com o sistema de equações de Eisfeld (2004), e em  $101,5 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  pelo SisPinus. Na classe de idade 4, o método de modelagem de árvores individuais (MAI) de Miranda (2016) teve o menor viés, com  $3,3 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ . No geral, considerando todas as idades, o menor viés foi apresentado pelo MMG, com  $13,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (1,7%).

Quanto a acurácia, os volumes obtidos pelo SisPinus diferiram em média em  $103,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (16,1%) dos volumes reais. A MCD apresentou acurácia média de  $42,2 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (7,6%) e a MAI de  $48,3 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (7,8%). O método mais acurado foi o de MMG, que apresentou acurácia de  $34,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (5,7%).

TABELA 16 - ESTATÍSTICAS DA PROJEÇÃO DO VOLUME EM CLASSES DE IDADE POR UNIDADE DE ÁREA NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

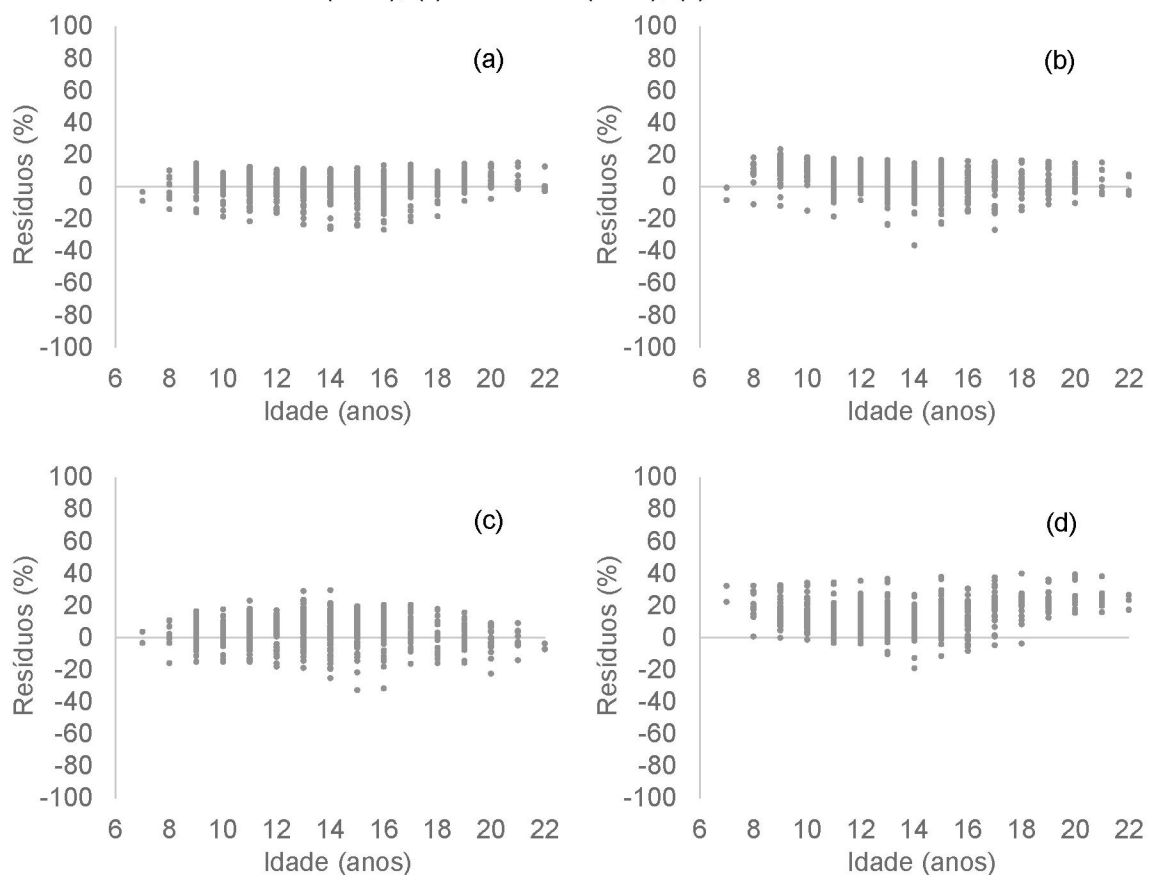
Atributo	Autor	Classes de Idade				Média
		1	2	3	4	
Viés ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	MMG (Wolff II, 2012)	<b>13,4</b>	<b>2,4</b>	<b>-0,7</b>	39,4	<b>13,6</b>
	MCD (Eisfeld, 2004)	39,7	19,9	4,8	22,8	21,8
	MAI (Miranda, 2016)	14,7	34,8	40,7	<b>3,3</b>	23,4
	SisPinus	48,0	56,3	101,5	202,4	102,0
Viés %	MMG (Wolff II, 2012)	<b>3,1</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,7</b>	4,3	<b>1,7</b>
	MCD (Eisfeld, 2004)	10,8	3,6	0,3	2,5	4,3
	MAI (Miranda, 2016)	3,9	5,8	5,2	<b>0,1</b>	3,8
	SisPinus	14,4	10,6	14,4	23,9	15,8
Acurácia ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	MMG (Wolff II, 2012)	<b>21,1</b>	<b>27,1</b>	<b>42,6</b>	47,5	<b>34,6</b>
	MCD (Eisfeld, 2004)	41,5	35,3	46,2	<b>45,9</b>	42,2
	MAI (Miranda, 2016)	22,3	51,5	66,9	52,7	48,3
	SisPinus	48,1	58,5	105,4	202,4	103,6
Acurácia %	MMG (Wolff II, 2012)	<b>5,9</b>	<b>5,1</b>	<b>6,3</b>	<b>5,4</b>	<b>5,7</b>
	MCD (Eisfeld, 2004)	11,5	6,6	6,8	5,4	7,6
	MAI (Miranda, 2016)	6,3	9,2	9,4	6,2	7,8
	SisPinus	14,4	11,1	15,0	23,9	16,1

FONTE: O autor (2017).

A Figura 15 mostra o gráfico de resíduos das estimativas obtidas pelos quatro métodos de projeção do volume. No geral, a MMG, MCD e MAI apresentaram

distribuição de resíduos homogêneas em função da idade com erros menores que  $\pm 20\%$ . Observa-se que a MMG apresentou leve tendenciosidade de superestimativas dos volumes, enquanto o método de MCD apresentou sutil tendenciosidade de subestimativa dos volumes, com erros, em geral, inferiores a 20%. Os resultados da simulação realizada pelo SisPinus apresentaram tendenciosidade de subestimativa em todas as idades, com erros de até 40%.

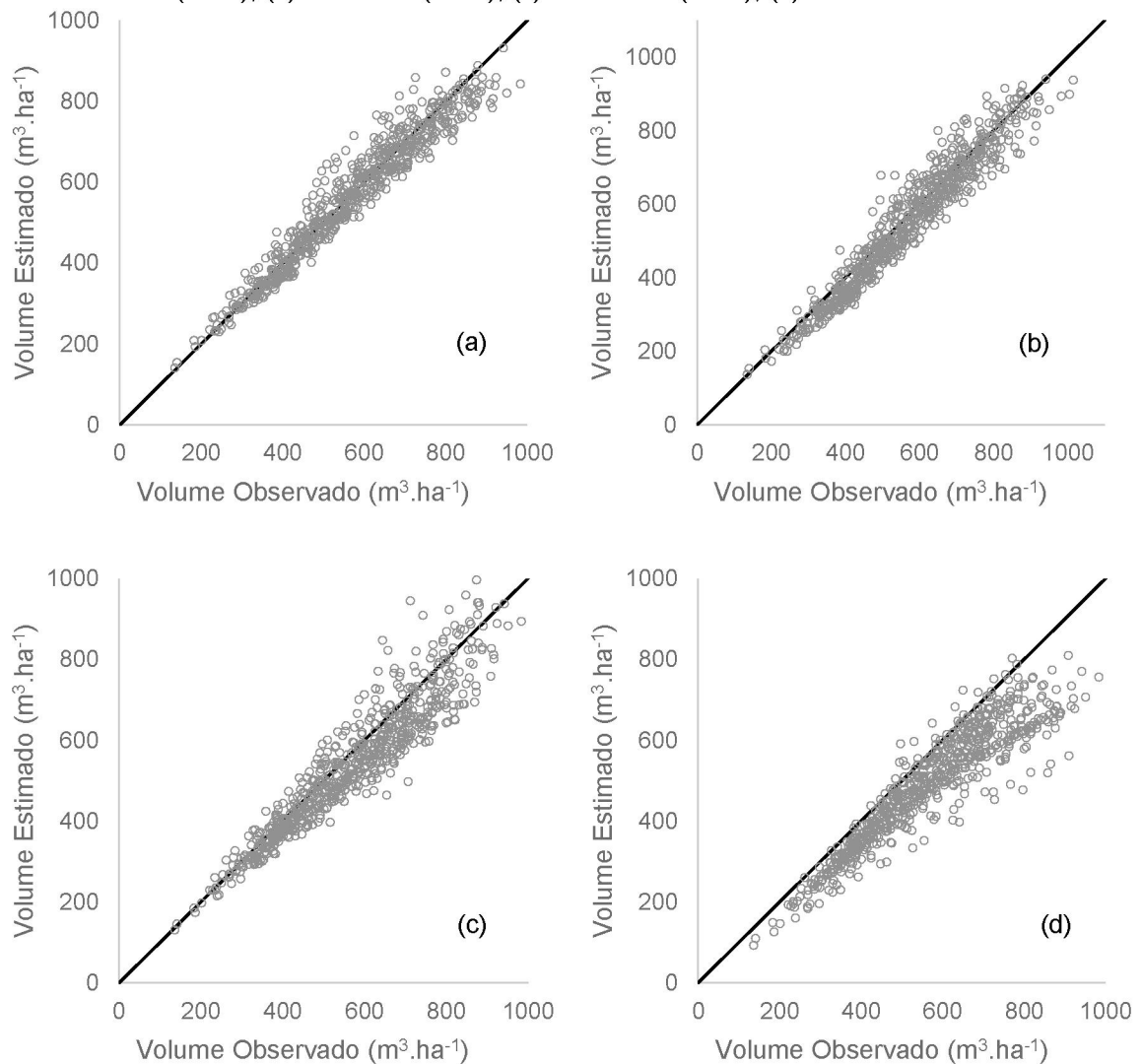
FIGURA 15 - RESÍDUOS ENTRE OS VOLUMES OBSERVADOS E OS VOLUMES PROJETADOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELOS SISTEMAS (a) WOLF II (2012); (b) NASCIMENTO (2015); (c) MIRANDA (2016); (d) SisPinus.



FONTE: O autor (2017).

Na Figura 16 é possível observar os volumes preditos em função dos volumes observados. Os métodos de MMG e MCD não apresentaram tendenciosidade em nenhuma faixa de volume observado. Contudo, nos volumes obtidos pelo SisPinus, observou-se tendenciosidade de subestimativa em todos os valores.

FIGURA 16 - VOLUMES PREDITOS EM FUNÇÃO DOS VOLUMES OBSERVADOS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* PELOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES. (a) WOLF II (2012); (b) EISFELD (2004); (c) MIRANDA (2016); (d) SisPinus.



FONTE: O autor (2017).

Conforme as avaliações estatísticas, dentre todos os sistemas avaliados e considerando os plantios em estudo, o sistema de modelagem global ajustado por Wolff II (2012) apresentou-se como o mais preciso, acurado e livre de tendências para a estimativa do volume em diferentes classes de idade.

## 6 CONCLUSÕES

Independente da categoria de equações avaliadas, observa-se uma relação entre a precisão da estimativa do volume total nos povoamentos estudados e o sítio, material genético, regime de manejo onde as equações foram ajustadas.

Na categoria de equações globais as equações ajustadas por Wolf II (2012) são as mais precisas e acuradas para estimativa da produção em volume nos plantios avaliados.

Para a modelagem em classes de diâmetro, o sistema de Einfeld (2004) é o método mais preciso e acurado para a estimativa do volume.

Na modelagem por árvores individuais de Miranda (2016) observa-se resultados tedenciosos para a estimativa do diâmetro, altura e área basal, no entanto resultados satisfatório para a projeção do volume.

Considerando todos os sistemas validados e os plantios do estudo, o sistema de modelagem global, para estimativa do volume total, ajustado por Wolff II (2012) é o sistema mais preciso, acurado e livre de tendências para a estimativa do volume em diferentes classes de idade.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Inserir as equações próprias ajustadas de sítio e de volume no SisPinus e verificar a possibilidade de melhoria nas estimativas do volume.

Para a modelagem em classes de diâmetro, deve-se testar e avaliar diferentes funções de densidade de probabilidade assim como avaliar a projeção de volume para multiprodutos.

Efetuar a validação das projeções realizadas com dados reais de colheita de madeira.



## REFERÊNCIAS

ABREU, E. C. R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 2000. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

ACERBI JR., F. W.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. de; MAESTRI, R. Modelo para prognose do crescimento e da produção e análise econômica de regimes de manejo para *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 699-713, 2002.

ALMEIDA, C. V. **Avaliação do comportamento morfogenético de *Pinus caribaea* Morelet var. hondurensis Barr. & Golf, "in vitro"**. 1991. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

ARCE, J. E. Modelagem da estrutura de florestas clonais de *Populus deltoides* Marsh através de distribuições diamétricas probabilísticas. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 1, p. 149-164, 2004.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford: Pergamon, 1970.

BAILEY, R. L.; DELL, T. R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.

BAILEY, R. L.; BURGAN, T. M.; JOKELA, E. J. Fertilized mid-rotation-aged slash pine plantations-stand structure and yield prediction models. **South. J. Appl. For.**, v. 13, p. 76-80, 1989.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning**. Burlington, USA, Elsevier, 2009. 342 p.

BOOTH, T. H.; JOVANOVIĆ, T.; NEW, M. A new world climatic mapping program to assist species selection. **Forest Ecology and Management**, v. 163, p. 111-117, 2002.

BORDERS, B. E.; SOUTER, R. A.; BAILEY, R. L.; WARE, K. D. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. **Forest Science**, v. 33, n. 2, p. 570-576, 1987.

BROOKS, J. R.; BORDERS B. E; BAILEY R. L. Predicting diameter distributions for site prepared loblolly and slash pine plantations. **South J. Appl. For.**, v. 16, p. 130-133, 1992.

BUCKMAN, R. E. Growth and yield of red pine in Minnesota. **Technical Bulletin. United States Department Agriculture**, v. 1272, p. 1-50, 1962.

BURK, T. E.; NEWBERRY, J. D. A simple algorithm for moment – based recovery of Weibull distribution parameters. **Forest Science**, v. 30, n. 2, p. 329-332, 1984.

BURKHART, E. H.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. New York: Springer, 2012. 460 p.

CAMPOS, J. C. C.; TURNBULL, J. K. Um sistema para estimar produção por classe de diâmetro e sua aplicação na interpretação do efeito do desbaste. **Revista Árvore**, v. 5, n. 1, p. 1-16, 1981.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2009. 548 p.

CAO, Q.; BURKHART, H. A segmented distribution approach for modeling diameter frequency data. **Forest Science**, v. 30, n. 1, p. 129-137, 1984.

CAO, Q. V. Prediction of Annual Diameter Growth and Survival for Individual Trees from Periodic Measurements. **Forest Science**, v. 46, n.1, p. 127-131, 2000.

CAO, Q. V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, v. 50, n. 5, p. 682-685, 2004.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

CLUTTER, J. L.; JONES, E. P. Prediction of growth after thinning in old field slash pine plantations. USDA. Forest Service. SE. Research Paper, 217: 1-14, 1980.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333 p.

CUNHA, A. de M.; LANI, J. L.; SANTOS, G. R. dos; FERNANDES FILHO, E. I.; TRINDADE, F. S.; SOUZA, E. de. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1179-1191, 2013.

DANIELS, R. F.; BURKHART H. E. **Simulation of individual tree growth and stand development in managed loblolly pine plantations**. Division of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University. FWS-5-75. 1975. 69 p.

DEMERS, C.; LONG, A.; CLAUSEN, R. **What is in a natural resource plan?** Gainesville: University of Florida, 2001.

EISFELD, R. L. **Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio de função probabilística e processo de difusão**. 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro. 2006, 306p.

FERRAZ FILHO, A. C. **Sistema de prognose do crescimento e produção para *Pinus taeda* L. sujeito a regime de desbastes e podas.** 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal Lavras, Lavras, 2009.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da; REISSMANN, C. B.; BELLOTE, A. F. J.; MARQUES, R. **Nutrição de pinus no Sul do Brasil:** diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2001. 23 p. Documentos 60.

FIGURA, M. A. **A distribuição de Weibull na descrição da estrutura diamétrica de *Eucalyptus grandis*: Um enfoque sobre o método dos momentos.** 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FINGER, C. A. G. **Distribuição de diâmetros em *Acácia mearnsii* de Wild, em diferentes povoamentos e idades.** 1982. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.

GADOW, K. V. Fitting distributions of *Pinus patula* stands. **South African Forest Journal**, n. 126, p. 20-29, 1983.

GLADE, J. E. **Prognose de volume por classes diamétricas para *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden.** 1986. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

GUIMARÃES, D. P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto.** 1994. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório anual 2016.** Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016\\_.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf) . Acesso em: 11 janeiro, 2017.

KANGAS, A.; MALTAMO, M. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. **Forest Science**, v. 46, n. 3, p. 390-396, 2000.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do *Pinus* no Brasil.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 2005 p.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M.; LIMA, J. E. de. Um modelo de crescimento e produção para *Pinus taeda* L. na região Sul do Brasil. **Revista Árvore**, v. 25, p. 105-112, 2001.

LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, n.4, p.343-360. 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90042-7](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(83)90042-7)

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba: Unicentro editora, 2006. 316 p.

MAESTRI, R. **Estimativa de produção presente e futura de volume de madeira e peso de casca para povoamentos de Acácia - Negra (*Acacia mearnsii* de Wild)**. 1992. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 2003. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

MALTAMO, M.; KANGAS, A.; UUTTERA, J.; TORNIAINEN, T., SARAMAKI, J. Comparison of percentile based prediction methods and the Weibull distribution in describing the diameter distribution of heterogeneous Scots pine stand. **Forest Ecology and Management**, n. 133, p. 263-274, 2000.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 2011. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

MIRANDA, R. O. V. **Modelagem de árvores individuais para povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2016. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

NASCIMENTO, F. A. F.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MIRANDA, G. M.; ARCE, J. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 235-242, 2015.

NOGUEIRA, G. S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus sp* e de *Tectona grandis*, submetidos a desbaste**. 2003. 145 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

OCHI, N.; CAO, Q. V. A comparison of compatible and annual growth models. **Forest Science**, v. 49, n. 2, p. 285-290, 2002.

OLIVEIRA, E. B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

OLIVEIRA, E. B. **Cultivo de Pinus: Planejamento e Manejo da Produção**. Disponível em: [https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducao1f6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao1f6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-)

[76293187\\_sistemaProducaold=3715&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicold=3239](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112217300000). Acesso em: 11/01/2017.

PIENAAR, L. V.; HARRISON, W. M.; BURGAN, T.; RHENEY, J. W. Yield predictions for site-prepared slash pine plantations in the coastal plain. University of Georgia Plantation Management Research Cooperative, Technical Report No. 1988-1. 81 p.

PIENAAR, L. V.; HARRISON, W. M. Simultaneous growth and yield prediction equations for *Pinus elliottii* plantations in Zululand. **South African Forest Journal**, n. 149, p. 48-53, 1989.

PHILLIP, M. S. **Measuring trees and Forests**. Wallingford: CAB International, 1994. 264 p.

REINEKE, L.H. Perfecting a stand-density index for even aged forests. **Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 7, p. 627-638, 1933.

RETSLAFF, F. A. de S. **Modelagem do crescimento e produção em classes de diâmetro para plantios de *Eucalyptus grandis***. 2010. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2010.

RETSLAFF, F. A. de S. **Simulador para prognose da produção de *Pinus taeda* com diagrama de manejo da densidade associado à modelagem em classes de diâmetro**. 2014. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ROMANIUK, D. S. **Modelagem do crescimento e da produção em plantios de *Pinus taeda* L. na região Centro-Sul do Paraná**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2015.

SANQUETTA, C. R. Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal. **FUPEF Série didática**, n. 8, 1996.

SANTANA, C. J. de O. **Simulação do crescimento e da produção em plantações desbastadas de *Eucalyptus grandis* com diferentes procedimentos de obtenção dos parâmetros da distribuição Weibull**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; BERNETT, L. G.; SCHNEIDER, P. S. P.; FLEIG, F. D. Estimativa dos parâmetros da função de densidade probabilística de weibull por regressão aninhada em povoamento desbastado de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 381-392, 2008.

SCHUCHOVSKI, M. S. **Modelos alométricos e de produção para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina**. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SCOLFORO, J. R. S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para**

***Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1990. 290 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. do A. Um sistema de crescimento e produção com simulador de desbaste. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. 51-64, 1996.

SCOLFORO, J. R. S. **O sistema PISAPRO**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 99 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 441 p.

SCOLFORO, J. R. S. **O sistema Pinusprog**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1999. 69 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

SHIMIZU, J. Y. Pinus na silvicultura brasileira. **Madeira**, n. 1, p. 04-12, 2006.

SILVA, J. A. A.; BAILEY, R. A. Predicting diameter distribution in fertilized slash pine plantations with the Weibull distribution. **Acta Forestalia Brasiliensis**, n. 2, v.1, p. 47-62, 1987.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. 1973. 32p.

STALL, D. **Avaliação econômica e análise de sensibilidade de regimes de manejo em florestas de *Pinus taeda* L. no planalto serrano de Santa Catarina**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SULLIVAN, A. D.; CLUTTER J. L. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. **Forest Science**, n. 18, p. 76-86, 1972.

THIERSH, A. **Eficiência das distribuições diamétricas para prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis***. 1997. 155 f. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield**: application to mixed tropical forests. Wallingford: CAB International, 1994. 312 p.

VIANA, J. J. **Modelagem do crescimento e da produção em classes de diâmetro para plantios de *Pinus taeda* L. não desbastados**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2016.

WENDLING, W. T. **Sistema computacional e modelagem para simulação dinâmica da produção florestal**. 2007. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WOLFF II, N. I. **Modelagem do crescimento e produção de *Pinus taeda* L.** 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2012.

ZARNOCH, S. J.; DELL, T. R. An evaluation of percentile and maximum likelihood estimators of Weibull parameters. **Forest Science**, v. 31, n. 1, p. 260-268, 1985.

ZHANG, X.; LEI, Y.; CAO, Q. V. Compatibility of stand basal area predictions based on forecast combination. **Forest Science**, v. 56, n. 6, p. 552-557, 2010.

ZOBEL, B. Loblolly pine in retrospect In: SYMPOSIUM OF LOBLOLLY PINE ECOSYSTEM (EAST REGION), Raleigh, 1982. **Proceedings...** Raleigh, North Carolina University Press, p. 1-15, 1982.