

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA FLORESTAL**

**ESTRUTURA BIOECONÔMICA DA PRODUÇÃO NO
MANEJO DA DENSIDADE DE *Pinus taeda* L. NA
REGIÃO DO PLANALTO CATARINENSE, BRASIL**

TESE DE DOUTORADO

Paulo Sérgio Pigatto Schneider

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**ESTRUTURA BIOECONÔMICA DA PRODUÇÃO NO
MANEJO DA DENSIDADE DE *Pinus taeda* L. NA REGIÃO DO
PLANALTO CATARINENSE, BRASIL**

Paulo Sérgio Pigatto Schneider

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal**

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Schneider, Paulo Sérgio Pigatto
Estrutura bioeconômica da produção no manejo da
densidade de Pinus taeda L. na região do planalto
catarinense, Brasil / Paulo Sérgio Pigatto Schneider.-
2012.
188 p. ; 30cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finger
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2012

1. Autodesbaste. 2. Regime de manejo. 3. Zona de
manejo. 4. Bioeconomia. 5. Pinus taeda L. I. Finger,
César Augusto Guimarães II. Título.

©2012

Todos os direitos autorais reservados a Paulo Sérgio Pigatto Schneider. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Alameda Sibipiruna, nº 420, Bairro: Cerrito, Santa Maria, RS, Brasil.

CEP: 97095-660;

Fone: (0xx) 55 32218963;

Endereço Eletrônico: psp@mail.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTRUTURA BIOECONÔMICA DA PRODUÇÃO NO MANEJO DA
DENSIDADE DE *Pinus taeda* L. NA REGIÃO DO PLANALTO
CATARINENSE, BRASIL**

elaborada por
Paulo Sérgio Pigatto Schneider

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

César Augusto Guimarães Finger, Prof. Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ivanor Müller, Prof. Dr. (UFSM)

Eduardo Pagel Floriano, Prof. Dr. (UNIPAMPA)

Jorge Farias, Prof. Dr. (UFSM)

Randolf Zachow, Dr. (IBAMA)

Santa Maria, 12 outubro de 2012.

Dedico...

Aos meus pais e à minha família,
pelo apoio sincero à minha capacitação
florestal.

AGRADECIMENTOS

Este estudo é oferecido a todos os que acreditam nas forças da natureza e na Engenharia Florestal. Assim, penso que todos estão capacitados a entender o reflexo desta vitória. Em especial, gostaria de externar meus agradecimentos:

– ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado, o que permitiu a realização do curso de Doutorado em Engenharia Florestal;

– à empresa Klabin S. A. e aos seus engenheiros Djalma Milles Chaves e Antônio Maurício Moreira, por ceder os dados experimentais e por sugerir técnicas para a realização deste trabalho;

– aos meus orientadores, Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, Dr. Frederico Dimas Fleig e Dr. Solon Jonas Longhi, meu agradecimento pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, mais um passo para a realização de descobertas na Engenharia Florestal;

– ao Prof. Dr. Paulo Renato Schneider, pela eterna concretização de importantes descobertas pessoais e pela grande amizade;

– à minha família querida, que tanto me ajudou, neste período de realização do Doutorado, a desenvolver esta pesquisa florestal com muita paz;

– aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da UFSM, pelas importantes observações de cunho temático e técnico e pelas minhas realizações pessoais como estudante, quero externar meu eterno e sincero agradecimento.

EPÍGRAFE

Este trabalho foi concebido a partir de informações dendrométricas disponibilizadas pela empresa Klabin S. A.

Os dados dendrométricos utilizados tiveram origem em experimento de espaçamento de *Pinus taeda* L. instalado no município de Otacílio Costa, em Santa Catarina. A pesquisa foi idealizada pelo Dr. Djalma Milles Chaves, pelo engenheiro Antônio Maurício Moreira e por outros pesquisadores da empresa.

Este experimento de espaçamento foi medido, periodicamente, durante 18 anos, tendo originado os dados dendrométricos utilizados na realização do estudo concebido para servir de modelo estrutural auxiliar no manejo de populações florestais de *Pinus taeda* L., intensamente cultivado na região sul do Brasil.

Para isso, a execução do trabalho foi dividida em duas etapas distintas e complementares.

Na primeira fase, desenvolvida quando da realização do curso de mestrado, foram realizados os estudos preliminares do comportamento dos parâmetros do povoamento com as diferentes densidades iniciais de plantio.

Na segunda, esses resultados foram utilizados parcialmente, para dar prosseguimento às pesquisas de estruturação da produção e avaliação bioeconômica dos regimes de manejo planejados para serem aplicados aos povoamentos.

Dessa forma, são apresentados os resultados integrais da pesquisa, a qual esperamos que possa ser um modelo de planejamento da produção e auxiliar na implementação de regimes de manejo a serem adotados na condução de povoamentos de *Pinus taeda* L. na região Sul do Brasil.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTRUTURA BIOECONÔMICA DA PRODUÇÃO NO MANEJO DA DENSIDADE DE *Pinus taeda* L. NA REGIÃO DO PLANALTO CATARINENSE, BRASIL

Autor: Paulo Sérgio Pigatto Schneider

Orientador: Dr. César Augusto Guimarães Finger

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 12 de outubro de 2012.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a eficiência dos modelos que expressam a relação de densidade e diâmetro em povoamentos equiâneos de *Pinus taeda* L., manejados em densidade completa e altamente estocados, para obtenção de um modelo bioeconômico da produção. Para isso, foram testados modelos de densidade e diâmetro, através de dados originados de 50 parcelas permanentes, medidas anualmente até os 18 anos, alocados em povoamentos implantados em espaçamentos de 1,5x1,0 m, 2,5x1,0 m, 1,5x2,0 m, 2,0x2,0 m, 1,5x3,0 m, 2,5x2,0 m, 2,0x3,0 m e 2,5x3,0 m, mantidos em densidade completa, em Otacílio Costa, região fisiográfica do planalto do estado de Santa Catarina. Os resultados obtidos da modelagem bioeconômica da produção, baseada no Diagrama de Manejo da Densidade para sistema de alto fuste, permitiram concluir que os modelos propostos por Reineke, Yoda, Zeide e Tang apresentaram uma boa precisão estatística, com um coeficiente de determinação superior a 0,88 e um coeficiente de variação inferior a 1,25%, porém o modelo de Tang mostrou-se mais preciso e eficiente. A dimensão do diâmetro médio no ponto em que inicia o autodesbaste na população varia consideravelmente com a densidade de árvores implantadas por hectare. Para todos os espaçamentos de plantio analisados, não se comprovou o valor do coeficiente angular de $-3/2$ da lei de autodesbaste proposto por Tang, sendo uma decorrência do espaçamento inicial. O limite de autodesbaste de populações menos densas ocorre com um diâmetro médio pouco inferior ao obtido em máxima densidade, sendo este diretamente proporcional à densidade de árvores quando da implantação da floresta. O modelo de autodesbaste descreveu as zonas de manejo ótimo dos indivíduos na população entre limites de 0,45 e 0,55 da densidade máxima da floresta. O incremento corrente anual em diâmetro entre o 6º e o 7º ano, quando relacionado com a densidade relativa ($G/d^{0,5622}$), permitiu identificar cinco zonas de crescimento, definidas por: espaço excessivo – as árvores crescem livre de concorrência; crescimento livre – o incremento em diâmetro é máximo; aumento da competição – o incremento em diâmetro começa a diminuir; estoque completo – a produtividade do povoamento é máxima; e iminente mortalidade – começa a haver morte de indivíduos por densidade excessiva e alta concorrência. Os Diagramas de Manejo da Densidade com as variáveis diâmetro médio, área basal e volume por Índice de Densidade do Povoamento foram eficientes e permitiram estimar estes valores com acurácia, para uma eficiência igual a 0,99. As linhas que delimitam as zonas de concorrência permitem projetar a trajetória do diâmetro por densidade populacional, com definição da idade de corte final. As distribuições de probabilidade Normal, Ln-normal, Weibull e Gama descreveram com acurácia a variação da densidade dos povoamentos, mas a função de Weibull, com dois parâmetros, foi compatível pela simplicidade ao ajuste e à eficiência na prognose das frequências por diâmetro no tempo. A forma de tronco ajustada pelo polinômio do 5º grau apresentou melhores estimativas que outros modelos. O Valor Presente Líquido de R\$ 15.587,60 ha^{-1} foi determinado para o regime de manejo com três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos e corte final aos 22, superior aos demais regimes simulados. A comparação dos regimes de manejo pela equivalência dos horizontes de planejamento em 28 anos, determinado pelo Valor Anual Equivalente, indicou o regime de manejo com três desbastes e corte final aos 22 anos como o de maior eficiência econômica, com um valor de R\$ 1.380,10 ha^{-1} . A taxa interna de retorno em qualquer dos regimes de manejo simulados foi altamente atrativa, tendo variado de 14,83 % a.a. em povoamentos manejados com três desbastes e corte final aos 22 anos a 14,25 % a.a. em povoamentos manejados com dois desbastes e corte final aos 18 anos. A maior razão benefício sobre os custos foi de 2,81, obtida no regime de manejo com três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos e corte final aos 22.

Palavras-chave: Autodesbaste. Regime de manejo. Zona de manejo. Bioeconomia. *Pinus taeda* L.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

BIOECONOMICS STRUCTURE OF PRODUCTION IN DENSITY MANAGEMENT OF *Pinus taeda* L. FOR THE PLATEAU REGION OF SANTA CATARINA, BRAZIL

Author: Paulo Sérgio Pigatto Schneider
Advisor: Dr. César Augusto Guimarães Finger
Date and Place of Defense: Santa Maria, October 12th, 2012.

This work was developed with the aim of studying the efficiency of the models that express the relationship of density and diameter in evenaged stands of *Pinus taeda* L., managed in full density and highly stocked for a bioeconomic model of production. For this, were tested density and diameter models, using data derived from 50 permanent plots, measured annually until 18 age, allocated to settlements established in the spacing of 1.5x1.0 m, 2.5x 1.0 m, 1.5x2.0 m, 2.0x2.0 m, 1.5x3.0 m, 2.5x2.0 m, 2.0x3.0 m and 2.5x3.0 m, kept at full density, in Otacílio Costa, physiographic region of Santa Catarina State plateau. The results of the bioeconomic modeling of production, based on the density management diagram system for tall trees, we concluded that the models proposed by Reineke, Yoda, Zeide and Tang showed a good statistical precision, with a determination coefficient higher than 0.88 and coefficient of variation less than 1.25 % but the model of Tang was more accurate and efficient. The size of the diameter at the point where you start self-thinning in the population varies considerably with the density of trees established per hectare. For all plant spacings analyzed did not prove the value of the slope of -3/2 law of self-thinning proposed by Tang and is a result of the initial spacing. The limit of self-thinning in less dense populations, occurs with a diameter slightly less than in maximum density, which is directly proportional to the density of trees when the implementation of the forest. The model of self-thinning described the management zones of great individuals in the population, between 0.45 and 0.55 limits the maximum density of the forest. The annual increment in diameter between 6 and 7 years, when related to relative density ($G/d^{0.5622}$) identified five areas of growth, defined by: excessive space - trees grow free of competition; free growth - where growth in diameter is maximum; increased competition- when the diameter increment begins to decrease; full density - when productivity of the stand is maximum; and imminent death - begins when individuals have died by excessive density and high competition. The Diagrams Density Management of the variables mean diameter, basal area, volume by the Population Density Index was efficient and to estimate this values with accuracy, showed an efficiency of 0.99. The lines demarcating the areas of competition allow us to project the trajectory of the diameter and density, with the definition of the clearcutting. The Normal, Ln-normal, Weibull and Gamma probability distributions, described accurately the variation of the density of the stands, but the Weibull function with two parameters was comparable to the adjustment by the simplicity and efficiency in the prognosis of frequencies for diameter in time. The shape of the trunk was adjusted by the polynomial of five degree, allowed the best estimates than other models. The net present value of R\$ 15587.60 ha⁻¹ was given to the management regime with three thinnings at 9, 13 and 18 years and cut at 22 years, higher than the other schemes simulated. A comparison of management regimes for the equivalence of planning horizons for 28 years, determined by the equivalent annual value, said the management regime with three thinned and cut at 22 years, such as greater economic efficiency, with a value of R\$ 1380.10 ha⁻¹. The internal rate of return in any simulated management regimes was highly attractive, with varying from 14.83 % per year in managed regimes stands with three thinning and cut to 22 years to 14.25 % per year in managed regimes stands with threethinning and cut to 18 years. The biggest benefit/costs ratio was 2.81, obtained in the management regime with three thinnings, at 9, 13 and 18 years and final cutting at 22 years.

Keywords: Self-thinning. Management regime. Management zone. Bioeconomie. *Pinus taeda* L.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações ajustadas para descrever o crescimento em diâmetro, a área basal e a produção volumétrica.	55
Tabela 2 – Função de forma de tronco de árvores.	65
Tabela 3 – Centros de custos das atividades e dos insumos utilizados em um horizonte de planejamento florestal.	74
Tabela 4 – Parâmetros das equações testadas para estimar a altura dominante.....	79
Tabela 5 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações de altura dominante.....	80
Tabela 6 – Alturas dominantes por idade dos índices de sítio.	81
Tabela 7 – Parâmetros das equações testadas para estimar o diâmetro.	83
Tabela 8 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações de diâmetro.....	83
Tabela 9 – Parâmetros das equações testadas para estimar a altura.....	85
Tabela 10 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações da altura.....	85
Tabela 11 – Correlação de Pearson da probabilidade de mortalidade com variáveis dendrométricas.	87
Tabela 12 – Estatísticas da modelagem da função de probabilidade de mortalidade	88
Tabela 13 – Modelo probabilístico da mortalidade ajustada por tratamento de espaçamento.	90
Tabela 14 – Caracterização dos dados utilizados no estudo da densidade.	91
Tabela 15 – Estatísticas dos modelos de densidade e diâmetro ajustados	92
Tabela 16 – Estatísticas para validação e seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio.	93
Tabela 17 – Estatísticas do modelo de densidade e diâmetro de Tang, Meng e Meng, ajustado por espaçamento.....	94
Tabela 18 – Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.	106
Tabela 19 – Parâmetros estatísticos das equações de volume testadas.....	108
Tabela 20 – Área basal (m^2ha^{-1}) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.....	110
Tabela 21 – Volume ($m^3 ha^{-1}$) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.....	112

Tabela 22 – Prognose dos parâmetros dendrométricos de uma população com IDP igual a 600.	116
Tabela 23 – Diferenças absolutas e relativas dos volumes por hectare reais e estimados no Diagrama de Manejo da Densidade (DMD) para um povoamento implantado em espaçamento de 2,0x2,0 m.	117
Tabela 24 – Valores médio, mínimo e máximo e desvio padrão dos dados mensurados nas parcelas permanentes observadas no tempo, nos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.	118
Tabela 25 – Parâmetros das equações de distribuição de frequência para as idades de 6, 8, 12, 14, 16 e 18 anos para dados dos espaçamentos de 2,0x2,0m e 2,5x3,0m. ..	119
Tabela 26 – Testes estatísticos de aderência das funções de probabilidade de frequência ajustados por idade dos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.	121
Tabela 27 – Parâmetros estatísticos da função de Weibull com dois e três parâmetros.	124
Tabela 28 – Estatísticas da função de Weibull com dois e três parâmetros.	124
Tabela 29 – Percentis da função na distribuição de Weibull com dois e três parâmetros.	125
Tabela 30 – Estatísticas das equações de determinação dos parâmetros (b_i , c_i) da equação de Weibull.	126
Tabela 31 – Estatísticas das equações de forma de tronco ajustado para o conjunto de árvores dos espaçamentos de 3,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.	129
Tabela 32 – Valor dos escores dos parâmetros estatísticos das equações da forma de tronco.	130
Tabela 33 – Análise de covariância entre os espaçamentos de 3,0x2,0 m e 2,5x3,0 m para a soma dos quadrados do Tipo I.	131
Tabela 34 – Sortimentos de madeira para árvores individuais de <i>Pinus taeda</i> L.	134
Tabela 35 – Distribuição dos volumes em $m^3 ha^{-1}$ por classe de sortimentos e diâmetro de um povoamento de 18 anos de idade.	137
Tabela 36 – Densidades absolutas antes e depois do desbaste por regime de manejo.	149
Tabela 37 – Produções dos regimes de manejo sem desbaste e com um, dois e três desbastes.	151
Tabela 38 – Valor Presente Líquido dos regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. Data: 30/04/2010.	153
Tabela 39 – Valor Anual Equivalente dos regimes de manejo para <i>Pinus taeda</i> L. Data: 30/04/2010.	155
Tabela 40 – Taxa interna de retorno para os seis regimes de manejo simulados.	157
Tabela 41 – Razão dos benefícios totais sobre os custos totais dos regimes de manejo para <i>Pinus taeda</i> L. Data: 30/04/2010.	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica do planalto catarinense e da área de coleta dos dados do estudo (sinalizada em vermelho) no município de Otacílio Costa.....	53
Figura 2 – Dispersão dos resíduos de altura dominante em metros do modelo de Backmann modificada sem intercepto.	80
Figura 3 – Classificação de sítio para <i>Pinus taeda</i> L.....	82
Figura 4 – Dispersão dos resíduos de diâmetro do modelo de Backmann modificada sem intercepto.	84
Figura 5 – Dispersão dos valores residuais de altura do modelo de Backmann modificada sem intercepto	86
Figura 6 – Distribuição dos resíduos de Probabilidade de Mortalidade (PM).	89
Figura 7 – Mortalidade relativa estimada por idade para povoamento implantado no espaçamento maior que 2,5x3,0 m considerando o desenvolvimento normal do diâmetro e da altura dominante.	91
Figura 8 – Dispersão dos resíduos do logaritmo de árvores/ha pelo logaritmo do diâmetro no modelo de Tang, Meng e Meng (1994), na equação 10.....	92
Figura 9 – Tendência da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio em diferentes espaçamentos de implantação do povoamento.....	95
Figura 10 – Tendências médias do autodesbaste definido pela densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio em espaçamentos reduzidos obtidas através do modelo de Tang, Meng e Meng (1994).	97
Figura 11 – Dispersão dos resíduos de área basal em função do diâmetro médio.	98
Figura 12 – Tendência da densidade relativa em função do diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.	99
Figura 13 – Limites das fases de concorrência entre indivíduos em densidade de árvores por diâmetro médio, em unidade aritmética: Linha A – máxima densidade por diâmetro, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B – manejo com estoque completo.....	100
Figura 14 – Incremento corrente anual em diâmetro entre o 6º e o 7º ano para <i>Pinus taeda</i> L. em função da densidade relativa, indicando as zonas de competição.	101
Figura 15 – Diâmetro no momento da ocorrência do autodesbaste em relação ao número de árvores por hectare com referência ao espaçamento inicial.	102
Figura 16 – Relação do diâmetro pela área basal no momento da ocorrência do autodesbaste por espaçamento inicial.	103

Figura 17 – Desenvolvimento da área basal em relação ao diâmetro por espaçamento inicial.	104
Figura 18 – Relação do diâmetro pela área basal em relação ao diâmetro por espaçamento inicial.....	105
Figura 19 – Índice de Densidade do Povoamento com a representação da densidade de árvores por hectare por diâmetro médio em unidade aritmética.....	107
Figura 20 – Volume médio em relação à densidade de árvores por hectare: Linha A – volume máximo por densidade, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B – manejo com estoque completo.	109
Figura 21 – Área basal por hectare em função do diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.	111
Figura 22 – Volume por hectare em função do diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.	113
Figura 23 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento considerando a inter-relação da área basal pelo número de árvores e da área basal por hectare com o diâmetro médio.	114
Figura 24 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento, considerando a inter-relação do volume pelo número de árvores por hectare com o diâmetro médio.	115
Figura 25 – Distribuição probabilística das frequências por classe de diâmetro aos 6 anos de idade com dados originados de povoamentos implantados em espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.	122
Figura 26 – Distribuição probabilística das frequências por classe de diâmetro aos 16 anos de idade com dados originados de povoamentos implantados em espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.	123
Figura 27 – Distribuição dos percentis da função de Weibull com dois e três parâmetros. .	125
Figura 28 – Prognose da distribuição de frequência por classe de diâmetro com os parâmetros da equação de Weibull estimados por regressão aninhada.	127
Figura 29 – Distribuição dos resíduos de forma de tronco do polinômio do 5º grau para os dados agrupados dos espaçamentos de 3,0x2,0 m e 3,0x2,5 m.	130
Figura 30 – Forma relativa média de tronco das árvores originadas dos espaçamentos de 3,0 x2,0 m e 2,5x3,0 m.	133
Figura 31 – Diagrama de Manejo da Densidade de Povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. com os parâmetros médios da população: volume (m³), diâmetro (cm), altura (m) e densidade de árvores (ha).....	139
Figura 32 – Regime de manejo 1: trajetória do povoamento com o crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores sem a realização de desbastes.	143

Figura 33 – Regime de manejo 2: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com um desbaste, aos 9 anos, e corte final aos 13.....	144
Figura 34 – Regime de manejo 3: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com dois desbastes, aos 9 e 13 anos, e corte final aos 18.	145
Figura 35 – Regime de manejo 4: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com a realização de dois desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 22.	146
Figura 36 – Regime de manejo 5: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com a realização de três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 26.	147
Figura 37 – Regime de manejo 6: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com três desbastes mais pesados, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 28.	148
Figura 38 – Evolução do volume dos sortimentos de distribuição por idade em regime de manejo com três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 26.	152
Figura 39 – Valor Presente Líquido dos regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. Regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.	154
Figura 40 – Valor Anual Equivalente (VAE) de regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. Regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.....	156
Figura 41 – Razão benefícios sobre custos dos regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de <i>Pinus taeda</i> L. Regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.	159

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Rendimentos operacionais, custos e insumos utilizados em um investimento florestal.....	177
Anexo B – Programação dos modelos de probabilidade da distribuição diamétrica	179
Anexo C– Lista de equações	183

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 OBJETIVOS	29
2.1 Objetivo geral.....	29
2.2 Objetivos específicos.....	29
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	31
3.1 Crescimento e produção de povoamentos florestais.....	31
3.2 Densidade, tamanho das árvores e autodesbaste.....	35
3.3 Diagrama de Manejo da Densidade.....	39
3.4 Distribuição de frequência e volume por classe diamétrica	42
3.5 Forma de tronco e sortimento de madeira	45
3.6 Avaliação econômica	46
3.7 Métodos de avaliação de investimentos florestais.....	50
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1 Localização e caracterização da área de estudo	53
4.2 Metodologias empregadas.....	54
4.2.1 Crescimento no tempo	54
4.2.2 Probabilidade de mortalidade	55
4.2.3 Modelos de densidade e diâmetro	56
4.2.4 Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento.....	57
4.2.5 Determinação das densidades relativas	58
4.2.6 Formulação do Diagrama de Manejo da Densidade.....	58
4.2.7 Distribuição de densidade probabilística.....	60
4.2.8 Prognose da distribuição probabilística de frequência	62
4.2.9 Forma de tronco e sortimentos de madeira.....	65
4.2.10 Critérios de seleção dos modelos de regressão.....	69
4.2.11 Análise de covariância.....	71
4.2.12 Métodos de avaliação econômica	71
4.2.13 Formação dos custos operacionais do investimento.....	73
4.2.14 Determinação dos preços dos sortimentos de madeira.....	75
4.2.15 Processamento dos dados	76
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1 Crescimento da altura dominante.....	79
5.2 Classificação de sítio.....	81
5.3 Crescimento em diâmetro	82
5.4 Crescimento da altura média.....	84
5.5 Probabilidade de mortalidade	86
5.6 Determinação do autodesbaste.....	90
5.7 Determinação do autodesbaste por espaçamento	94
5.8 Densidade relativa da população	97
5.9 Determinação das zonas de concorrência.....	99
5.10 Relação do diâmetro pela área basal (d:G).....	101
5.11 Índices de Densidade do Povoamento.....	105
5.12 Relações do volume da árvore média com a densidade	107

5.12.1	Relação da produção com o Índice de Densidade do Povoamento.....	109
5.12.2	Diagramas de Manejo da Densidade - DMD	113
5.12.3	Validação dos Diagramas de Manejo da Densidade - DMD	116
5.13	Distribuição de probabilidade de frequência	117
5.13.1	Distribuição de probabilidade de frequência por diâmetro e idade	118
5.13.2	Comparação da função de Weibull com dois e três parâmetros	123
5.13.3	Prognose da probabilidade de frequência por classe diamétrica.....	126
5.14	Forma de tronco e sortimentos	128
5.14.1	Seleção da equação de forma de tronco	128
5.14.2	Prognose dos sortimentos.....	136
5.15	Integração do sítio com o Diagrama de Manejo da Densidade.....	138
5.16	Manejo estrutural da densidade populacional	141
5.16.1	Regime de manejo 1: trajetória da população conduzida sem desbaste e com corte raso aos 13 anos	130
5.16.2	Regime de manejo 2: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em população conduzida com um desbaste e corte final aos 13 anos	131
5.16.3	Regime de manejo 3: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em população conduzida com dois desbastes e corte final aos 18 anos	132
5.16.4	Regime de manejo 4: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em função da densidade da população conduzida com três desbastes e corte final aos 22 anos.....	145
5.16.5	Regime de manejo 5: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em função da densidade da população conduzida com três desbastes e corte final aos 26 anos.....	135
5.16.6	Regime de manejo 6: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em função da densidade com três desbastes e corte final aos 28 anos	147
5.16.7	Síntese das densidades das trajetórias dos povoamentos por regimes de manejo	148
5.16.8	Produção dos regimes de manejo por classe de diâmetro e sortimentos de madeira...	150
5.17	Avaliação econômica dos regimes de manejo	152
5.17.1	Valor Presente Líquido	152
5.17.2	Valor Anual Equivalente.....	154
5.17.3	Taxa interna de retorno	156
5.17.4	Razão benefícios sobre custos (B/C)	157
6	CONCLUSÕES	161
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163
	ANEXOS	175

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas do manejo de povoamentos florestais reside na falta de informações que permitam efetuar o planejamento para possibilitar a otimização da produção de bens madeireiros e não madeireiros simultaneamente, em benefício dos produtores florestais e da sociedade.

Entende-se por planejamento da produção florestal a organização e o controle do volume para obter o rendimento sustentado dos povoamentos florestais, com a finalidade de buscar o equilíbrio entre o crescimento, a produção e o corte da floresta. A regulação da produção se constitui no ponto de maior importância do manejo florestal.

Geralmente, o planejamento é definido, na prática, como o processo de ordenação para alcançar um ou vários objetivos. No caso do planejamento florestal, deve-se ter bem claro os objetivos, uma vez que o suprimento contínuo de madeira é conseguido somente se for efetuado um controle da exploração e do manejo da floresta (FAO/SWE/TF, 1984).

O manejo florestal moderno é efetuado sob a ótica do regime sustentado e uso múltiplo, que expressa a necessidade de produzir, simultaneamente, madeira, água de boa qualidade, vida silvestre, pastagem e recreação ao ar livre, de tal maneira que as necessidades econômicas, sociais e culturais da população sejam satisfeitas, com o mínimo de alteração dos recursos básicos do solo e dos demais fatores ambientais.

Na condução de povoamentos florestais equiâneos em sistema de alto fuste, é de fundamental importância conhecer as inter-relações entre a densidade de árvores por hectare e o desenvolvimento do diâmetro no tempo. À medida que os povoamentos vão envelhecendo, aumenta a taxa de mortalidade de indivíduos, que deve ser evitada com a antecipação de intervenções de desbastes, aplicada com intensidade adequada, na dependência da capacidade produtiva do sítio e da velocidade de crescimento da espécie.

Em plantios homogêneos e puros, as árvores tendem a expandir as copas, tanto no sentido horizontal como no vertical, e interceptar maior quantidade de energia solar à medida que se desenvolvem. Por isso, em uma população, a competição entre os indivíduos aumenta com a idade, culminando com a dominação de alguma árvore e a morte de outras. Essa supressão de indivíduos, causada pela competição extrema, é convencionalmente chamada de autodesbaste.

Por outro lado, a produção qualitativa e quantitativa de madeira dos povoamentos florestais está relacionada ao sítio, aos tratamentos silviculturais, à densidade da população e a outros fatores ambientais. Sobre isso, deve-se considerar que, à medida que aumenta o número de árvores, aumenta diretamente a área basal, até o momento em que inicia a competição entre as árvores, sendo então estabelecido o início da competição extrema na floresta e, com isso, a manutenção ou redução da área basal.

Nos últimos decênios houve uma evolução sobre os modelos matemáticos que incorporam conceitos ecológicos, como a competição intraespecífica, que se baseia nas relações de densidade e tamanho. Essas relações referem-se às variáveis dendrométricas do povoamento, expressas em uma idéia de tamanho, como área basal e volume com o número de árvores por hectare. Mediante o emprego destas relações dendrométricas, é possível construir os Diagramas de Manejo da Densidade que, em geral, são modelos paramétricos simples, que permitem estimar e prognosticar os parâmetros de interesse no planejamento da produção florestal.

Através do modelo de Diagrama de Manejo da Densidade, o silvicultor pode prever rendimentos futuros para várias condições de manejo da densidade e também determinar a intensidade de desbaste, para alcançar os objetivos de produção e de diâmetro desejados na idade de corte final.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi determinar a estrutura da produção dos povoamentos de *Pinus taeda* L. e, com base na teoria do Diagrama de Manejo da Densidade, desenvolver modelos de simulação bioeconômica para a condução desses povoamentos.

2.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) estudar modelos de densidade e diâmetro em função do diâmetro médio;
- b) analisar o ponto de ocorrência do autodesbaste em povoamentos implantados em diferentes espaçamentos;
- c) elaborar Diagramas de Manejo da Densidade, considerando sua interação com a qualidade do sítio;
- d) determinar a zona ótima de competição para condução dos povoamentos;
- e) determinar a forma de tronco, os sortimentos para as árvores individuais e a distribuição diamétrica da população;
- f) determinar a trajetória do diâmetro médio por densidade populacional para a definição de regimes de manejo específicos;
- g) avaliar a rentabilidade de regimes de manejo aplicados aos povoamentos da espécie estudada;
- h) estruturar e modelar a produção para a prognose de povoamentos com bases bioeconômicas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Crescimento e produção de povoamentos florestais

A necessidade das plantas por elementos essenciais, como luz, água, nutrientes, CO₂ e espaço vital, faz com que elas entrem em concorrência entre si na busca destes elementos. Algumas espécies respondem de forma diferente em relação ao espaçamento de plantio, necessitando mais espaço vital para o desenvolvimento da copa e do sistema radicular do que outras. A competição conduz à eliminação de indivíduos no povoamento e causa a diminuição do crescimento. A proporção de espaço vital varia inversamente com o grau de dominância alcançado pelos indivíduos no dossel, sendo que as árvores dominantes sofrem menos que as suprimidas, que são eliminadas devido à competição, em consequência da diminuição de seu crescimento e vigor (ANDRAE, 1978).

O crescimento de qualquer organismo vivo segue a forma sigmoideal, apresentando três fases distintas: *juvenil*, que inicia quando o organismo nasce e termina no ponto de máximo incremento corrente anual; *maturidade*, que começa no ponto de máximo incremento corrente anual e termina no ponto de máximo incremento médio anual; e *senescência*, que começa a partir do ponto de máximo incremento médio anual (HUSCH; MILLER; BERRS, 1972).

Reinstorf (1970) constatou para *Pinus elliottii* Engelm. que o diâmetro é diretamente afetado pela densidade, portanto sofre influência direta da intensidade dos desbastes. Devido a isso, após a realização do desbaste, as árvores de uma mesma classe diamétrica atingem outra classe superior em um curto período de tempo.

Hiley (1959) descreveu o processo de desenvolvimento de um povoamento da seguinte maneira: à medida que as árvores de um povoamento crescem, cada indivíduo necessita de mais espaço para permitir que a copa expanda-se lateralmente para alimentar o fuste, que é cada vez mais longo e grosso; a taxa de crescimento diametral é determinada pelo espaço de crescimento de que dispõe cada árvore, que compete por espaço tanto para as raízes quanto para a copa, necessitando que esteja espaçada uniformemente sobre a superfície, cujo resultado é uma competição homogênea entre os indivíduos do povoamento.

A produção de um povoamento depende da espécie, da idade, do sítio e da densidade no final da rotação. Nesse conjunto de fatores, a densidade do povoamento deve ser destacada

por ser uma grandeza importante para a condução do crescimento diamétrico. A regulação da densidade pode ocorrer de maneira natural (autodesbaste) ou por intervenções humanas (desbastes) (SPIECKER, 1983).

Em geral, por meio de desbastes, busca-se uma aceleração do crescimento do diâmetro das árvores remanescentes no povoamento. Por isso, o objetivo não é só o aumento do crescimento em diâmetro, mas também uma concentração desse crescimento em um menor número de árvores desejadas para o futuro. Os povoamentos mais jovens podem responder melhor à repentina melhoria das condições do sítio, causada pela redução na competição entre as árvores e, como consequência, apresentar um aumento no crescimento em volume, que é chamado de *efeito de aceleração de crescimento*. Contudo, sua ocorrência é temporária, porque, após a aceleração inicial, acontece o declínio da curva de incremento. Além disso, povoamentos desbastados de maneira mais leve podem, ao final do ciclo, atingir os mesmos índices alcançados pelo povoamento que obteve uma aceleração do crescimento (ASSMANN, 1970).

Sobre isto, Schneider e Schneider (2008), afirmam que a resposta em "aceleração do crescimento" não é imediata, já que uma árvore pode levar até quatro anos para ampliar sua superfície folhar e radicular e, a partir daí, produzir um incremento significativo em diâmetro.

Para Assmann (1970), um bom indicador dos limites de intensidade de desbaste e, com isso, do espaço vital é a área basal crítica, ou seja, a área basal que mantém a produção volumétrica em nível de 95% do incremento volumétrico. Em outras palavras, trata-se da área basal que define um limite de redução de 5% no incremento volumétrico máximo para o povoamento.

A produção quanti e qualitativa de um povoamento é influenciada tanto pelo sítio como pelo tratamento silvicultural (especialmente o desbaste). Os desbastes aumentam o espaço vital das árvores, permitindo a expansão da copa e raiz. Por outro lado, o crescimento do tronco é estreitamente relacionado ao desenvolvimento da copa (SPIECKER, 1983). A escolha de intensidades e intervalos de desbaste apropriados eleva a diâmetros maiores e à melhoria da qualidade da madeira sem perdas significativas de volume (ASSMANN, 1970). Em geral, o primeiro e o segundo desbaste determinam a quantidade e qualidade da madeira que pode ser esperada no corte final (ALVES, 1982).

Flotz e Johnston (1967) citam alguns experimentos realizados nos Estados Unidos com *Pinus* sp., nos quais percentagens da área basal foram utilizadas como indicadores de peso de desbaste, e constataram que a retirada de até 40% da área basal máxima não causou

influência na taxa de crescimento em área basal. Porém, níveis superiores a 40% ocasionaram marcantes declínios no crescimento desta variável e na produção volumétrica total.

Glufke (1996) definiu um índice crítico de densidade, através da relação entre a área basal medida e área basal máxima, de 0,87 para populações de *Pinus elliottii* Engelm. A autora demonstrou que desbastes com redução da área basal de 25, 50 e 75% em relação à área basal da amostra não desbastada provocavam uma redução em volume de 9, 20 e 54%, respectivamente.

Para reduzir o efeito de perda do incremento após o desbaste, o Serviço Florestal do Canadá orienta, em muitos casos, fertilização nitrogenada para reduzir os impactos dos desbastes pré-comerciais e comerciais. As interações naturais entre espaçamento e nutrição, e as respostas das árvores ao nível biológico do povoamento são sumarizadas em cinco tópicos (MINISTRY OF FORESTRY, 1999):

- a) o desbaste reduz a competição no povoamento, a cobertura da copa e o volume da folhagem e, assim, aumenta a disponibilidade de luz solar sobre as árvores remanescentes;
- b) a fertilização nitrogenada eleva a concentração de nitrogênio na folhagem das árvores remanescentes, aumentando a eficiência fotossintética;
- c) a melhora da eficiência fotossintética e o aumento da disponibilidade de nitrogênio, luz solar e espaço de copa resultam na aceleração da produção das árvores remanescentes;
- d) a taxa de melhoria sobre o resultado da produção das árvores com a expansão da copa e o volume da folhagem aumenta a interceptação de luz solar na folhagem;
- e) o aumento da interceptação da luz solar pelas árvores aumenta a taxa fotossintética e, assim, aumenta o incremento e volume do povoamento.

O espaço entre árvores afeta diretamente a forma geométrica do tronco. A variação nas dimensões de diâmetro e altura acarreta mudança na forma do fuste, que varia por indivíduo, de acordo com as condições edafoclimáticas, os tratamentos silviculturais e a posição sociológica em que cada árvore desenvolve-se, também varia com a idade, quer como um fenômeno evolutivo natural quer como resultado das várias fases de concorrência relativa com as árvores vizinhas (LARSON, 1964). No trabalho desenvolvido por Van Laar (1969), para populações com *Pinus radiata*, foi verificado que, para um DAP de 35,1 cm e altura de 28,6 m, o fator de forma diminuiu com o aumento do espaçamento, sendo igual a 0,477 para uma densidade de 902 árvores/ha e igual a 0,437 para 124 árvores/ha. Essa alteração pode

significar um acréscimo de quase 10% no volume real, evidenciando a importância de se avaliar tal característica nos estudos de espaçamento.

O espaço vital é a única variável, dentre as que atuam sobre o crescimento em diâmetro, que pode ser controlada eficientemente pelo silvicultor, desempenhando função importante na qualidade e no valor da matéria prima produzida nos povoamentos sob manejo adequado (SCHNEIDER, 2008).

Além de influências no incremento e nas dimensões das árvores, o espaço entre árvores afeta a taxa de mortalidade das plantas. A mortalidade em uma população pode ter ocorrência regular ou irregular. A mortalidade regular provavelmente está ligada a fatores exógenos e danos causados pelo homem (LEE, 1971). A irregular é definida como morte casual, ligada a fatores endógenos definidos pelo espaço e tempo, podendo manifestar-se a partir do plantio, em consequência de mudas menos vigorosas (BURKHART, 1974).

Normalmente, no estabelecimento do plantio, o efeito da competição e a taxa de mortalidade são mínimos. Porém, com o crescimento, aumentam a competição e a taxa de mortalidade, até esta atingir seu valor máximo, momento em que ocorre a redução do volume e da área basal do povoamento (RENNOLS; PEACE, 1986).

Segundo Hamilton (1986), a mortalidade constitui um dos componentes menos compreendidos na estimativa do crescimento e rendimento. Em geral, os modelos de crescimento ignoram, quase universalmente, o estado genético da árvore, bem como os fatores ambientais importantes, como os extremos climáticos (vento, seca, geada), os insetos e as doenças. Outro fator é a competição ambiental que surge das árvores vizinhas, como também das características das árvores e do local (BUCHMAN; PEDERSON; WALTERS, 1983).

Para Avery e Burkhart (1994) e Sanquetta et al. (1996), a mortalidade é um componente importante em modelos de simulação da produção florestal, tanto em florestas naturais como artificiais. Em alguns modelos de produção para florestas bem manejadas, a mortalidade causada por fatores naturais é considerada desprezível. Entretanto, na maioria dos casos, isto é irreal, pois a mortalidade pode ser desconsiderada somente no caso de florestas manejadas em rotações muito curtas, em excelentes condições ambientais e subestocadas.

A mortalidade poderia ser considerada menos estocástica se as variáveis ambientais pertinentes fossem medidas em parcelas permanentes e se pudesse caracterizar as condições genéticas das árvores. Devido a essa dificuldade, Hamilton (1974) considerou a mortalidade de árvores um evento discreto, no qual os dados puderam ser tão somente identificados com valor 0 (vivas) e 1 (mortas), sendo sua probabilidade de ocorrência ajustada pela equação logística.

O efeito da dimensão da árvore, expresso pelo diâmetro, e a proporção da copa e da densidade do povoamento descrito pela área basal foram utilizados por Monserud e Sterba (1998) na modelagem da mortalidade com a função logística.

Schneider et al. (2005) aplicaram esta metodologia para estudar a mortalidade natural de povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii*), estimando a probabilidade de mortalidade por meio de uma função probabilística em relação ao inverso do diâmetro à altura do peito e idade.

3.2 Densidade, tamanho das árvores e autodesbaste

Os mais eficientes índices de densidade estudados sobre a influência da densidade no autodesbaste combinam uma expressão do tamanho da árvore média (diâmetro, altura, biomassa ou volume) com o número de árvores (CURTIS, 1972; LONG; SMITH, 1985).

Alguns pesquisadores, como Westoby (1981) e Zeide (1987), afirmam que a relação entre o tamanho das árvores e a sua densidade constitui-se por si só em um grande problema bioecológico. Porém esta relação é de grande interesse para o manejo florestal, por ser fundamental para estimar a densidade do povoamento, o estoque de madeira, a determinação da intensidade ótima de desbaste, o grau de disturbância, a taxa de autodesbaste e outros processos florestais.

Existem muitos estudos sobre a relação do tamanho e o número de árvores por hectare de povoamentos, como a regra do D-máximo de Mitchell (1943); o método da percentagem da altura de Wilson (1946); o índice de densidade, de Reineke (1933); a lei da potência de $-3/2$ de autodesbaste de Yoda et al. (1963) entre outros.

Em estudo da densidade populacional, Drew e Flewelling (1977, 1979) introduziram, na América do Norte, o diâmetro médio quadrático como auxiliar ao manejo da máxima produção de madeira, sendo utilizado em trabalhos realizados por Wilson (1946), Long e Smith (1985), Smith e Woods (1997), entre outros.

De acordo com Reineke (1933), em povoamento com densidade completa, a relação entre o diâmetro médio quadrático das árvores e o número de árvores por hectare é linear em uma escala logarítmica, sendo que os parâmetros são independentes da idade e da qualidade

do sítio, mantendo coeficiente angular constante no valor de 1,605 para qualquer espécie em povoamentos não desbastados.

Uma vez conhecido o coeficiente angular da equação de Reineke, é possível determinar o Índice de Densidade do Povoamento (IDP), que representa a relação entre o número de árvores por hectare observadas com a densidade de um povoamento ajustado pelo modelo de Reineke, porém, ambos com igual diâmetro médio. Esse índice representa o número de árvores por unidade de área que um povoamento pode suportar para alcançar um diâmetro médio, que, convencionalmente, é fixado como objetivo. Porém, povoamentos da mesma espécie em *habitats* diferentes podem apresentar limites de densidade diferentes, mas com tendência sempre semelhante a índices de densidade com limites paralelos e proporcionais para diferentes níveis de densidade de árvores por unidade de área (REINEKE, 1933).

Curtis (1982) utilizou o princípio definido por Reineke para descrever a relação entre a área basal e o diâmetro quadrático médio, observando para povoamentos naturais de *Pseudotsuga menziesii* valores da constante b entre os limites de 0,45 a 0,5, assumindo o valor 0,5 para descrever essa relação. Esse mesmo valor foi encontrado por Reid (2004) na determinação de Diagrama de Manejo da Densidade e de guias de desbaste para plantações de *Eucalyptus* manejados para serraria.

Recentemente, Reid (2006) utilizou dados de plantações da Austrália e Nova Zelândia para demonstrar a utilização do quociente determinado entre o diâmetro médio das árvores e a área basal do povoamento ($d:G$) no manejo de florestas não industriais de pequenas propriedades rurais. O autor concluiu que este quociente é simples e prático para guiar a densidade de plantações de *Eucalyptus*, indicando que, com a manutenção desse quociente constante, surgirá, conseqüentemente, maior competição entre as árvores, com o aumento da idade.

Sterba (1975), baseado nas teorias de Reineke (1933), Kira, Ogawa e Sakazaki (1953), Yoda et al. (1963), Ando (1968) e Ando et al. (1968), desenvolveu a Regra da Densidade de Competição (RDC) para povoamentos equiâneos, descrevendo a relação entre o número de árvores e o diâmetro quadrático médio por uma função hiperbólica. Dessa função, parametrizando os coeficientes com a inclusão da altura dominante, é possível obter o número de árvores que produz a área basal máxima ($N_{G_{max}}$) e o máximo diâmetro quadrático médio na linha de densidade. As pesquisas subsequentes, sobre o fechamento das copas das árvores, demonstraram que a densidade do povoamento não permanece constante, mas tende a decrescer no tempo. A densidade do povoamento e o fechamento de copa são uma

consequência de dois processos opostos: crescimento lateral dos ramos e das raízes, o qual incrementa o fechamento e a mortalidade de indivíduos, como uma decorrência da máxima competição. Por outro lado, este mecanismo assume muitos resultados e diminui com a tolerância das árvores à sombra.

A variação da densidade afeta a relação entre o número de árvores e o diâmetro de copa, mas, muito antes, o diâmetro da árvore. Devido a essa evidência, Laasasenaho e Koivuniemi (1990) estabeleceram uma relação entre o diâmetro de copa e o número de árvores por hectare, que produz uma linha reta em uma escala logarítmica.

Como o diâmetro da base da copa é relacionado com o diâmetro à altura do peito e com a distância entre a base da copa e da altura do peito, sendo esta distância proporcional à altura total, os autores definiram uma função hiperbólica para representar essa relação.

Considerando ser difícil a obtenção do diâmetro de copa, Zeide (1995) substituiu esta variável pela altura normalmente obtida no inventário do povoamento. Assim, pode-se estabelecer uma nova relação entre o número de árvores, o diâmetro e a altura em um modelo logarítmico. Tang, Meng e Meng (1994) estendem a teoria do autodesbaste a povoamentos de densidade completa para subestocados, tendo constatado que o autodesbaste começa antes de atingir a máxima densidade e que a taxa de autodesbaste incrementa-se com a densidade, atingindo o máximo na densidade do povoamento.

Barreto (1994) afirma que o autodesbaste atua como um desbaste neutro, quando a árvore média do autodesbaste é igual à árvore média do povoamento. Em estudo sobre o coeficiente angular ou a taxa de autodesbaste com base no modelo de Tang, Del Rio, Montero e Bravo (2001) constataram uma variação do coeficiente angular com a espécie e, muitas vezes, com a idade, com valores entre -2,33 e -1,54, os quais divergem do valor de -1,605 proposto por Reineke (1933). Da mesma forma, Hibbs (1987) aplicou a lei do autodesbaste para desenvolver linhas guias para o manejo de *Alnus rubra*. A linha máxima do autodesbaste foi obtida com um coeficiente angular de -1,5. As duas linhas seguintes do Diagrama de Manejo da Densidade, a da iminente competição da mortalidade e a do limite inferior de desbaste, foram locadas em densidades relativas de 55 e 30 % da linha de máxima densidade. Os valores de densidade relativa para o fechamento da copa, a mortalidade e o limite de desbaste corresponderam aos definidos para outras espécies.

Del Rio, Montero e Bravo (2001) analisaram a relação da densidade populacional e do diâmetro médio com o autodesbaste em povoamento equiâneo não desbastado de *Pinus sylvestris* na Espanha, comparando a expressão densidade/diâmetro ajustada pela equação de Reineke (1933) com a expressão de Zeide (1995) e o modelo de autodesbaste de Tang, Meng

e Meng (1994). Os resultados indicaram que o autodesbaste seguiu uma linha côncava, com incremento do coeficiente angular e da densidade do povoamento, assumindo a assíntota diretamente na linha de densidade máxima com coeficiente angular igual a -1,75, ligeiramente diferente do coeficiente -1,605 indicado por Reineke.

A lei do autodesbaste tem sido objeto de uso prático e de discussões acerca da sua eficiência por vários pesquisadores, como: Yoda et al. (1963); Westoby (1981), West e Bourough (1983); Zeide (1995, 1987, 1991); Sterba; Monserud (1993); Tang, Meng e Meng (1994); Osawa e Allen (1993); Tang; Meng; Meng (1995); Smith e Hann (1986); Del Rio, Montero e Bravo (2001), entre outros.

A lei do autodesbaste, inicialmente desenvolvida por pesquisadores japoneses (YODA et al., 1963), determinava o peso médio de árvores sobre o número de árvores sobreviventes para um diâmetro médio, sendo essas duas variáveis determinadas em unidade logarítmica, resultando em uma relação linear, com descendente comum de potência igual a $-3/2$.

Segundo Osawa e Allen (1993), a lei do autodesbaste descreve uma relação constante para a média da densidade de plantas, com expoente de $-3/2$ em povoamentos monoculturais. Embora a lei do autodesbaste seja descrita para várias espécies, os mecanismos deste procedimento não apresentam uma relação constante para povoamentos subestocados. O limite do autodesbaste para *Nothofagus solandri* indicou um expoente -1,13, com variação em um intervalo entre -1,25 a -1,02 diferente do valor convencional de $-3/2$. Em contraste, para *Pinus densiflora*, o coeficiente indicado para expoente de desbaste não diferiu do valor proposto de $-3/2$. A respeito ao valor do expoente, Prodan et al. (1997), esclareceram que, à medida que o tamanho médio das árvores aproxima-se do tamanho máximo da espécie, a relação deixa de valer. Assim, a lei de autodesbaste somente pode ser usada para preceder densidades máximas para um determinado diâmetro. Por esse motivo, a lei tem sido contestada por muitos pesquisadores que chegaram a resultados diferentes dos mencionados originalmente. Embora essa polêmica persista, é significativo o número de estudos que chegaram ao mesmo resultado, como o realizado por Smith e Hann (1986), os quais comprovaram a validade da lei do autodesbaste para estimar o número de árvores e a biomassa por hectare, mas a rechaçaram para o volume por hectare. Complementarmente, com a relação de máxima densidade para uma espécie em um *habitat* é possível definir, com base na relação do número real de árvores por hectare, o Índice de Densidade Relativa.

3.3 Diagrama de manejo da densidade

A manipulação da densidade é uma das mais importantes ferramentas de que dispõe o silvicultor para identificar os níveis limitantes da concorrência nos povoamentos. Alguns atributos do povoamento, como a relação da altura e do diâmetro, a largura da copa, a percentagem de cobertura, a relação dos galhos com o tamanho de nós e o vigor das árvores, foram influenciados pela densidade do povoamento. Por outro lado, estes atributos afetam a qualidade da madeira, a quantidade e o valor, a resistência a pragas e doenças, o valor do povoamento, a dinâmica da recreação e a capacidade da hidrologia do local (FARN DEN, 1996).

O princípio básico da elaboração de Diagramas de Manejo da Densidade dos Povoamentos (DMDPs) foi proposto por Drew e Flewelling (1979), de maneira similar ao desenvolvido pelos pesquisadores japoneses Tadaki (1963) e Ando (1968), e fundamentado na teoria da lei da potência do $-3/2$ de autodesbaste desenvolvida, por cientistas japoneses para colheitas agrícolas (YODA et al., 1963). Segundo esta lei, para qualquer densidade há um máximo de biomassa comum que uma planta individualmente pode atingir. Um aumento adicional de biomassa da planta só pode ser alcançado a uma densidade populacional mais baixa, sendo necessário, para isso, que algumas plantas morram. Estes autores propuseram uma dimensão geométrica para a lei do autodesbaste, baseada na suposição de que o autodesbaste ocorre quando a cobertura do dossel excede 100% e de que as plantas de muitas espécies são sempre similares geometricamente, podendo moldar-se sem considerar o estágio de crescimento ou as condições do *habitat*.

Esta lei foi estendida para aplicação em colheitas florestais na América do Norte, primeiramente por Drew e Flewelling (1979), que sugeriram haver uma relação altamente previsível entre o tamanho e o máximo número de árvores de determinadas espécies que podem ser sustentadas em qualquer local do povoamento. De forma a trazer praticidade na aplicação destas teorias foram elaborados diagramas de manejo, técnicas práticas baseadas na teoria do autodesbaste das árvores de um povoamento, que permitem visualizar a mudança do diâmetro médio, a altura, a densidade e o volume dos povoamentos equiâneos puros e, com isso, avaliar alternativas de regime de densidade a partir da densidade inicial de plantio e intensidade de desbaste, considerando um objetivo específico de manejo (LONG; SMITH, 1985). Entretanto, estes diagramas apresentam limitações de uso, pois baseiam-se em uma única espécie, uma única camada do dossel, um povoamento de mesma idade, na previsão de

valores médios do povoamento e necessidade do uso associado de tabelas de produção (MINISTRY OF FORESTRY, 1999).

Saunders e Puettmann (2000), aplicando a lei do autodesbaste com coeficiente angular de $-3/2$, descreveram para *Picea glauca* uma relação linear entre a densidade de árvores e o diâmetro quadrático médio, em unidade logarítmica, representada por uma linha de máxima (A) que descrevia o limite máximo da relação da densidade e do diâmetro, sendo esta dependente da mortalidade de indivíduos do povoamento que definia também o máximo volume médio das árvores naquela densidade. Próximo à linha de máxima, o volume médio das árvores é grande em baixa densidade e pequeno em alta densidade do povoamento.

Ainda, delimitaram outras três linhas de densidade, denominadas B, C e D. A linha B definiu a área chamada Zona de Iminente Competição e Mortalidade de Indivíduos, como sendo a região onde iniciaria a mortalidade de árvores devido ao aumento da competição. Quando o povoamento encontrava-se acima desta linha, iniciava o autodesbaste. Logo, a máxima taxa de produção do povoamento ocorria justamente abaixo desta linha B. A linha C foi definida como sendo o início da máxima produção de madeira, e a D representava a tendência ao fechamento de copa. Na zona entre as linhas C-B, estava a condição ótima de manejo, com estoque volumétrico completo. Entre a linha B-A, verificava-se a condição de povoamento superestocado e, abaixo da linha C, uma condição de povoamento subestocado, não se obtendo o máximo aproveitamento do solo. A linha D representava a máxima ocupação da copa das árvores.

Para a obtenção do Diagrama de Manejo da Densidade, o primeiro passo, segundo os autores, é obter a linha de diâmetro médio quadrático por densidade populacional (linha A), com o emprego das parcelas com o máximo diâmetro médio quadrático no ajuste de um modelo de densidade e diâmetro. O segundo passo é determinar o início da mortalidade (linha B) e o início da produção máxima do povoamento (linha C). Estas linhas são determinadas algebricamente a partir da linha A, fixando densidades teóricas de 0,55 e 0,40 para o início da mortalidade (linha B) e o início da máxima produção do povoamento (linha C), respectivamente.

De acordo com Harrington (1997), a Linha D de fechamento do dossel em plantações de *Pinus taeda* L. começa a cerca de 25% do Índice de Densidade do Povoamento (IDP), e o povoamento começa a sofrer autodesbaste entre os valores de 50 e 55% do IDP, com mortalidade de árvores devido à competição entre os indivíduos. A zona de manejo da densidade dos povoamentos para obtenção do estoque completo considerada ótima está entre

os limites acima e abaixo de 30 e 45% da linha de máxima densidade. Nessa zona, onde os desbastes foram estabelecidos, ocorria ausência de autodesbaste e alta recuperação de volume.

Por outro lado, Archibald e Bowling (1995) estabeleceram, para *Pinus banksiana*, que a posição da linha B (zona de iminente competição e mortalidade) localiza-se a 55%, e a linha D (definida como ponto de fechamento das copas) a 15% da linha A. Sobre isto, Drew e Flewelling (1979) confirmaram, para Douglas-fir, que o ponto de fechamento de copa encontrava-se a uma Densidade Relativa igual a 15% da linha de máxima densidade e que abaixo deste ponto o crescimento era proporcional à densidade. Caso a floresta passe da zona de estoque completo, o incremento em volume simplesmente será distribuído sobre um maior número de árvores. Entre as Zonas de Crescimento Livre e a Zona de Estoque Completo, ocorre uma *Zona de Aumento da Competição*, em que o crescimento individual das árvores é crescentemente restringido.

O Diagrama de Densidade do Povoamento define o grau de competição entre as árvores em florestas equiâneas, por meio de uma série de linhas paralelas determinadas a partir da linha de autodesbaste, as quais foram teoricamente definidas por Reid (2004) como: *Zona de Densidade Excessiva*, em que o crescimento é restrito; *Zona de Iminente Mortalidade*, a qual se presume que não deva ser concebida; *Zona de Crescimento Livre*, em que o incremento em diâmetro da árvore é máximo; e *Zona de Estoque Completo*, em que a produtividade é maximizada.

Gingrich (1967) denominou as áreas estabelecidas no Diagrama de Densidade por faixas de estoqueamento: *Faixa superestocada*, em que a densidade é extremamente excessiva; *Faixa totalmente abastecida*, em que as árvores ainda têm espaço disponível para se desenvolver, porém este espaço é manejado para se ter o máximo de aproveitamento; e *Faixa subestocada*, em que a densidade é baixa, e o povoamento apresenta espaços disponíveis.

O uso do Diagrama de Manejo da Densidade (DMD) requer o estabelecimento da diferença entre o diâmetro médio aritmético (\bar{d}) e o diâmetro médio quadrático (d_g), ambos determinados à altura do peito, mas calculados de forma diferente. O diâmetro médio aritmético à altura do peito é a média aritmética dos diâmetros das árvores do povoamento, enquanto o diâmetro médio quadrático é obtido pela área basal média do povoamento.

Para determinação das isolinhas do volume de um Diagrama de Manejo da Densidade do Povoamento, Penner et al. (2002) utilizaram modelos para estimar o volume médio da árvore, tendo como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito, a altura dominante e o número de árvores por hectare.

Kumar, Long e Kumar (1995), para determinar um Diagrama de Manejo da Densidade para plantações de *Tectona grandis* na Índia, obtiveram coeficiente angular de -1,6 na equação de Reinekee estimaram o volume das árvores com um modelo de regressão com a variável independente combinada entre a altura e o diâmetro.

3.4 Distribuição de frequência e volume por classe diamétrica

Nos estudos de distribuição de frequência de árvores por classe de diâmetro, têm sido utilizadas funções de distribuição diamétrica, como: Normal, Ln-normal, Gama, Johnson's SB, Gram-Charlier, Beta e Weibull (BAILEY; DELL, 1973; HAFLEY; SCHREUDER, 1977; MALTAMO; PUUMALAINEN; PÄIVINEN, 1995).

Muitos pesquisadores têm indicado a função de Weibull como a mais sustentável para estimar as frequências por classe de diâmetro (GADOW, 1984; BORDERS et al., 1987). Na Espanha, a função de Weibull tem sido o modelo mais utilizado para descrever a distribuição diamétrica de florestas (ÁLVAREZ, 1997; DEL RIO, 1998; GARCÍA GÜEMES; CAÑADAS; MONTERO, 2002). A popularidade dessa função baseia-se na relativa simplicidade de uso, na flexibilidade e na facilidade de correlacionar seus parâmetros de forma significativa, com algumas características importantes do povoamento (BAILEY; DELL, 1973).

A caracterização e definição da distribuição diamétrica é de importância fundamental nos estudos de sortimento dos povoamentos. Para isso, Bailey e Dell (1973) propuseram o uso da distribuição Weibull, por considerarem-na mais vantajosa que a Beta em sua forma, seu ajuste, sua precisão e sua derivação matemática.

No Brasil, foram desenvolvidos trabalhos de pesquisa sobre distribuição de diâmetros em vários locais e em diferentes espécies, como os estudos de Couto (1980) para *Pinus caribaea* var. *caribaea*; Campos e Turnbull (1981) para *Pinus patula*; Finger (1982) para *Acacia mearnsii*; Schneider (1984) para *Pinus elliottii*; Veiga e Brister (1983) para *Pinus elliottii*; e Batista (1989) para espécies da floresta tropical pluvial.

Carelli Neto (2008) estudou a distribuição de probabilidade de frequência por classe diamétrica, como Weibull, Normal, Ln-normal e Gama para povoamentos de *Pinus taeda* implantados em vários espaçamentos iniciais e em diferentes idades e selecionou a função de

Weibull, com dois parâmetros, para prognosticar a probabilidade de frequência do diâmetro, ajustando-a pelo procedimento Capability do SAS.

Para estimar os parâmetros da distribuição Weibull, muitos métodos têm sido desenvolvidos, com destaque aos estimadores de máxima verossimilhança, estudados, dentre outros, por Harter e Moore (1965), Bailey (1974), Belcher e Clutter (1977) e Cao (2004).

Por essa razão, a função Weibull tem sido extensivamente utilizada em estudos de crescimento e produção florestal, com vários trabalhos publicados na literatura nacional e internacional, por autores como: Smalley e Bailey (1974), Hafley e Schreuder (1977), Clutter e Belcher (1978), Clutter et al. (1983), Little (1983), Bailey et al. (1985), Leite et al. (1990) Nogueira et al. (2005), entre outros.

A função de Weibull foi aplicada pela primeira vez por Weibull (1939) em estudos detalhados de materiais e por Prodan et al. (1997) em estudos florestais. No entanto, a função foi utilizada e destacada com maior ênfase na área florestal por Bailey e Dell (1973), apresentada com dois e três parâmetros.

Segundo Van Laar (1979), as funções de densidade de probabilidade de Weibull, com dois e três parâmetros, apresentam características específicas, em que o parâmetro (a) assume uma condição de locação da posição inicial da distribuição, com diâmetro mínimo ($a \leq x < \infty$); o parâmetro (b) assume um valor de escala ($b < 0$); e o parâmetro (c) um valor da forma da distribuição de densidade de probabilidade ($c > 0$) para a condição de $x \geq 0$. Quando os parâmetros $c=1$ e $a=0$, a função tem sua forma simplificada, passando a conter dois parâmetros (JOHNSON; KOTZ, 1970) e, quando $c=3,6$, a distribuição de densidade de probabilidade de Weibull passa a descrever uma forma normal (BAILEY; DELL, 1973).

Este modelo Weibull, pela sua flexibilidade, pode assumir uma ampla variedade de formas de distribuição de frequência por classe de diâmetro, desde exponencial, hiperbólica e normal, com assimetria positiva ou negativa, dependendo da tendência dos valores da variável dependente e, por consequência, dos parâmetros da função.

O método para predição dos parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull consiste em derivar as relações entre os parâmetros das variáveis associadas ao modelo, processo denominado PPM (Predição de Parâmetro do Modelo).

Na maioria dos estudos sobre a projeção do crescimento e da produção de povoamentos florestais, os parâmetros de uma função de densidade probabilística são modelados de forma explícita, mediante modelos lineares ou não-lineares, com variáveis preditoras que utilizam os parâmetros do povoamento, como densidade, diâmetro médio,

altura dominante, índice de sítio e idade. Neste procedimento de predição, embora as relações lineares dos modelos tenham fundamento biológico, em alguns casos, a precisão gerada tem sido baixa (CAO; BURKHART, 1984; CAO, 2004).

Também, para obter os parâmetros da distribuição de Weibull, pode ser empregado um dos três métodos de ajuste: máxima verossimilhança e percentis, ambos descritos em Bailey e Dell (1973), Finger (1982), Gadow (1983); e de momentos, descritos em Burk e Newberry (1984), Abreu (2000), Cao e Burkhart (1984) e Cao (2004).

Como o método de máxima verossimilhança necessita de interação para resolução dos estimadores dos parâmetros, o Procedimento Interativo de Newton é empregado no método dos Mínimos Quadrados Não Ordinários, para regressão não-linear (LEE, 1980).

Recentemente, Cao (2004) desenvolveu um algoritmo para a solução da função de densidade de probabilidade de Weibull, utilizando o método de estimador de máxima verossimilhança, sendo o parâmetro de alocação da função Weibull (a) computado com valor inicial de metade do diâmetro mínimo observado na amostragem. Os parâmetros de escala (b) e de forma (c) são estimados pelo modelo exponencial em função das variáveis espaçamento relativo, número de árvores por hectare, altura dominante e idade do povoamento.

Cao (2004) também desenvolveu um método para ajustar a Função de Distribuição Acumulativa – CDF, que se baseia no cálculo iterativo dos coeficientes com a minimização da soma dos valores do logaritmo da probabilidade de frequência.

Outra possibilidade de ajuste é o procedimento denominado passo invariante, que baseia-se no princípio de que predições sucessivas, efetuadas da idade t_1 para t_2 e da idade t_2 para t_3 , devem, matematicamente, apresentar as mesmas predições, obtidas por um único passo entre as idades t_1 e t_3 (SOMERS; FARRAR JR, 1991).

Por outro lado, os métodos da máxima verossimilhança, segundo Gould (2006), são versáteis e aplicam-se à maioria dos modelos e tipos de dados. Trata-se de métodos eficientes, que determinam a incerteza através dos limites da confiança e, embora a metodologia para a avaliação da máxima probabilidade seja simples, a execução é, matematicamente, muita intensa.

A maioria dos autores citados utilizam o teste de aderência não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a qualidade de ajustamento produzido na distribuição teórica de um conjunto de dados, devido à sua sensibilidade a qualquer diferença do valor central e da dispersão (GADOW, 1983; CAO, 2004). Este teste refere-se ao grau de concordância entre uma distribuição observada e uma distribuição teórica esperada, o qual é

calculado pela maior diferença entre outras frequências, comparado com as frequências das distribuições estimada e esperada em cada classe.

3.5 Forma de tronco e sortimento de madeira

A maioria dos problemas de avaliação florestal estão restritos à falta de tabelas de sortimento que atendam a todas as variações de necessidades do manejo dos povoamentos. Devido a isso, tem-se desenvolvido intensas pesquisas com o objetivo de alcançar a otimização na classificação e valorização dos produtos florestais, pela sua qualidade, dimensão e formas de utilização (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Um dos pioneiros no estudo da forma de tronco foi Hohenadl (1924), que demonstrou que as árvores dominantes desenvolviam maior incremento relativo na base do fuste para poder suportar o peso total.

Depois que Schuberg (1891, apud SPURR, 1952) introduziu o conceito de quociente de forma como a relação entre dois diâmetros tomados à metade da altura e a 1,30 m do solo, desenvolveu-se uma série de pesquisas sobre a forma de tronco. Nesse sentido, já Schiffel (1905) concluiu que o diâmetro medido à metade da altura da árvore fornecia uma satisfatória estimativa da forma dos troncos, razão pela qual estimava o volume como uma função da altura total e das relações transversais nesses dois pontos.

Prodan (1965), em concordância com Row e Guttemberg (1966), desenvolveu pesquisas demonstrando que o tronco da árvore deveria ser dividido em, no mínimo, três secções distintas para efetuar o estudo da forma. Estas secções identificavam uma forma hiperbólica na base, parabólica na porção intermediária e conoide na parte do ápice do fuste.

A forma do tronco das árvores varia bastante, em razão do meio ambiente, da espécie, da idade, do manejo a que são submetidas e também em função de suas aptidões genéticas (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Esta variação na forma do tronco ocorre tanto em florestas naturais como em plantadas. Em povoamentos compostos por uma única espécie, as árvores que vegetam na periferia do povoamento ou em grandes espaçamentos apresentam uma forma natural ou espontânea semelhante à das que vegetam isoladamente. Já aquelas que se encontram no interior do povoamento, cuja sobrevivência acontece pela competição de água, luz e

nutrientes, adquirem uma forma reta com poucas ramificações e copa de menor dimensão, conhecida como forma florestal típica (SCHNEIDER, 1984).

Conforme este autor, o ajuste de modelos matemáticos para representar os sólidos geométricos de revolução que descrevem as formas das árvores permitem determinar o seu volume. Esses sólidos são obtidos pela rotação da curva geral ao redor do seu eixo, o que permite demonstrar os diâmetros e respectivos volumes a partir de alturas relativas.

O conhecimento da forma de tronco permite a obtenção de sortimentos de madeira dos povoamentos florestais, sendo de grande importância para a análise do potencial madeireiro, para diversos aspectos de planejamento das atividades de manejo, para o dimensionamento das unidades de processamento mecânico da madeira, bem como para a comercialização de madeira serrada (JORGE; LARA, 1993).

Ahrens (1982) e Schneider e Schneider (2008) afirmam que as funções de forma do tronco atuam como ferramenta importante para predizer o diâmetro em qualquer ponto do tronco a partir de uma ou duas variáveis medidas. Estas funções passaram a ser utilizadas também para estimar o volume do povoamento e construir tabelas de volume e sortimento para diferentes limites de dimensões de toras impostas pelo mercado.

Estudos sobre forma de tronco para estimar os sortimentos de madeira podem ser encontrados em abundância na literatura especializada, como em: Prodan (1965), Kozak, Munro e Smith (1969), Demaerschalk (1972), Jokela (1974), Garay (1979), Hradetzky (1981), Schneider (1984), Bigig (1984), entre outros.

3.6 Avaliação econômica

A avaliação econômica de um projeto de investimento florestal toma por base as despesas e receitas atualizadas ao longo do período de rotação do povoamento (REZENDE; OLIVEIRA, 2001).

Segundo Lopes (1990), qualquer empreendimento depende do planejamento que engloba os fundamentos técnico e econômico de todos os fatores relevantes, reconhecendo as restrições e ordenando os recursos disponíveis, para que se atinja a situação desejada. O autor ainda destaca a importância da exatidão e segurança com que se pode prognosticar o desenvolvimento futuro dos fatores que influenciam os objetivos preconizados, bem como suas tendências econômicas.

Muitos estudos econômicos já foram realizados com o gênero *Pinus*, porém poucos ou nenhum para a região de origem dos dados deste trabalho.

Entre as avaliações econômicas de outras espécies, destacam-se as realizadas por Rezende e Oliveira (2001), Schneider (1984, 2006) e Chichorro (1987).

O estudo realizado por Schneider (2006) sobre a rentabilidade em investimentos florestais nas mesorregiões do Rio Grande do Sul encontrou valores econômicos significativos para investimentos em reflorestamentos com *Pinus* sp., para manejo em sistema de alto fuste. No caso específico da mesoregião II, que compreende os Campos de Cima da Serra, o reflorestamento com *Pinus taeda* L. proporcionou o Valor Presente Líquido de R\$ 5.317,90 ha⁻¹ e taxa interna de retorno de 16,2% a.a. para uma rotação de 25 anos com desbastes aos 9, 14 e 18 anos.

Os métodos de análise econômica de projetos de investimentos são normalmente citados na literatura florestal especializada, destacando-se os de Speidel (1967), Faro (1979), Schneider (1984) e Rezende e Oliveira (2001). Tais métodos requerem o agrupamento de custos que tenham a mesma unidade e medida, caracterizando variáveis de avaliação de investimentos florestais como:

- a) *custo da terra*: a oferta deste fator é fixa e quem dita o seu preço no mercado é a função da demanda (BEATTLE; TAYLOR, 1985). Com a crescente procura por terra e, conseqüentemente, com as elevações no seu preço, muitos empresários florestais passaram a adquirir terras distantes dos centros consumidores, de menor investimento e de baixa produtividade, que nem sempre são as mais adequadas para o reflorestamento. As terras com baixa produtividade comprometem a produção futura e oneram os custos de plantio, devido à maior necessidade de correção e fertilização do solo. Além disso, a localização distante das fontes consumidoras dos produtos florestais eleva os custos do transporte e do produto final (ALFARO, 1985);
- b) *custo de formação dos povoamentos florestais*: são os custos envolvidos no processo de produção de madeira e podem ser classificados de acordo com o tempo e a frequência de ocorrência. O custo de implantação florestal é constituído de todos os custos parciais que ocorrem no primeiro ano de plantio, como a limpeza da área, as mudas, os adubos, o plantio, a mão de obra, etc. (GARLIPP, 1979);
- c) *produtividade florestal*: é definida pela capacidade física de uma área para produção de madeira. Este fator influencia diretamente nos resultados econômicos

do fluxo de caixa de maneira significativa, e as suas variações podem gerar mudanças nas alternativas de regime de manejo (DAVIS, 1966);

- d) *preço do produto florestal*: a determinação do preço deve basear-se na conversão de uma margem de lucro sobre os custos totais, destinada a proporcionar uma taxa de retorno satisfatória (LIVESEY, 1978). A viabilidade econômica de projetos florestais é diretamente influenciada pelo preço da madeira e dos custos totais envolvidos no empreendimento (CHICHORRO, 1987). Normalmente, para facilitar a determinação do valor econômico, os preços da madeira são tomados para sua comercialização em pé, com base nos valores praticados no mercado regional, diferenciados em tipos de sortimentos de madeira, para uso em energia, celulose e/ou aglomerado, serraria e laminação. Para tanto, o custo da matéria prima posta na indústria, pago aos produtores florestais pelas indústrias consumidoras, é o resultado da soma do preço pago pela indústria, que deve ser suficiente para cobrir os encargos de implantação, retorno do capital, custo de administração, da terra e do capital investido, custo de transporte e custo de colheita;
- e) *custo da colheita*: varia com a distância de baldeio, tipo de topografia do terreno, condições e tipos de caminhos de extração e o tamanho dos talhões. Em razão disso, os preços dos sortimentos normalmente são tomados para madeira em pé, em metros cúbicos com casca (SCHNEIDER, 2006);
- f) *custo de transporte*: refere-se ao custo de movimento da madeira do estaleiro até a indústria ou o local de beneficiamento. O transporte florestal é a fase seguinte ao corte e à extração e deve garantir o abastecimento dos pátios das indústrias em um fluxo contínuo, normal e equilibrado. Para isso, deve-se dimensionar precisamente o tamanho e a composição da frota, a fim de evitar um colapso no abastecimento de madeira. Segundo Schneider (2006), o transporte rodoviário é realizado, quase na totalidade, por caminhões, cuja seleção é baseada em fatores como distância de transporte, categoria das estradas, quantidade de madeira a ser transportada, capacidade de carga do caminhão e equipamentos auxiliares, e máquinas e equipamentos de carga e descarga. A distância de transporte determina o volume de madeira a ser transportado por viagem e por unidade de transporte. Consequentemente, determina o tamanho do caminhão, pois, quanto maior for a distância, maior deve ser a capacidade de carga do meio de transporte. Destes fatores, a distância ao centro consumidor é decisiva no custo de transporte, pois determina o volume de madeira transportada por turno ou por dia de trabalho, em

cada tipo de composição veicular. Quanto maior for o trajeto, maior é o custo unitário por volume de madeira transportada, devido ao aumento substancial do consumo de combustível, mão de obra, manutenção e depreciação do veículo. Devido a isso, a distância de transporte constitui-se no elemento determinante da localização dos projetos de investimento florestal, que deve estar sempre relacionada às fontes de consumo de matéria prima a ser produzida;

- g) *custo de administração*: o custo de administração anual de um projeto de investimento é constituído pelas despesas de insumos de escritório, luz, telefone, pessoal técnico-administrativo, encargos sociais, prédios, instalações, etc. Por ser de difícil obtenção precisa, é normalmente considerado um valor de 10% dos custos totais do projeto;
- h) *rotação florestal*: a decisão sobre a rotação florestal é um conceito de grande utilidade, porque sobre a sua duração fixa-se o padrão da floresta desejada e se estabelecem as bases para o planejamento em geral (ALVES, 1966);
- i) *taxa de juros e inflação*: a taxa de juros nominal ou taxa aparente é formada pela taxa de juros real e pela taxa de inflação, as quais, conjuntamente, não se constituem em uma simples adição. Para o cálculo da taxa de juros nominal, pode-se utilizar a equação de Fisher para corrigir os custos (SCHNEIDER, 2006). A definição da taxa de juros é de fundamental importância, pois os projetos florestais apresentam custos e receitas em diferentes momentos e, para compará-los, é necessário capitalizá-los ou descapitalizá-los, para um mesmo ponto no tempo a uma taxa de desconto (CHICHORRO, 1987).

Segundo Schneider (2006), na análise econômica de projetos de investimento florestal, a diferenciação de taxas de juro é importante, pois a inflação também influencia a taxa de juro real a ser utilizada. Por isso, em um empréstimo, quando há expectativa inflacionária, a taxa de juro real eleva-se para proteger o capital durante o prazo do empréstimo. A inflação que pode ocorrer ao longo do investimento prejudica o resultado da análise de projetos pelo fato de que os preços de insumos e produtos podem ser afetados tanto na forma como no ritmo, em diferentes intensidades, podendo provocar distorções nas estimativas dos indicadores de rentabilidade e na seleção de projetos de investimento.

Por outro lado, de acordo com Speidel (1967), a inflação pode afetar os valores monetários reais e distorcer o valor da taxa de juro real. Por isso, a incorporação de risco na taxa de juro pode inviabilizar muitos projetos de investimento. Assim, muitas vezes, evita-se

apropriar-se de taxas nominais de juro de banco para desconto em projetos de investimentos florestais.

Segundo Schneider (2006), em investimentos florestais, por se tratar de um fluxo de caixa de médio a longo prazo, as taxas de juro devem ser as mais baixas para a avaliação de projetos. Este fato parece evidente, pois o próprio governo lançou programas que financiam o reflorestamento à taxa de juro subsidiada de 6,75% a.a. Entretanto, esta taxa de juro, efetivamente, deveria ser menor, considerando-se as características intrínsecas dos investimentos florestais de longo prazo, com riscos eventuais e incertezas da ocorrência dos coeficientes técnicos e económicos previstos para o futuro do investimento. Atualmente, a taxa de juro praticada pelas agências de fomento para projetos florestais é de 5,5 % a.a.

3.7 Métodos de avaliação de investimentos florestais

Segundo Schneider (1984, 2006), a avaliação de projetos de investimento florestal é realizada pela operacionalização de um fluxo de caixa, que se constitui nas estimativas de receitas e despesas dos recursos monetários aplicados ao longo do tempo. Para estas estimativas, é necessário agrupar os dados das operações em matrizes de coeficientes técnicos e levantar os preços de insumos e produtos. A partir destes, o fluxo de caixa líquido resulta da diferença de dois grandes fluxos de recursos: as receitas, divididas em valor da produção, valor dos subprodutos, valor residual, subsídios governamentais e receitas adicionais; e as despesas, compostas de custos de investimentos e de operação (NORONHA, 1987).

Segundo Schneider (2006), a avaliação económica de projetos de investimentos, entendida como a aplicação de capital em unidades produtivas para obtenção de receitas, pressupõe a determinação de fluxo de caixa e a escolha do custo de oportunidade do capital. Por isso, a inversão de capital com a finalidade de obtenção de receita pode ser representada, esquematicamente, por meio de um fluxo de entradas e saídas monetárias, até o final de um período de tempo considerado.

A comparação entre as alternativas pode ser realizada por métodos económicos, como o do Valor Presente Líquido, que tem como característica essencial o desconto para o presente do fluxo de caixa esperado como resultado de uma decisão de investimento, sendo, portanto, uma medida direta da atratividade económica do investimento proposto. Este método, de

acordo com Schneider (2006), pode ser definido como a diferença entre as receitas e despesas descapitalizadas para o ano 0 (zero), determinando o valor atual de um fluxo de caixa futuro.

Em estudos econômicos, quanto maior for o Valor Presente Líquido, mais atrativo é o projeto de investimento, sendo que a taxa de juro utilizada no cálculo deve representar o que se deixa de ganhar pela não aplicação do capital em outra oportunidade de investimento ao alcance do investidor. Por isso, a magnitude da taxa de juro a ser utilizada depende da posição do investidor em relação às demais oportunidades de empregos do capital. Assim, a taxa de juro deverá equiparar-se à taxa de projetos alternativos, sujeitos ao mesmo grau de risco.

Segundo Souza e Clemente (1999), o método do Valor Presente Líquido (VPL), com certeza é a técnica robusta de investimento mais conhecida e mais utilizada. O VPL, como o próprio nome diz nada mais é do que a concentração de todos os valores esperados de um fluxo de caixa no momento zero.

De acordo com Faro (1979), o Valor Presente Líquido de um projeto é a soma algébrica dos valores descontados, à determinada taxa de juros, do fluxo de caixa a ele associado.

Segundo Silva (1992), esse método do Valor Presente Líquido é um dos mais utilizados na avaliação de investimentos, por valor da produção em termos atuais, considerando uma taxa de juros, e por ser isento de falhas técnicas.

A taxa interna de juro de um projeto expressa a taxa anual de retorno do capital investido e tem a propriedade de igualar o valor das receitas ao valor atual dos custos. Esta medida econômica está associada à viabilidade de um projeto de investimento e determina se a rentabilidade é superior, inferior ou igual ao custo do capital utilizado para financiar o projeto (SCHNEIDER, 2006).

Por este critério, um projeto é considerado viável economicamente se sua taxa interna de juro for maior que uma taxa de desconto alternativa de remuneração de capital, que normalmente é chamada taxa de desconto mínima de atratividade.

Por outro lado, a taxa interna de juro não é recomendável como critério de equalização de horizonte, sendo necessário, nestes casos, fazer preliminarmente as correções com base nos custos de Fisher (FARO, 1979).

Segundo Faro (1979), na maioria dos casos de seleção entre investimentos alternativos, que sejam mutuamente exclusivos e que tenham vidas diferentes, é necessário tornar a análise de alternativas comparáveis, ou seja, tornando as vidas iguais. Para tanto, ele sugere dois procedimentos:

- a) O primeiro deles consiste em tornar como período de estudo o Mínimo Múltiplo Comum entre as vidas dos projetos que estão sendo comparados; e
- b) Estimar valores residuais no fim da vida útil do projeto de menor duração, para as demais alternativas.

Para Rezende (1995), a comparação entre os horizontes de planejamento usando o critério do Mínimo Múltiplo Comum (MMC) é feita utilizando-se o conceito do método do mínimo múltiplo comum, com o objetivo de igualar o horizonte de tempo das diferentes culturas para poder compará-las na mesma unidade, devendo-se considerar os seguintes pontos:

- a) Os projetos devem ser renovados nas mesmas condições iniciais, o que nem sempre é possível; e
- b) Se “ n “ (duração do projeto 1) e “ m “ (duração do projeto 2) são números primos, o MMC poderá ser superior ao horizonte de dados, colocando-se assim, fora do caso determinístico que está assumindo.

O Fluxo Anual Equivalente (FAE) ou Valor Anual Equivalente (VAE), segundo Albuquerque (1993) é utilizado principalmente para a comparação de projetos que apresentam horizontes diferentes, tais como, culturas florestais versus culturas agrícolas ou entre diferentes sistemas de manejo florestais. A pressuposição é de que cada fluxo de caixa se repita perpetuamente, tornando o infinito um horizonte comum a todas as alternativas. Ao empregar este critério deve-se levar em consideração a natureza do valor das parcelas. Se estas apresentam uma receita, deve-se optar pelo projeto de maior fluxo anual equivalente.

Ao empregar este critério de análise, Schneider (2006) recomenda levar em consideração a natureza do valor das parcelas dos projetos de investimento. Se estes apresentam uma receita positiva, deve-se optar pelo projeto de maior fluxo anual equivalente. Caso contrário, se as parcelas representam custos, como custos anuais de manutenção, deve-se optar pelo projeto de menor fluxo anual equivalente em termos absolutos.

De acordo com Faro (1979), a Razão Benefício/Custo é o quociente entre o valor presente da sequência de receitas e o valor presente da sucessão dos custos. Se esta razão exceder a unidade, o valor presente líquido do investimento será positivo, indicando que o projeto é economicamente viável, sendo tanto mais interessante quanto mais a razão exceder a unidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização da área de estudo

Os dados foram levantados em áreas pertencentes à Klabin S. A., no município de Otacílio Costa, na região fisiográfica do Planalto Central catarinense, representado na Figura 1 (SANTA CATARINA, 1986).

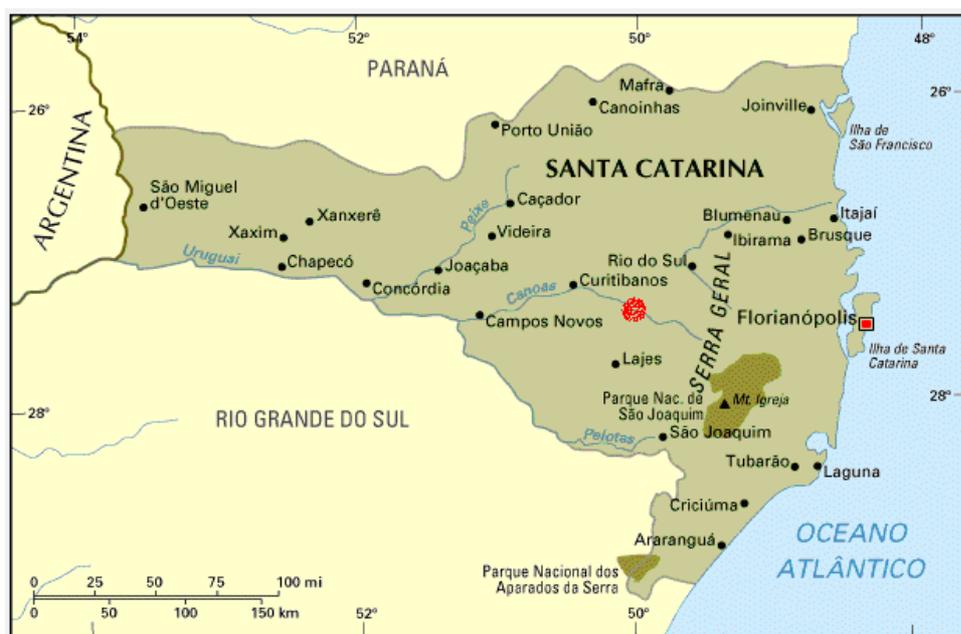


Figura 1 – Localização geográfica do planalto catarinense e da área de coleta dos dados do estudo (sinalizada em vermelho) no município de Otacílio Costa.

O clima da região é do tipo "Cfb", mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos e sem estação seca definida, segundo a classificação climática de Köppen. A precipitação média anual é de 1.808 mm, distribuída em 124 dias, e a temperatura média anual é de 17,8°C (MOTTA; BEIRSDORF; GARCEZ, 1971).

Na área do estudo, segundo dados da EMBRAPA (1999), solos são dos tipos TBHa2, definido como terra bruna estruturada húmica álica, mais cambissolo bruno húmico álico de textura argilosa e muito argilosa, com face pedregosa e não pedregosa; e Cha5, definido como

cambissolo húmico álico, pedregoso e não pedregoso mais solo litólico húmico álico, arenito e basalto, ambos com textura argilosa e médio argilosa (SANTA CATARINA, 1986).

Os dados foram medidos em experimento concebido no Modelo Nelder Modificado, instalado em 1988 e remedido periodicamente até a idade de 18 anos. Em cada unidade amostral foram medidas a circunferência à altura do peito e a altura das árvores. O delineamento estatístico foi em blocos ao acaso, com três repetições e nove tratamentos, sendo estes definidos pelo espaçamento inicial de plantio. Destes tratamentos, somente foram utilizados neste estudo os dados dos espaçamentos mais densos, definidos por: 1,5 x 1,0 m, 2,5 x 1,0 m, 1,5 x 2,0 m, 2,0 x 2,0 m, 1,5 x 3,0 m, 2,5 x 2,0 m, 2,0 x 3,0 m e 2,5 x 3,0 m.

As mudas utilizadas foram produzidas em tubetes, com sementes originadas de pomar de produção de sementes da espécie.

Na implantação do experimento, a área sofreu preparo de solo com gradagem leve realizada com trator agrícola. O plantio foi manual, sendo realizados tratamentos culturais como roçadas, coroamentos e combate à formiga. Conforme publicação da EMBRAPA (1999), a região tem aptidão climática para *Pinus taeda* L., pois se localiza na sub-região agroecológica 3A, denominadas: Vale do Rio das Pedras e Planalto Central, considerada, devido às condições climáticas, preferencial para a espécie.

De acordo com a avaliação da aptidão pedoclimática do *Pinus taeda* L. para o estado de Santa Catarina, as áreas de floresta da empresa localizam-se na Classe Preferencial 3A. O solo da área foi classificado, na sua maioria, como latossolo bruno, aluminico TB, horizonte A húmico, textura argilosa e relevo suavemente ondulado.

4.2 Metodologias empregadas

As metodologias empregadas foram definidas para o estudo do crescimento, da mortalidade, da densidade, do diagrama de manejo e da avaliação econômica.

4.2.1 Crescimento no tempo

Para o estudo do crescimento do diâmetro, da altura, da área basal e da produção volumétrica, foram ajustadas equações em função da idade, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações ajustadas para descrever o crescimento em diâmetro, a área basal e a produção volumétrica.

Nºequação	Modelo	Autor
1	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (1/t)$	Schumacher
2	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot \ln t + b_2 \cdot \ln^2 t$	Backmann
3	$\ln y = b_1 \cdot \ln t + b_2 \cdot \ln^2 t$	Backmann modificada
4	$\ln y = t^2 / (b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2)$	Prodan
5	$y = b_0 \cdot (1 - e^{(-b_1 \cdot t)})$	Richards

Sendo y a variável dependente; t a idade em anos; b_0 , b_1 e b_2 os parâmetros; e ln o logaritmo neperiano. Fonte: Prodan (1965); Schneider (1984); Loetsch, Zöhner e Haller (1973); Kiviste, Gonzáles e Alboreca (2002); e Richards (1959).

4.2.2 Probabilidade de mortalidade

Hamilton (1974) diz que a mortalidade de árvores é em evento discreto, porque são identificadas como valor 0 (vivas) e 1 (mortas), cuja probabilidade (P) de ocorrência ser ajustada pela equação logística, expressa por:

$$P = \{1 + \exp(b'x)\}^{-1} \quad (6)$$

Sendo $b'x$ a combinação linear de parâmetros b; x a variável independente.

No presente caso, a probabilidade de mortalidade das árvores individuais foi determinada pela equação definida por Hamilton (1974), modelada segundo a expansão definida para as florestas da Áustria por Monserud e Sterba (1998):

$$PM = \{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i)\}^{-1} \quad (6a)$$

Sendo $b'x$ a combinação linear de parâmetros b; x a variável independente; PM a probabilidade de mortalidade; x_i as variáveis independentes, definidas pela idade em meses, diâmetro, altura média, altura dominante, área basal e espaço vital; e b_i os parâmetros a serem estimados.

4.2.3 Modelos de densidade e diâmetro

O estudo da densidade e do diâmetro foi realizado com a associação do número de árvores por hectare em função do diâmetro médio das árvores. Neste caso, foram utilizados dados provenientes de povoamentos implantados em espaçamentos de 1,5x1,0 e 2,5x1,0 m, sendo testadas as equações de Reineke (1933), Yoda et al. (1963), Zeide (1995) e Tang, Meng e Meng (1994), expressas por:

- a) modelo da densidade e do diâmetro de Reineke (1933):

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \ln(d) \quad (7)$$

- b) modelo da densidade e do diâmetro de Yoda et al. (1963):

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \ln(d) - c_1 \ln^2(d) \quad (8)$$

- c) modelo da densidade e do diâmetro de Zeide (1995):

$$\ln(N) = \alpha - \beta \ln(d) + \chi h \ln(d) \quad (9)$$

- d) modelo do autodesbaste de Tang, Meng e Meng (1994):

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[(d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right] \quad (10)$$

Sendo d o diâmetro médio quadrático das árvores, h a altura total média, N o número de árvores por hectare, t a idade, β a taxa máxima de autodesbaste do povoamento em densidade completa, $N(t)$ a densidade do povoamento no tempo t (número de árvores por hectare), $d(t)$ o diâmetro médio das árvores no tempo t (cm), S_f o índice de máxima densidade do povoamento, γ o índice de autodesbaste e d_o o diâmetro padrão básico igual a 25cm.

A constante δ foi determinada pela densidade inicial do povoamento (N_1), pelo diâmetro médio inicial (d_1) e pelo diâmetro padrão de 25 cm, através da seguinte fórmula:

$$\delta = (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \quad (11)$$

Assim, por conveniência, para estimar as densidades de árvores por hectare dos povoamentos, a equação passou a ser expressa por:

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[(d(t) / d_o)^{\beta\gamma} + (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \right] \quad (12)$$

A primeira observação da densidade do povoamento (N_1) e do diâmetro médio (d_1) foi usada no cálculo de δ na equação 12. Todos os dados foram combinados para obter o valor médio do índice de densidade máximo \bar{S}_f o índice de autodesbaste $\bar{\gamma}$ e a taxa de autodesbaste máximo β , cujo procedimento de cálculo foi descrito em Tang, Meng e Meng (1994).

O modelo foi ajustado para todos os dados das parcelas permanentes de densidade completa, tendo sido tomado o número de árvores por hectare e o diâmetro médio das parcelas.

Os três parâmetros S_f , β e γ foram determinados por regressão não-linear, sendo que, como valores iniciais, os parâmetros S_f e β foram estimados na equação de Reineke, e para γ foi tomado o valor obtido por Del Rio, Montero e Bravo (2001).

4.2.4 Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento

Para a determinação dos Índices de Densidade do Povoamento (IDPs), foi utilizado o modelo de Tang, Meng e Meng (1994), previamente ajustado aos dados de densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio das parcelas permanentes inventariadas. A seguir, com a equação, foi determinada a linha de densidade de árvores máxima por diâmetro, que representou o momento do autodesbaste da população.

Para a obtenção dos Índices de Densidade do Povoamento foi definido um diâmetro padrão de 25 cm, que serviu de base para a estratificação proporcional das densidades de árvores por hectare. Na determinação dos IDPs, foi utilizado um intervalo de IDP igual a 200, tomado arbitrariamente no momento em que o valor de diâmetro padrão foi igual a 25 cm.

Com isso, foram gerados os Índices de Densidade do Povoamento: 1400, 1200, 1000, 800, 600 e 400.

4.2.5 Determinação das densidades relativas

Para determinação das densidades relativas da população inicialmente, foi ajustada a função de densidade proposta por Curtis (1982), expressa por:

$$G = a.d^b \quad (13)$$

Sendo G a área basal por hectare, d o diâmetro médio em centímetros e a e b os parâmetros da equação.

Então, as densidades relativas da população (DR) foram obtidas por:

$$DR = \frac{G}{(d^b)} \quad (14)$$

4.2.6 Formulação do Diagrama de Manejo da Densidade

Para descrever o volume médio das árvores, foram ajustadas as equações recomendadas por Penner et al. (2002):

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N^{b_2} \quad (15)$$

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln d \quad (16)$$

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G \quad (17)$$

$$\bar{v} = b_0 + b_1 \cdot (d \cdot h)^{b_2} \quad (18)$$

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln h \quad (19)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{(b_0 \cdot h^{b_1} + b_2 \cdot N \cdot h^{b_3})} \quad (20)$$

Sendo \bar{v} o volume médio das árvores (m^3); d o diâmetro à altura do peito (cm); N o número de árvores (ha^{-1}); h a altura; G a área basal; e b_0 , b_1 , b_2 e b_3 os parâmetros.

Na formulação dos Diagramas de Manejo da Densidade (DMD), foi observada a seguinte sequência básica:

- a seleção da equação de densidade e tamanho de árvores por hectare pelo diâmetro médio, sendo usado o modelo proposto por Tang, Meng e Meng (1994);
- a determinação dos Índices de Densidade do Povoamento para um intervalo de classe de 200, para o diâmetro padrão de 25 cm;
- a determinação das variáveis expressas em tamanho do modelo densidade e tamanho, no Diagrama de Manejo da Densidade, foi definida pelo diâmetro médio, pelo volume médio, pela área basal e pelo volume por hectare;
- a estimativa do volume médio foi obtida por equação previamente ajustada e selecionada;
- a determinação da área basal média por hectare pelo diâmetro médio (\bar{d}) e número de árvores por hectare (N), em cada IDPs, foi obtida com a fórmula:

$$\bar{G} = \frac{\pi \cdot \bar{d}^2}{4} \cdot N \quad (21)$$

- o volume por hectare dos IDPs foi estimado pelo produto do volume médio e do número de árvores por hectare, com a fórmula:

$$V = N \cdot \bar{v} \quad (22)$$

Sendo V o volume ($m^3 ha^{-1}$), N o número de árvores (ha) e \bar{v} o volume (m^3) médio.

4.2.7 Distribuição de densidade probabilística

Para gerar os sortimentos de madeira para os regimes de manejo dos povoamentos, inicialmente foi estudada a estrutura da frequência de árvores por classe de diâmetro no tempo, para os espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m, que foram selecionados por corresponderem aos espaços vitais mais utilizados nos reflorestamentos comerciais. Para isso, foram ajustadas as equações das distribuições diamétricas, estabelecidas internamente no programa SAS (2007), na opção do procedimento *Capability*, sendo definidas por:

a) Função Normal:

$$f(x) = \frac{h.100}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (23)$$

Sendo h a largura do intervalo de classe no histograma, μ a média dos diâmetros, σ o desvio padrão da variável estudada, x a variável aleatória observada ($x > 0$) e $f(x)$ a probabilidade de frequência.

b) Função Ln-normal:

$$f(x) = \frac{h.100}{\sigma_{(x-a)}\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-a)-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (24)$$

Sendo h a largura do intervalo de classe no histograma, μ a média dos diâmetros, σ o desvio padrão dos diâmetros a uma constante tal que a variável $\ln(x-a)$ tenha distribuição normal, x a variável aleatória observada ($x > 0$) e $f(x)$ a probabilidade de frequência.

c) Função Weibull:

$$f(x) = \frac{\beta h.100}{\sigma} \left(\frac{x-\alpha}{\sigma}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\sigma}\right)^\beta\right] \quad (25)$$

Sendo h a largura do intervalo de classe no histograma, σ o valor de escala ($\sigma < 0$), α o parâmetro que indica a locação inicial da distribuição do diâmetro mínimo, β a forma da distribuição de densidade de probabilidade ($\beta > 0$) na condição de $x \geq 0$, x a variável aleatória observada ($x > 0$) e $f(x)$ a probabilidade de frequência.

d) Função Gama:

$$f(x) = \frac{h \cdot 100}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)\right) \quad (26)$$

Sendo h a largura do intervalo de classe no histograma, $\Gamma(\alpha)$ a função Gama ordinária de α , α o parâmetro de forma ($\alpha > 0$), β o valor de escala ($\beta < 0$), x a variável aleatória observada ($x > 0$) e $f(x)$ a probabilidade de frequência.

A normalidade e a qualidade do ajustamento dos dados foi determinada por meio dos seguintes testes de aderência, conforme Cao (2004), Finger (1982) e Anderson e Darling (1954):

a) Kolmogorov-Smirnov (KS):

$$KS_i = \max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n_i} [j/n_i] - u_j \right\} \quad (27)$$

b) Anderson-Darling (A-Sq):

$$AD_i = -n_i - \sum_{j=1}^{n_i} (2j-1) [\ln(u_j) + (1-u_{n-j+1})/n_i] \quad (28)$$

endo $u_j = 1 - \exp\left\{-\left[(x_j - a)/b\right]^c\right\}$, n_i o número de árvores na $i^{\text{ésima}}$ combinação de idade da amostra e x_j o diâmetro, ordenado em ordem ascendente em cada combinação de idade da amostra ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n_i}$).

c) Cramer-von Mises (W-Sq):

$$W^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [F(x) - F^*(x)]^2 dF(x) \quad (29)$$

Sendo $F(x)$ a distribuição de probabilidade de frequência teórica e $F^*(x)$ a distribuição de probabilidade empírica ajustada.

d) Qui-quadrado (χ^2):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left[\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \right] \quad (30)$$

Sendo O_i a frequência observada na classe i , E_i a frequência esperada ou ajustada na classe i , k o número de classes, $E_i = N(F(Y_{it}) - F(Y_i))$, F a distribuição acumulativa da função de distribuição, Y_{it} o limite superior da classe i , Y_i o limite inferior da classe i e N a amplitude da amostra.

Em cada teste de aderência utilizado nas diferentes idades do tratamento, as variáveis estatísticas de menor valor indicaram os melhores resultados, e, dessa forma, foi realizado um ranqueamento de 1 a 4, sendo 1 o valor representativo dos melhores resultados. A soma do valor deste ranqueamento para cada parâmetro estatístico estabeleceu o valor total e a média para cada distribuição Normal, Ln-normal, Weibull e Gama. A menor média do ranqueamento determinou a função que melhor representou a distribuição das frequências nas classes de diâmetros em cada idade, nos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.

4.2.8 Prognose da distribuição probabilística de frequência

Inicialmente, a distribuição de probabilidade de frequências foi ajustada pela função de Weibull com dois e três parâmetros, para verificação da precisão e determinação de prognose de probabilidade de frequência por classe diamétrica. Estas funções de Weibull com dois e três parâmetros são expressas por:

a) Função de Weibull, com dois parâmetros:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b} \right) \left(\frac{x}{b} \right)^{c-1} \exp \left(- \left(\frac{x}{b} \right)^c \right) \quad (31)$$

b) Função de Weibull, com três parâmetros:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (32)$$

Sendo a , b e c os parâmetros da função; x a variável aleatória, no caso, o centro de classe de diâmetro; $f(x)$ a frequência por unidade de área; a o parâmetro que indica a locação da posição inicial da distribuição, com diâmetro mínimo ($a \leq x < \infty$) interpretado como limite inferior do menor centro de classe; b o valor de escala ($b < 0$); e c a forma da distribuição de densidade de probabilidade ($c > 0$), para a condição de $x \geq 0$.

Para a estimativa dos parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull, em uma projeção no tempo, foi realizada uma regressão específica para cada parâmetro do modelo de distribuição.

Os dados dendrométricos utilizados foram agrupados para os espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m. Cada regressão específica foi ajustada pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários, conforme metodologia proposta por Cao (2004):

$$y = \exp\{b_1 + b_3 \cdot \ln(N) + b_4 \cdot \ln(h_{100}) + b_5 \cdot t^{-1}\} \quad (33)$$

Sendo y um parâmetro específico da função de Weibull (b , c); N o número de árvores por hectare; h_{100} a altura dominante, em metros; t a idade do povoamento, em anos; \ln o logaritmo natural; e b_j os parâmetros.

Os parâmetros b e c da função de Weibull foram inicialmente estimados para cada amostra, minimizando o logaritmo natural da probabilidade da função de densidade. Nesse caso específico, para a solução da função de densidade de probabilidade de Weibull, foi usado o algoritmo definido por Cao (2004) para o pacote estatístico SAS (1999), que utiliza o estimador de máxima verossimilhança (Maximum Likelihood Estimator – MLE Regression).

Para a alocação dos parâmetros da função de Weibull, foi computado um valor de $a = 0,5 \cdot \hat{D}_o$ do diâmetro mínimo. Assim, com a utilização de duas equações preditoras para determinar a escala de valores dos parâmetros b e c , foi utilizada a expressão geral:

$$b = \exp\{b_1 + b_2 \cdot \ln(N) + b_3 \cdot \ln(h_{100}) + b_4 \cdot t^{-1}\} \quad (34)$$

$$c = \exp\{c_1 + c_2 \cdot \ln(N) + c_3 \cdot \ln(h_{100}) + c_4 \cdot t^{-1}\} \quad (35)$$

Após a determinação dos parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull, o número de árvores em uma dada classe de diâmetro para cada amostra passou a ser estimado por:

$$N = (c/b) \cdot (x/b)^{(c-1)} \cdot \exp(-(x/b)^c) \quad (36)$$

Sendo c e b os parâmetros, x o diâmetro do centro de classe i ($x > 0$) e N a probabilidade de frequência por unidade de área.

Os coeficientes b e c foram obtidos por processo iterativo para minimizar a soma do logaritmo da probabilidade de densidade, expresso por:

$$\sum_{i=1}^p \ln(L_i) / n_i \quad (37)$$

Sendo p o número de combinações de amostras-idade, n_i o número de árvores na $i^{\text{ésima}}$ combinação de amostras-idade (o termo $1/n_i$ foi incluído para uma dada equação com número diferente de árvores) e x_{ij} o diâmetro da árvore j na $i^{\text{ésima}}$ combinação de amostras-idade.

O logaritmo da probabilidade de densidade é então obtido por:

$$\ln(L_i) = \sum_{j=1}^{n_i} \left[\ln(c) - \ln(b) + (c-1) \ln\left(\frac{x_{ij} - a}{b}\right) - \left(\frac{x_{ij} - a}{b}\right)^c \right] \quad (38)$$

Após a obtenção dos parâmetros da função de densidade probabilística de Weibull, o número de árvores em uma dada classe de diâmetro foi estimado por:

$$n_i = N \left\{ \exp^{-[(d_i - w/2) - x_{\min}]/b]c} - \exp^{[(d_i + (w/2) - x_{\min})/b]c} \right\} \quad (39)$$

Sendo n_i o número de árvores na classe de diâmetro i , N o tamanho da amostra em número de árvores por hectare, d_i o diâmetro do centro de classe i , w a amplitude da classe e x_{\min} o limite inferior da classe de diâmetro.

4.2.9 Forma de tronco e sortimentos de madeira

A partir dos dados de cubagem das árvores e da análise de tronco, distribuídos por classe de diâmetro, com amplitude de 10 a 60 cm, foram determinados os diâmetros e as alturas relativas para o ajuste da forma de tronco. As funções de forma de tronco testadas para determinação dos sortimentos de madeira encontram-se discriminadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Função de forma de tronco de árvores.

Nº equação	Função de forma de tronco	Autor
40	$\frac{d_i^2}{d^2} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + b_2 \left(\frac{h_i^2}{h^2} \right)$	Munro
41	$\ln \left(\frac{d_i}{d} \right) = b_0 + b_1 \ln \left(\frac{h-h_i}{h} \right)$	Anonym
42	$\frac{d_i^2}{d^2} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h-1,3} \right) + b_2 \left(\frac{h_i^2}{(h-1,3)^2} \right)$	Kozak
43	$\frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h-1,30} \right)$	Munro
44	$\ln \left(\frac{d_i}{d} \right) = b_0 + b_1 \ln \left(\frac{h-h_i}{h} \right) + b_2 \ln^2 \left(\frac{h-h_i}{h} \right)$	Silva e Sterba
45	$\frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + b_2 \left(\frac{h_i}{h} \right)^2 + b_3 \left(\frac{h_i}{h} \right)^3$	Prodan
46	$\frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + b_2 \left(\frac{h_i}{h} \right)^2 + b_3 \left(\frac{h_i}{h} \right)^3 + b_4 \left(\frac{h_i}{h} \right)^4 + b_5 \left(\frac{h_i}{h} \right)^5$	Peters
47	$\left(\frac{d_i}{d} \right)^2 = 10^{2b_1} d^{2b_2-2} h^{2b_3} (h-h_i)^{2b_4}$	Demaerschalk
48	$\left(\frac{d_i}{d} \right)^2 = \left\{ b_1 \left[1 + b_2 \ln \left[1 - b_3 \left(\frac{h_i}{h} \right)^{b_4} \right] \right] \right\}$	Garay
49	$\left(\frac{d_i}{d} \right)^2 = \left\{ b_1 + b_2 \ln \left[1 - \left(\frac{h_i}{h} \right)^{1/3} \left(1 - e^{-b_1/b_2} \right) \right] \right\}^2$	Bigig

Sendo d_i o diâmetro à altura i , em centímetros; d o diâmetro à altura do peito (1,30), em centímetros; h_i a altura na posição i , em metros; h a altura total da árvore, em metros; b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 e b_5 os coeficientes; e \ln o logaritmo natural. Fonte: Schneider e Schneider (2008), Peters (1971).

O procedimento para obtenção dos sortimentos parte da integração da função de forma do tronco, após o ajustamento dos diâmetros relativos em função das alturas relativas, representadas pela função polinomial do 5º grau, conforme Schneider (1984), expressa por:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot X^2 + b_3 \cdot X^3 + b_4 \cdot X^4 + b_5 \cdot X^5 \quad (50)$$

Sendo Y igual aos diâmetros relativos (d_i/d); X as alturas relativas (h_i/h); d o diâmetro à altura do peito (1,30 m), em centímetros; d_i o diâmetro a uma altura relativa h_i , em centímetros; h a altura total da árvore, em metros; e h_i a altura na posição i, em metros.

A sequência de cálculos para determinar o volume dos sortimentos foi proposta por Schneider (1984). Assim, substituindo as variáveis dependente e independente na equação original, obtém-se a nova equação, expressa por:

$$\frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + b_3 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + b_4 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + b_5 \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \quad (51)$$

Isolando-se d_i na equação, tem-se que:

$$d_i = b_0 \cdot d + b_1 \cdot d \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2 \cdot d \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + b_3 \cdot d \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + b_4 \cdot d \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + b_5 \cdot d \cdot \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \quad (52)$$

E, assim:

$$d_i = b_0 \cdot d + \frac{(b_1 \cdot d \cdot h_i)}{h} + \frac{(b_2 \cdot d \cdot h_i^2)}{h^2} + \frac{(b_3 \cdot d \cdot h_i^3)}{h^3} + \frac{(b_4 \cdot d \cdot h_i^4)}{h^4} + \frac{(b_5 \cdot d \cdot h_i^5)}{h^5} \quad (53)$$

Os novos parâmetros da equação são definidos por:

$$\begin{aligned} a_0 &= b_0 \cdot d & a_1 &= b_1 \cdot (d/h) & a_2 &= b_2 \cdot (d/h^2) \\ a_3 &= b_3 \cdot (d/h^3) & a_4 &= b_4 \cdot (d/h^4) & a_5 &= b_5 \cdot (d/h^5) \end{aligned}$$

Então, a equação de forma de tronco passa a ser expressa por:

$$d_i = a_0 + a_1.h_i + a_2.h_i^2 + a_3.h_i^3 + a_4.h_i^4 + a_5.h_i^5 \quad (54)$$

Integrando-se a equação de forma de tronco acima, de zero (0) até a altura relativa (h_i), obtém-se o volume absoluto da seguinte forma:

$$v = K \cdot \int_0^{h_i} Y^2 \cdot d_{h_i} \quad (55)$$

Sendo K igual a $(\pi/4)/10000$; Y igual a d_i , da equação de forma de tronco redefinida; h_i a altura relativa, correspondente ao comprimento da tora; e v o volume, em metros cúbicos.

Então, substituindo-se a variável Y na equação 55 pela equação de d_i (equação 54), obtém-se que:

$$v = K \cdot \int_0^{h_i} (a_0 + a_1.h_i + a_2.h_i^2 + a_3.h_i^3 + a_4.h_i^4 + a_5.h_i^5)^2 \cdot d_{h_i} \quad (56)$$

A solução desta integral é dada por:

$$V = K \cdot \left[\begin{aligned} & a_0^2 \cdot h_i + \frac{a_1^2 \cdot h_i^3}{3} + \frac{a_2^2 \cdot h_i^5}{5} + \frac{a_3^2 \cdot h_i^7}{7} + \frac{a_4^2 \cdot h_i^9}{9} + \frac{a_5^2 \cdot h_i^{11}}{11} + a_0 \cdot a_1 \cdot h_i^2 \\ & + \frac{2 \cdot a_0 \cdot a_2 \cdot h_i^3}{3} + \frac{a_0 \cdot a_3 \cdot h_i^4}{2} + \frac{2 \cdot a_0 \cdot a_4 \cdot h_i^5}{5} + \frac{a_0 \cdot a_5 \cdot h_i^6}{3} + \\ & \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot h_i^4}{2} + \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_3 \cdot h_i^5}{5} + \frac{a_1 \cdot a_4 \cdot h_i^6}{3} + \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_5 \cdot h_i^7}{7} + \frac{a_2 \cdot a_3 \cdot h_i^6}{3} \\ & + \frac{2 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot h_i^7}{7} + \frac{a_2 \cdot a_5 \cdot h_i^8}{4} + \frac{a_3 \cdot a_4 \cdot h_i^8}{4} + \frac{2 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot h_i^9}{9} + \frac{a_4 \cdot a_5 \cdot h_i^{10}}{5} \end{aligned} \right]_0^{h_i} \quad (57)$$

Para o cálculo dos volumes dos sortimentos, utilizou-se a integração parcial da função de forma, da altura do toco até a altura na ponta mais fina da tora. O volume desses sortimentos foi obtido pela subtração do volume calculado até o final da secção com o volume até o início da secção, resultando na equação:

$$v_t = K \cdot \left(\int_0^{X_2} Y^2 \cdot d_{x_2} - \int_0^{X_1} Y^2 \cdot d_{x_1} \right) \quad (58)$$

Sendo X_1 a altura no início da tora, em metros; X_2 a altura no fim da tora, em metros; v_t o volume da tora, em metros cúbicos; e $K = (\pi/4)/10000 = \text{constante}$.

A integração de uma função de forma permite a obtenção de estimativas de volume para todo o tronco ou para suas partes, segundo limites diamétricos de utilização e comprimento de toras.

Os sortimentos de madeira para serraria foram determinados com um programa computacional elaborado em Linguagem Visual Fortran (SCHNEIDER, 2008), sendo classificados e expressos em volume (m^3) e em número de peças correspondentes aos seguintes critérios de classificação para madeira bruta:

- a) S1: madeira para celulose com diâmetro na ponta fina da tora entre 8 a 19,9 cm e com casca e comprimento de 2,6 metros;
- b) S2: madeira para celulose ou serraria com diâmetro na ponta fina da tora entre 20 a 29,9 cm e com casca e comprimento de 2,6 metros;
- c) S3: madeira para serraria com diâmetro na ponta fina da tora entre 30 a 39,9 cm e com casca e comprimento de 2,6 metros;
- d) S4: madeira para serraria ou laminação com diâmetro na ponta fina da tora igual ou maior que 40 cm e com casca e comprimento de 2,6 metros;
- e) PER: madeira do toco para altura média de 15 cm;
- f) RES: madeira residual para diâmetro menor que 8 cm.

O diâmetro mínimo, na ponta mais fina da tora, foi de 8 cm com casca, para quantificar o volume total aproveitável da árvore, e igual ou maior que 20 cm com casca, para o volume de toras para serraria.

As alturas (h_i) foram estimadas por uma equação polinomial tendo como variáveis dependentes as alturas relativas (h_i/h) e como independentes os diâmetros relativos (d_i/d).

O fuste aproveitável foi otimizado para formar, preferencialmente, toras com maior diâmetro e comprimento, e o restante do fuste, classificado nas classes imediatamente inferiores, foi utilizado para toras de menor comprimento.

A parte do fuste com diâmetro que não possibilitou a formação de uma tora com os comprimentos de 2,6 m foi considerada volume residual.

4.2.10 Critérios de seleção dos modelos de regressão

A seleção dos modelos de regressão foi realizada comparativamente, observando-se os critérios estatísticos definidos por: coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, Índice de Furnival, coeficiente de variação, valor de F, valor ponderado de escores estatísticos, distribuição gráfica dos resíduos e validação do modelo de produção.

O Índice de Furnival permite a comparação entre modelos com variáveis dependentes com e sem transformação, sendo determinado através das expressões (FURNIVAL, 1961):

$$IF = \left\{ \text{anti log} \left[\frac{\sum (\log(y'))^{-1}}{n} \right] \right\} \cdot S_{yx} \quad (59)$$

Em que, para transformação para logaritmo neperiano da variável dependente e introduzindo a correção proposta por Silva e Bailey (1991), resulta na equação:

$$IF = \left\{ \text{anti log} \left[\frac{\sum (\log(y'))^{-1}}{n} \right] \right\} \cdot S_{yx} \cdot \exp[(n - p) / 2n] \quad (60)$$

Sendo IF o Índice de Furnival, S_{yx} o erro padrão da estimativa da equação transformada, y a variável dependente, n o número de observações e p o número de coeficientes da equação.

Conforme Alder (1980), para o cálculo do Índice de Furnival, nesta equação a recíproca da primeira derivada da variável dependente transformada para $\ln(y)$ é igual a y resultando em $[\log y]$, para y^k é igual a $1/(k \cdot y^{k-1})$ resultando em $[\log(1/\{K \cdot y^{k-1}\})]$ e para o caso da não transformação é igual a 1, em que y é a variável dependente e k o expoente ou a potência da variável dependente transformada.

A seleção do melhor modelo foi realizada pela somatória dos escores, de 1 a n modelos testados. A equação com menor soma dos escores foi selecionada.

A validação dos modelos de densidade de árvores por hectare por diâmetro médio do povoamento foi realizada através dos critérios estatísticos recomendados por Palahi, Miima e Montero (2002) e Cellini et al. (2002):

a) Tendência (Bias):

$$BIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (61)$$

b) Eficiência (E):

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \quad (62)$$

c) Desvio padrão residual relativo (S%):

$$S\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \cdot 100 \quad (63)$$

d) Desvio médio relativo (D%):

$$D\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \cdot 100 \quad (64)$$

e) Qui-quadrado (χ^2):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad (65)$$

Sendo y_i o valor observado da densidade de árvores por hectare, \bar{y}_i o valor médio das densidades de árvores por hectare, \hat{y}_i o valor estimado de densidade de árvores por hectare e n o número de observações.

4.2.11 Análise de covariância

Para avaliar diferenças de inclinação e nível entre as curvas de crescimento em altura dominante e volume para os diferentes sítios, foi empregada a análise de covariância.

Nessa análise, primeiramente, testou-se a diferença de inclinação. Se não existisse evidência de diferença de inclinação, a hipótese de não diferença de níveis era testada. Se a diferença não fosse significativa para inclinação e níveis, uma regressão única poderia ser ajustada, ignorando a diferença entre grupos. Por outro lado, regressões que diferiram entre grupos de tratamento refletiram a necessidade de interação entre os grupos de tratamentos e a variável independente ou covariável. Esta análise de covariância foi realizada seguindo a orientação constante em Steel e Torrie (1960) e Little et al. (1983).

No procedimento GLM (General Linear Models) do *Statistical Analysis System* (SAS), este processo foi especificado e analisado como uma interação, em que um fator de $X \times A$ produz a estatística apropriada para estimar diferentes regressões de Y em X , para diferentes valores ou classes, especificado por A .

No modelo de covariância, as variáveis contínuas e os indicadores de grupo (variável classe) foram definidos por variáveis dummy, representadas, neste caso, pelas classes de sítios naturais de qualidade boa, média e ruim e pelos espaçamentos iniciais, conforme o caso.

Consequentemente, a análise de covariância permitiu comparar curvas de crescimento em relação ao seu paralelismo, podendo indicar a existência de diferentes padrões de crescimento. A hipótese de igualdade de inclinação e nível das curvas de crescimento foi verificada pelo teste F para uma determinada probabilidade de significância.

4.2.12 Métodos de avaliação econômica

As avaliações econômicas foram realizadas de acordo com o conceito de projetos de investimento florestal, como a inversão de capital em determinado empreendimento, com a finalidade de obtenção de receitas.

Neste estudo, para a análise econômica dos regimes de manejo florestal, foram utilizados tão somente os métodos que consideram a dimensão dos valores monetários no tempo, por serem mais confiáveis e eficientes.

Para a avaliação dos regimes de manejo, foi utilizada a taxa de juros de 6,75 % a.a., por se tratar de um valor praticado pelas agências de financiamento para investimentos em reflorestamento, na época da análise econômica, em 30/04/2010.

Os métodos de análise econômica empregados foram:

a) Valor Presente Líquido:

$$VPL = \frac{Rr + \sum Dj \cdot (1+i)^{r-j} - C \cdot (1+i)^r - \frac{a+t}{i} \cdot \{(1+i)^r - 1\}}{(1+i)^r} \quad (66)$$

Sendo VPL o Valor Presente Líquido; Rr a receita do corte final na idade r; Dj a receita do desbaste realizado no ano j; C o custo de implantação; a o custo de administração anual; r a rotação, em anos; t o custo anual do arrendamento ou o custo da terra; e i a taxa de juros ao ano.

b) Taxa Interna de Retorno:

$$\{Rr + \sum Dj \cdot (1+i)^{r-j}\} = \left\{ C \cdot (1+i)^r + \frac{(a+t)}{i} \cdot [(1+i)^r - 1] \right\} = 0 \quad (67)$$

Sendo Rr a receita do corte final na idade r; Dj a receita do desbaste realizado no ano j; C o custo de implantação; a o custo de administração anual; r a rotação, em anos; t o custo anual do arrendamento ou do capital terra; e i a taxa de juros ao ano.

c) Valor Anual Equivalente:

$$VAE = \frac{\sum_{j=1}^m \{VPL_j \cdot i \cdot (1+i)^n\}}{(1+i)^n - 1} \quad (68)$$

Sendo VPL o Valor Presente Líquido, i a taxa de juros ao ano, n o horizonte de planejamento e m é o número de cultivos no horizonte máximo.

4.2.13 Formação dos custos operacionais do investimento

Para a determinação dos custos diretos de implantação e manutenção do investimento florestal, foram padronizados todos os procedimentos operacionais das atividades técnicas, aplicadas na formação e condução dos povoamentos.

Na implantação de projetos florestais, basicamente é influenciado pelos custos de implantação, a saber: adensidade de plantio, o condicionado ao número de mudas por hectare, que determina a quantidade de adubo, o custo de transporte, o plantio, o replantio e a adubação; a distância entre linhas de plantio que afetam a mecanização; e o tipo de muda utilizada, se produzida a partir de sementes ou de pomar clonal.

Devido a isso, na análise dos investimentos para todas as alternativas de regimes de manejo, foi fixado o espaçamento de 3x2 m e mudas produzidas a partir de sementes, por considerar-se essa situação predominante na atividade de reflorestamento com *Pinus taeda* L.

Na formação dos custos, inicialmente foram definidas as operações manuais e mecanizadas de todas as atividades realizadas em um empreendimento florestal definido como padrão na obtenção dos rendimentos operacionais, que se encontram relacionados no Anexo A. Também, foi levantado o custo da hora da mão de obra regional de todas as atividades realizadas em um empreendimento florestal.

Com esses parâmetros de rendimentos operacionais e esse custo de mão de obra, foram determinados os custos parciais das operações manuais e mecanizadas, bem como dos insumos utilizados ao longo do horizonte de planejamento do investimento. Assim, na Tabela 3, encontram-se relacionados os custos praticados nas atividades desenvolvidas no horizonte de planejamento do investimento com *Pinus taeda* L., em espaçamento de 3,0x2,0 m.

Tabela 3 – Centros de custos das atividades e dos insumos utilizados em um horizonte de planejamento florestal.

Ano	Atividades/Descrição	Unidade	Custos
0	Arrendamento	R\$ha ⁻¹ ano ⁻¹	150,00
0	Administração	R\$ha ⁻¹ ano ⁻¹	150,00
0	Implantação	R\$ha ⁻¹	3.540,00
1	Manutenção + coroamento + roçada	R\$ha ⁻¹	350,00
2	Manutenção	R\$ha ⁻¹	100,00
3	Manutenção + roçada + desrama	R\$ha ⁻¹	330,00
4	Manutenção	R\$ha ⁻¹	100,00
5	Manutenção + desrama	R\$ha ⁻¹	320,00
6	Manutenção	R\$ha ⁻¹	100,00
7-R	Manutenção	R\$ha ⁻¹	100,00

Fonte: Data: 30/04/2010.

O custo total de implantação resultou em R\$ 3.540,00 ha⁻¹, com um custo de administração de R\$ 150,00 ha⁻¹ano⁻¹ e um custo de arrendamento de R\$ 150,00 ha⁻¹ano⁻¹. Os custos de manutenção resultaram em R\$ 100,00 ha⁻¹ no primeiro ano, variando nos anos seguintes até a rotação, devido, sobretudo, às intervenções de desrama.

Para facilitar a análise financeira dos regimes de manejo, os custos operacionais da atividade foram agrupados em centros de custos, com o objetivo de facilitar a operação do fluxo de caixa. Cada centro de custo foi constituído pelo somatório dos custos parciais que ocorreram no mesmo momento do investimento e apresentaram a mesma unidade de medida. Assim, foram constituídos os seguintes centros de custos: implantação, administração, mais arrendamento e manutenção. Os custos de manutenção foram tratados individualmente por ano de ocorrência, por apresentarem variação de valor no tempo do investimento.

O custo de implantação florestal foi constituído de todos os custos parciais que ocorrem no primeiro ano de plantio, como limpeza da área, mudas, adubos, plantio, replantio, mão de obra, etc.

No custo de administração anual, consideraram-se as despesas de insumos de escritório, luz, telefone, pessoal técnico e administrativo, encargos sociais, manutenção de prédios, instalações, etc. Por ser de difícil obtenção precisa, foi considerado um valor de cerca de 4,2% dos custos totais da implantação do projeto. Assim, para o custo de administração foi computado o valor de R\$ 150,00 ha⁻¹ano⁻¹.

O custo de remuneração anual do capital terra foi determinado em função do valor do arrendamento pago anualmente por um hectare de terra para implantação de projetos do setor

primário, como, por exemplo, para pecuária ou floresta, praticada na região. Assim, este custo do capital terra alcançou R\$ 150,00 ha⁻¹ano⁻¹.

4.2.14 Determinação dos preços dos sortimentos de madeira

Para a determinação do valor econômico, foi considerado o preço da madeira em pé, com base nos valores praticados no mercado da região do Planalto Médio catarinense, diferenciados em tipos de sortimentos de madeira para uso em energia, celulose e/ou aglomerado, serrarias e laminação.

Para tanto, considerou-se que o custo da matéria prima posta na indústria, pago aos produtores florestais pelas indústrias consumidoras, é o resultado da seguinte operação:

$$\text{CMP} = \text{P} + \text{T} + \text{C} \quad (69)$$

Sendo CMP o custo da matéria prima posta na indústria; P o preço pago pela indústria, que deve ser suficiente para cobrir os encargos de implantação, retorno do capital, custo da administração e da terra e do capital investido; T o custo de transporte; e C o custo de colheita.

Da expressão acima, deduziu-se que o preço da madeira em pé (PMP) paga pelos consumidores aos produtores era dado pela expressão:

$$\text{PMP} = \text{CMP} - \text{T} - \text{C} \quad (70)$$

O custo de transporte variou com a distância da localização do projeto de investimento em relação aos centros consumidores. Para todas as avaliações econômicas, os preços dos sortimentos de madeira foram tomados para uma distância média de 100 km das fontes de consumo existentes ou preconizadas como expectativa futura de formação de um mercado consumidor para este raio econômico.

Evidentemente, para cobrir todos os custos de produção de um metro cúbico de madeira, o investimento não pode distanciar-se do raio econômico. Isso implica afirmar que todo o investimento florestal deve ser realizado dentro de um raio econômico que pressuponha a existência de mercado; caso contrário, esse mercado deverá, inevitavelmente,

no futuro, ser formado, para viabilizar economicamente a atividade e satisfazer as hipóteses formuladas.

O custo da colheita tendeu a variar com a distância de baldeio, o tipo de topografia do terreno e as condições e os tipos de caminhos de extração e do tamanho dos talhões. Devido a esses problemas, os preços dos sortimentos foram tomados propositalmente para madeira em pé, em metros cúbicos com casca.

A utilização do preço da madeira com casca e em pé é justificável, pois os custos de exploração e transporte são considerados iguais para todos os regimes de manejo. Em razão disso, estes custos foram desconsiderados do fluxo de caixa para determinação do valor econômico das alternativas de manejo dos povoamentos.

Além dos aspectos anteriormente mencionados, considerou-se ainda que a receita advinda de um projeto de investimento florestal sempre pode ser fortemente influenciada por algum dos seguintes fatores: localização geográfica do investimento em relação às características do relevo, que influencia o custo de colheita; tamanho do projeto de investimento, que permite ou não o ganho de escala por ocasião da colheita; distância dos centros de transformação da matéria prima; estratégias cooperativas de integração para transformação e comercialização de produtos brutos ou beneficiados; e disponibilidade de fontes de financiamento a juros compatíveis com a realidade do setor florestal.

No caso do *Pinus taeda* L., manejado em sistema de alto fuste, os preços¹ foram: R\$ 27,00 m⁻³ com casca para toras com diâmetro na ponta fina de 7 a 19,9 cm (S1); R\$ 55,00 m⁻³ com casca para toras com diâmetro na ponta fina de 20 a 29,9 cm (S2); R\$ 82,00 m⁻³ com casca para toras com diâmetro na ponta fina de 30 a 39,9 cm (S3); e R\$ 117,00 m⁻³ com casca para toras com diâmetro na ponta fina com mais de 40,0 cm (S4).

4.2.15 Processamento dos dados

As regressões lineares foram ajustadas pelo procedimento PROC REG, as não-lineares pelo PROC NLIN no método Gauss-Newton, e a distribuição de probabilidade de frequência pelo procedimento PROC CAPABILITY, no pacote *Statistical Analysis System* (SAS, 1999).

¹ Preços tomados no mercado regional em 30/04/2010.

As estimativas dos parâmetros dendrométricos e os respectivos gráficos foram gerados por rotina do Excel. A simulação da produção e dos regimes de manejo da densidade populacional foi desenvolvida em linguagem *Visual Fortran*, executado em ambiente Windows, com interação no Excel.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Crescimento da altura dominante

Os resultados estatísticos das equações testadas para estimar a altura dominante em função da idade foram reunidos na Tabela 4, conforme o número da equação de referência (Tabela 1). Para todos os modelos, o coeficiente de determinação foi alto, superior a 98 %; o coeficiente de variação, por sua vez, foi bastante baixo, variando de 1,11 a 4,71 % e indicando, a princípio, alto desempenho de todos os modelos.

Tabela 4 – Parâmetros das equações testadas para estimar a altura dominante.

Nº eq.	Coeficientes			R^2_{Aj}	S_{yx}	IF	CV%	F
	b_0	b_1	b_2					
1	3,4997	-8,2562	-	0,9830	0,0493	1,0827	1,90	6888,9
2	-0,8293	2,1225	-0,2662	0,9899	0,0381	0,0625	1,47	5804,1
3	-	1,3744	-0,1026	0,9997	0,0452	0,0742	1,75	201022,0
4	2,6456	0,7464	0,2756	0,9987	0,5185	0,8500	1,11	189837,0
5	52,2747	0,0307	-	0,9984	0,6326	1,0390	4,71	34118,1

Sendo R^2_{Aj} o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; IF Índice de Furnival; CV o coeficiente de variação em %; F o valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 e b_2 os coeficientes.

O valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos, utilizado como critério de seleção, mostrou que a equação 3, de Backmann modificada, sem intercepto, com 7 pontos, é a melhor para descrever a altura dominante por idade, sendo seguida pela equação 4, com 8 pontos (Tabela 5).

Tabela 5 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações de altura dominante.

N ^o equação	Escore dos parâmetros estatísticos				Valor ponderado
	R ² _{Aj.}	IF	CV%	F	
1	5	5	4	4	18
2	4	1	2	5	12
3	1	2	3	1	7
4	2	3	1	2	8
5	3	4	5	3	15

Sendo R²_{Aj.} o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; IF o Índice de Furnival; CV o coeficiente de variação em %; e F o valor de F da análise de variância.

A análise da dispersão dos valores residuais em relação à variável dependente altura dominante confirmou a seleção da equação 3 entre as equações testadas, por ter, de forma geral, uma distribuição dos resíduos regular, com leve tendência na porção intermediária da altura dominante (Figura 2), com estimativas de altura dominante coerentes ao longo da idade.

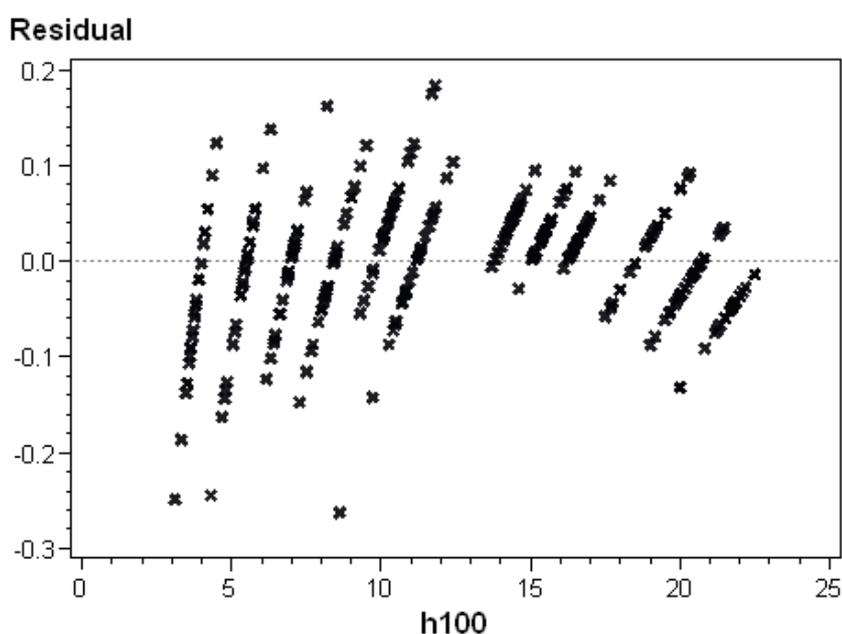


Figura 2 – Dispersão dos resíduos de altura dominante em metros do modelo de Backmann modificada sem intercepto.

5.2 Classificação de sítio

As estimativas da altura em função da idade, padronizadas para alcançar as alturas de 18 a 28 m na idade índice de 18 anos, foram reunidas na Tabela 6 e representadas na forma de curvas na Figura 3. No total, foram estabelecidas 6 curvas de índices de sítio, com intervalo de 2 m na idade de referência, para abranger toda a dispersão dos dados de alturas dominante observados.

Tabela 6 – Alturas dominantes por idade dos índices de sítio.

Idade (ano)	Índices de sítio					
	18	20	22	24	26	28
5	5,5	6,2	6,8	7,4	8,0	8,7
6	6,7	7,4	8,2	8,9	9,7	10,4
7	7,8	8,7	9,6	10,4	11,3	12,2
8	8,9	9,9	10,9	11,9	12,9	13,8
9	9,9	11,0	12,1	13,2	14,4	15,5
10	10,9	12,2	13,4	14,6	15,8	17,0
11	11,9	13,2	14,6	15,9	17,2	18,5
12	12,8	14,3	15,7	17,1	18,6	20,0
13	13,8	15,3	16,8	18,4	19,9	21,4
14	14,7	16,3	17,9	19,5	21,2	22,8
15	15,5	17,2	19,0	20,7	22,4	24,2
16	16,3	18,2	20,0	21,8	23,6	25,5
17	17,2	19,1	21,0	22,9	24,8	26,7
18	18,0	20,0	22,0	24,0	26,0	28,0
19	18,7	20,8	22,9	25,0	27,1	29,2
20	19,5	21,6	23,8	26,0	28,2	30,3
21	20,2	22,5	24,7	27,0	29,2	31,5
22	20,9	23,3	25,6	27,9	30,2	32,6
23	21,6	24,0	26,4	28,8	31,2	33,7
24	22,3	24,8	27,3	29,7	32,2	34,7
25	23,0	25,5	28,1	30,6	33,2	35,7

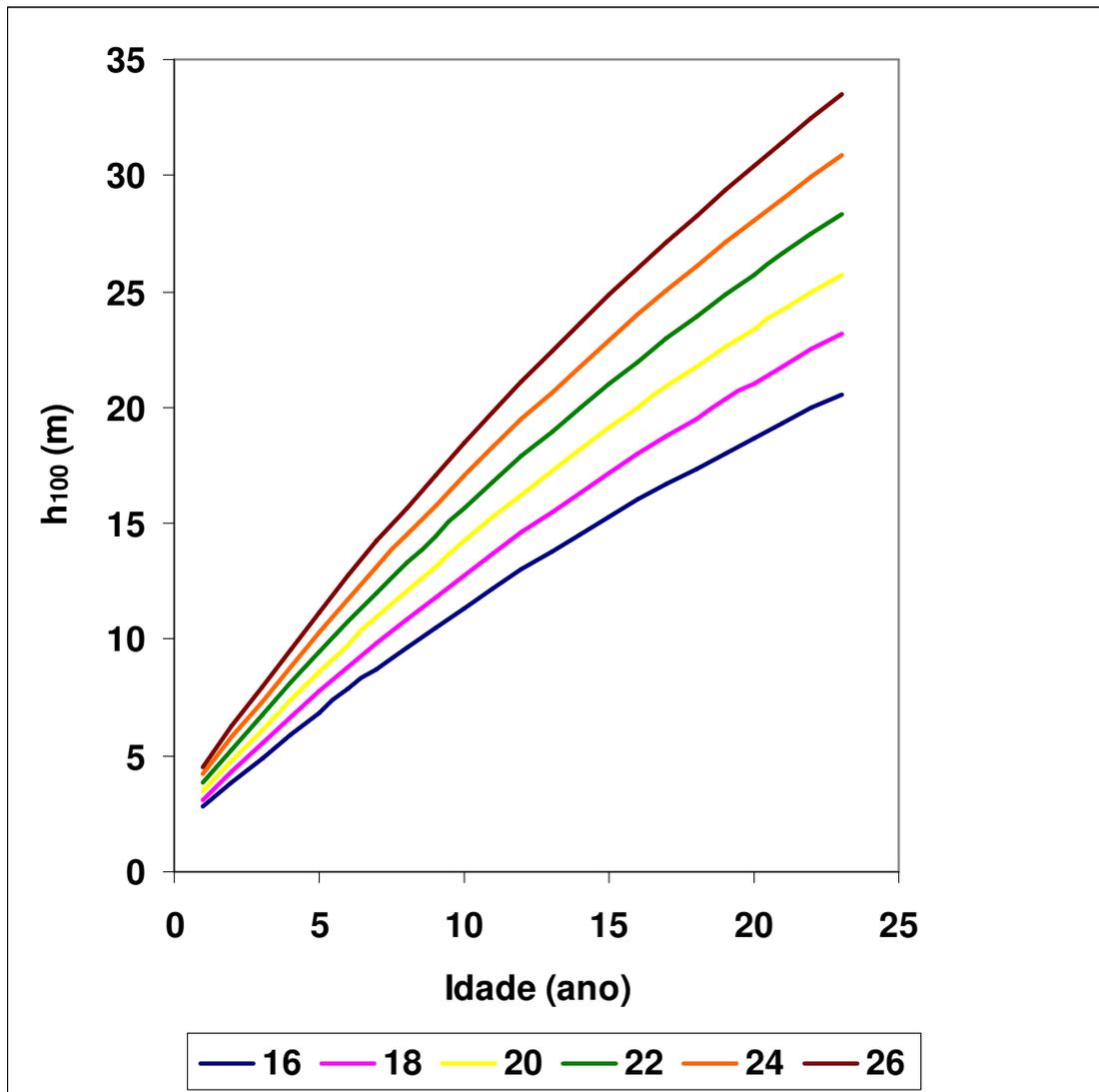


Figura 3 – Classificação de sítio para *Pinus taeda* L.

5.3 Crescimento em diâmetro

Os resultados estatísticos das equações testadas para estimar o diâmetro em função da idade foram agrupados na Tabela 7.

De acordo com as estatísticas de ajuste e precisão, ocorreu diferença no desempenho dos cinco modelos de diâmetro testados, como coeficiente de determinação variando de 0,7002 a 0,9992 e o coeficiente de variação de 2,86 a 17,29%, para a pior e a melhor equação.

Tabela 7 – Parâmetros das equações testadas para estimar o diâmetro.

Nº eq.	Coeficientes			$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F
	b_0	b_1	b_2					
1	3,42407	-6,88441	-	0,8807	0,0824	2,3860	2,87	879,2
2	0,33429	1,41079	-0,16355	0,8815	0,0821	2,3728	2,86	443,5
3	-	1,68115	-0,21698	0,9992	0,0820	2,3579	2,86	73756,6
4	9,06405	10,14699	-0,11471	0,7002	22,1213	36,2652	17,29	139,9
5	28,2470	0,0766	-	0,9931	1,5446	2,5369	8,52	8600,5

Sendo $R^2_{Aj.}$ o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; IF o Índice de Furnival; CV o coeficiente de variação em %; F o valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 e b_2 os coeficientes.

O valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos, mostrou que a equação 3, de Backmann modificada, sem intercepto, com 4 pontos, é a melhor para descrever o diâmetro por altura dominante, sendo seguida pelas equações 2 e 5, com 12 pontos, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações de diâmetro.

Nº equação	Escore dos parâmetros estatísticos				Valor ponderado
	$R^2_{Aj.}$	IF	CV%	F	
1	5	3	2	4	14
2	4	2	1	5	12
3	1	1	1	1	4
4	3	5	4	2	14
5	2	4	3	3	12

Sendo $R^2_{Aj.}$ o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; IF o Índice de Furnival; CV o coeficiente de variação em %; e F o valor de F da análise de variância.

A análise da dispersão dos valores residuais em relação à variável dependente diâmetro confirmou a opção pela equação 3, com distribuição uniforme dos resíduos por classe do logaritmo do DAP, conforme mostrado na Figura 4.

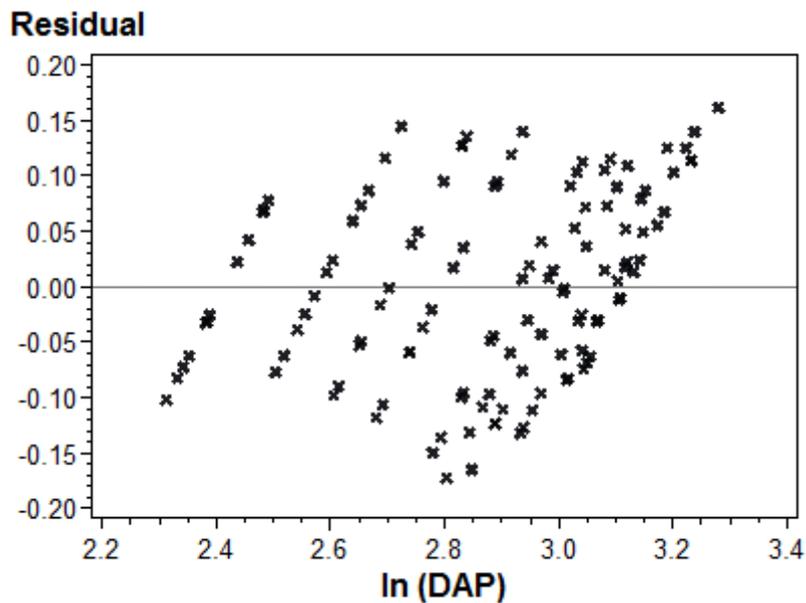


Figura 4 – Dispersão dos resíduos de diâmetro do modelo de Backmann modificada sem intercepto.

5.4 Crescimento da altura média

Os resultados estatísticos das equações relacionadas na Tabela 9, testadas para estimar a altura em função da idade, mostraram o bom desempenho dos cinco modelos avaliados, como coeficiente de determinação de 0,9853 a 0,9989 e o coeficiente de variação de 1,39 a 6,01 %, para o pior e o melhor ajuste.

Tabela 9 – Parâmetros das equações testadas para estimar a altura.

N ^o eq.	Coeficientes			R ² _{Aj.}	S _{yx}	IF	CV%	F
	b ₀	b ₁	b ₂					
1	3,43102	-8,42227	-	0,9853	0,0468	0,0768	1,86	7972,9
2	-0,82787	1,58926	-0,11464	0,9918	0,0349	0,0573	1,39	7211,3
3	-	0,91972	0,01769	0,9958	0,0384	0,0631	1,53	262209,1
4	-23,5620	5,67480	0,05090	0,9860	4,1566	6,8142	6,01	4198,3
5	238,7	0,00398	-	0,9989	0,4534	0,7447	3,45	55995,8

Sendo R²_{Aj.} o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; IF o Índice de Furnival; CV o coeficiente de variação em %; F o valor de F da análise de variância; e b₀, b₁ e b₂ os coeficientes.

A análise do valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos, como critério de seleção, novamente mostrou a equação 3, de Backmann modificada, sem intercepto, com 7 pontos, como a melhor para descrever o crescimento da altura média, seguida pela equação 2, com 11 pontos (Tabela 10).

Tabela 10 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações da altura.

N. equação	Escore dos parâmetros estatísticos				Valor ponderado
	R ² _{Aj.}	IF	CV%	F	
1	5	3	3	4	18
2	4	1	1	5	11
3	2	2	2	1	7
4	3	5	5	2	15
5	1	4	4	3	12

Sendo R²_{Aj.} o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; IF o Índice de Furnival; CV o coeficiente de variação em %; e F o valor de F da análise de variância.

A análise da dispersão dos valores residuais em relação à variável dependente do diâmetro apontou a equação 3 como a melhor entre as testadas para estimar a altura média em função da idade, apresentando boa distribuição dos resíduos (Figura 5).

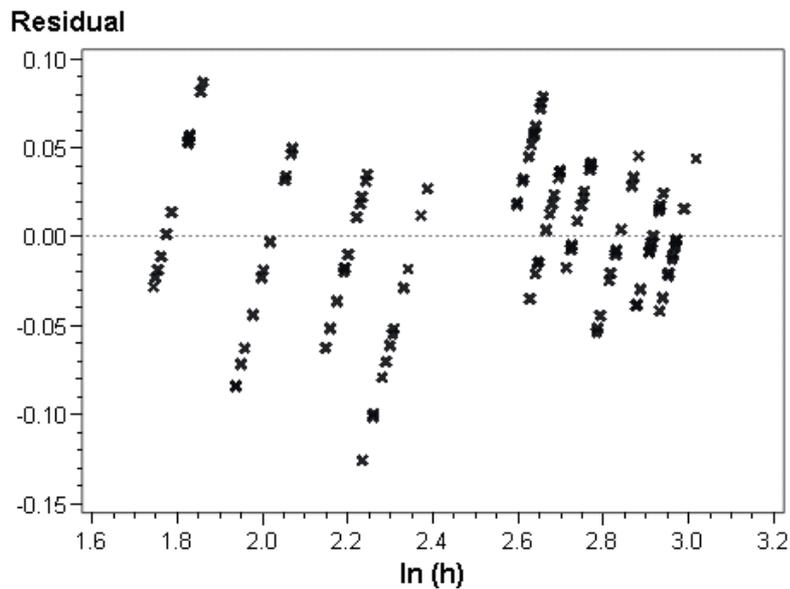


Figura 5 – Dispersão dos valores residuais de altura do modelo de Backmann modificada sem intercepto

5.5 Probabilidade de mortalidade

A análise de correlação de Pearson entre a taxa de mortalidade e as variáveis dendrométricas idade, diâmetro, altura, altura dominante, área basal e volume (Tabela 11) mostrou correlação altamente significativa (Prob.<0,0001) com idade, altura, altura dominante, área basal e volume. Também evidenciou que a mortalidade e o diâmetro apresentaram uma menor correlação (Prob. = 0,0037), porém ainda significativa. A mortalidade foi melhor explicada pela idade da população, cuja correlação foi 0,62726, significativa para a probabilidade (Prob.<0,0001).

Tabela 11 – Correlação de Pearson da probabilidade de mortalidade com variáveis dendrométricas.

Variável	PM	t	d	h	h ₁₀₀	G	V
PM	1,00000	0,62726	0,29522	0,58325	0,60261	0,49533	0,62484
		<,0001	0,0037	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
t		1,00000	0,83842	0,98403	0,98803	0,86361	0,97356
			<,0001	<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
d			1,00000	0,88877	0,86480	0,81644	0,81347
				<,0001	<,0001	<,0001	<,0001
h				1,00000	0,99537	0,89697	0,97739
					<,0001	<,0001	<,0001
h ₁₀₀					1,00000	0,90891	0,98627
						<,0001	<,0001
G						1,00000	0,93184
							<,0001
V							1,00000

Sendo PM a probabilidade de mortalidade; t a idade; d o diâmetro à altura do peito; h a altura; h₁₀₀ a altura dominante; G a área basal; e V o volume.

A análise do desenvolvimento da mortalidade em valores percentuais em relação à idade, nos espaçamentos reduzido (1,5x1,0 m), médio (2,0x2,0 m) e amplo (2,5x3,0 m) mostrou que, nos espaçamentos mais reduzidos, a mortalidade foi elevada e crescente à medida que o povoamento envelhecia. O mesmo fenômeno também ocorreu nos espaçamentos mais amplos, porém a mortalidade de árvores ocorreu em idades mais altas e com taxas mais reduzidas.

Isso indica, mais uma vez, que para conduzir povoamentos de *Pinus taeda* L., sem desbaste, deve-se procurar utilizar, no plantio, espaçamentos adequados, buscando-se obter, no corte final, um maior número de árvores vivas, que se constitui no objetivo final da produção. A mortalidade se processa de forma natural, em decorrência do aumento da competição por elementos essenciais, como luminosidade, água e nutrientes entre as árvores do povoamento.

A mortalidade foi positivamente correlacionada com o crescimento em diâmetro, altura, altura dominante, área basal e volume por hectare, indicando que o aumento destas variáveis origina um aumento proporcional de mortalidade.

Os resultados mostraram ainda que a probabilidade de mortalidade de árvores dessa espécie está diretamente relacionada com a idade, o que indica que, para rotações mais longas, a tendência é de aumento da mortalidade no povoamento. Os mesmos resultados também foram constatados para *Acacia mearnsii* por Sherry (1966) e Schneider et al. (2005).

A modelagem da probabilidade de mortalidade, na população, em função de variáveis dendrométricas selecionadas pela correlação de Pearson, realizada pelo procedimento de regressão *stepwise*, alcançou o modelo máximo no 3º passo de regressão, apresentando significativo valor de F, com alta probabilidade de significância, conforme relacionado na Tabela 12.

Tabela 12 – Estatísticas da modelagem da função de probabilidade de mortalidade

Passo	Variável independente	Parâmetros \hat{B}_j	$S_{yx} \hat{B}_j$	F	Prob. > F
1	h_{100}	-0,2199	0,0148	220,18	<0,0001
	h_{100}	-0,3579	0,0245	211,99	<0,0001
2	d	0,1480	0,0228	42,10	<0,0001
	h_{100}	-0,3096	0,0305	103,5	<0,0001
3	d	0,1894	0,0275	47,47	<0,0001
	1/T	7,2712	2,8583	6,47	0,0012

Sendo h_{100} a altura dominante; d o diâmetro à altura do peito; t a idade; e G a área basal.

Nesta modelagem da Tabela 12, não foi possível considerar outras variáveis ao nível de 0,15 de significância sendo encerrado o processamento conforme proposto por Monserud e Sterba (1980), porém com o intercepto.

A função de probabilidade de mortalidade resultante foi expressa por:

$$PM = \left\{1 + \exp 3,02522 - 0,30964 + 0,1894 \cdot d + 7,27118 \cdot t^{-1}\right\}^{-1} \quad (71)$$

Sendo t a idade, d o diâmetro à altura do peito, h_{100} a altura dominante e PM a probabilidade de mortalidade.

Este modelo obtido apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,81 e um erro padrão da estimativa igual a 0,6380, portanto apresentou um bom ajustamento e baixo erro padrão da estimativa.

A distribuição dos resíduos da função de probabilidade de mortalidade (Figura 6) não apresentou tendência que impossibilitasse o emprego do modelo que apresenta boa precisão e adequação à esta finalidade.

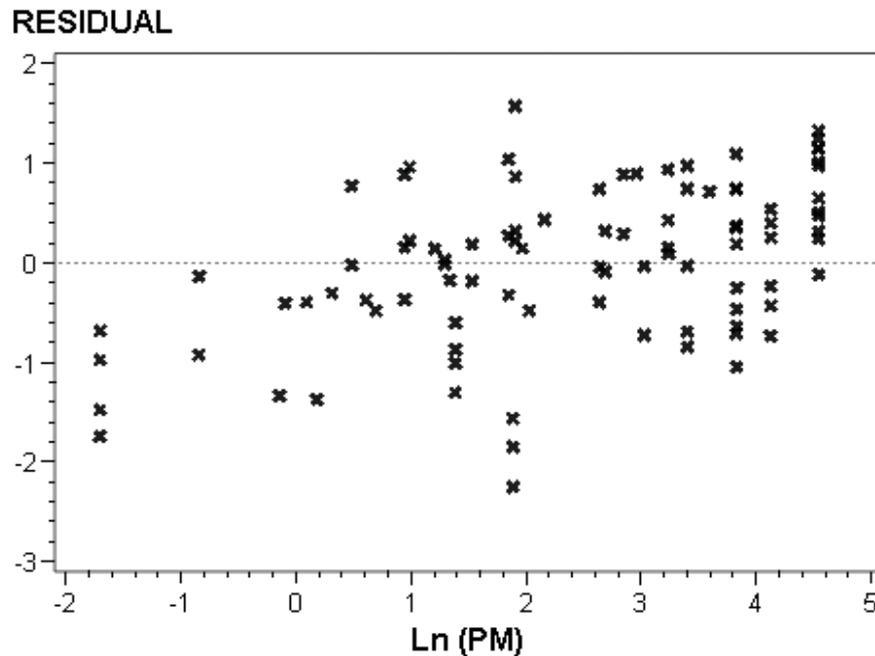


Figura 6 – Distribuição dos resíduos de Probabilidade de Mortalidade (PM).

O ajuste do modelo de probabilidade de mortalidade, selecionado a partir dos dados de cada tratamento de espaçamento inicial (1,5x1,0 m, 1,5x2,0 m, 1,5x3,0 m, 2,0x1,0 m, 2,0x2,0 m, 2,0x3,0 m, 2,5x1,0 m, 2,5x2,0 m e 2,5x3,0 m), forneceu equações específicas para cada espaçamento. Os parâmetros e as estatísticas foram discriminados na Tabela 13, para a equação de probabilidade de mortalidade definida pela equação 71.

Em todos os casos, o modelo apresentou boa precisão estatística, com coeficiente de determinação ajustado superior a 0,86 e coeficiente de variação entre 8,48 e 22,76 %, os quais podem ser considerados adequados frente à característica de heterogeneidade sempre encontrada em dados de mortalidade de povoamentos jovens.

Assim, para estimar a probabilidade de mortalidade em uma determinada idade e em um espaçamento inicial utilizado, foi suficiente conhecer tão somente a idade, altura dominante e o diâmetro.

Tabela 13 – Modelo probabilístico da mortalidade ajustada por tratamento de espaçamento.

Tratamentos (espaçamentos)	Parâmetros				$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	CV%
	b_0	b_1	b_2	b_3			
1,5x1,0	-3,7763	0,0553	-0,0121	59,2964	0,99	0,14	15,54
1,5x2,0	7,2215	-0,34071	0,0175	-1,4964	0,98	0,27	11,33
1,5x3,0	16,6308	-0,3803	-0,2301	-37,6970	0,97	0,26	8,70
2,0x1,0	2,2019	-0,4536	0,3751	11,6694	0,96	0,44	18,65
2,0x2,0	10,1189	-0,4155	0,0115	-12,6381	0,96	0,36	10,93
2,0x3,0	0,2071	-0,3376	0,0561	-2,5628	0,98	0,24	8,48
2,5x1,0	6,3279	-0,3376	0,0561	-2,5628	0,98	0,24	10,60
2,5x2,0	2,7214	-0,0079	-0,0792	5,8755	0,86	0,51	22,76
2,5x3,0	5,7352	-0,1887	0,0232	-3,9335	0,86	0,33	10,46

Sendo $R^2_{Aj.}$ o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; CV o coeficiente de variação em %; F o valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 , b_2 e b_3 os coeficientes.

Como exemplo, na Figura 7, tem-se representadas as estimativas da mortalidade relativa com o desenvolvimento da idade para o espaçamento de 2,5x3,0 m, calculadas pelas equações definidas neste trabalho, considerando o desenvolvimento do diâmetro e da altura dominante do povoamento na idade correspondente.

5.6 Determinação do autodesbaste²

Os cinquenta valores de número de árvores e de diâmetro correspondentes aos espaçamentos de 1,5x1,0 e 2,0x1,0 m entre as idades de 3 a 18 anos estiveram distribuídos entre o valor mínimo de 1.979 e o máximo de 6.042 árvores por hectare, e o diâmetro médio entre o mínimo e máximo de 10,1 e 19,9 cm, respectivamente, como discriminado na Tabela 14.

²Parcialmente desenvolvido no Mestrado por Schneider (2008)

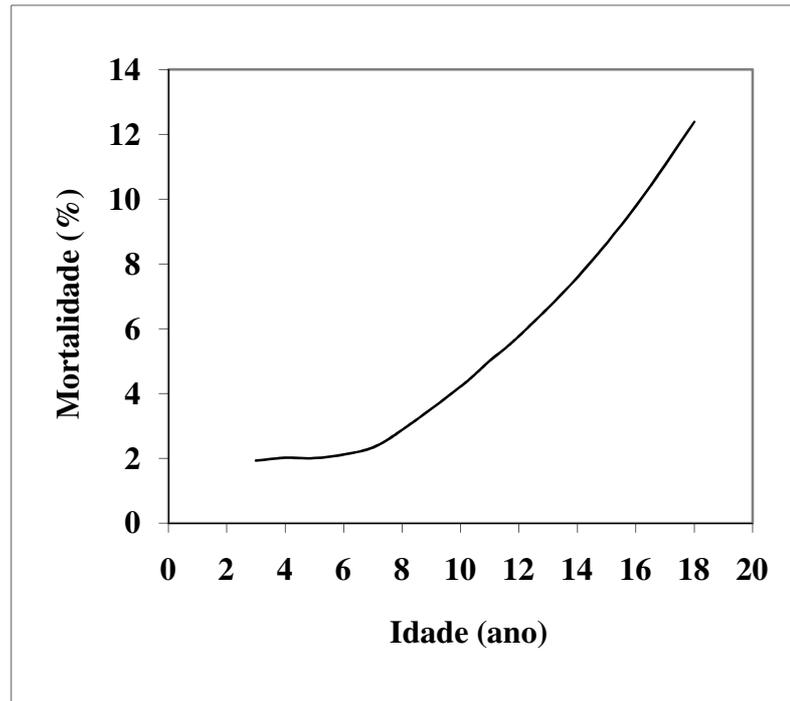


Figura 7 – Mortalidade relativa estimada por idade para povoamento implantado no espaçamento maior que 2,5x3,0 m considerando o desenvolvimento normal do diâmetro e da altura dominante.

Tabela 14 – Caracterização dos dados utilizados no estudo da densidade.

Variável	N	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo
Número de árvores (ha)	50	3.951	1.079	1.979	6.042
Diâmetro (cm)	50	14,2	2,7	10,1	19,9

Os resultados estatísticos do ajuste das equações de Reineke (1933), Yoda et al. (1963), Tang, Meng e Meng (1994) e Zeide (1995), citadas com os números 7, 8, 9, 10, respectivamente, tendo como variável dependente o número de árvores e independente o diâmetro médio, encontram-se relacionados na Tabela 15.

Tabela 15 – Estatísticas dos modelos de densidade e diâmetro ajustados

N. equação	Parâmetros				$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	CV%
	b_0	b_1	b_2	b_3			
7	12,0610	-1,4482			0,8806	0,1006	1,25
8	4,9420	3,7641	3,7641		0,9204	0,0981	1,22
9	20,5401	-0,7775	-0,0018		0,8903	0,0974	1,18
10	1494,5	16,56	1,6523		0,9901	0,0948	1,17

Sendo $R^2_{Aj.}$ o coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} o erro padrão da estimativa; CV o coeficiente de variação em %; F o valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 , b_2 e b_3 os coeficientes.

As estatísticas da Tabela 15 indicaram bom desempenho de todos os modelos testados com coeficiente de determinação superior a 0,88 e coeficiente de variação inferior a 1,25%. Entre os modelos estudados, destacou-se o de autodesbaste proposto por Tang, Meng e Meng (1994), equação 10, que apresentou menor erro padrão da estimativa e coeficiente de variação abaixo de 1,17%, com resíduos bem distribuídos (Figura 8), comprovando a boa precisão estatística obtida, além da baixa tendência e elevada eficiência.

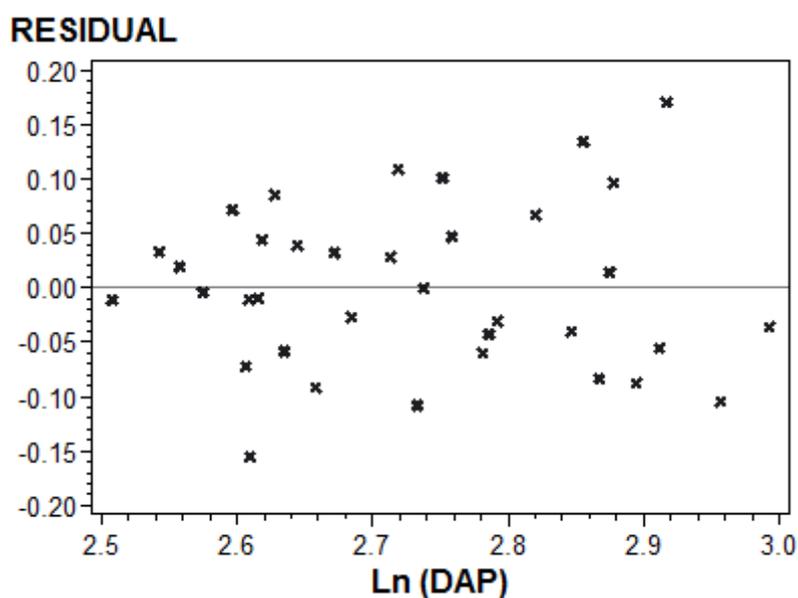


Figura 8 – Dispersão dos resíduos do logaritmo de árvores/ha pelo logaritmo do diâmetro no modelo de Tang, Meng e Meng (1994), na equação 10.

O coeficiente angular do modelo de Reineke (1933), equação 7 da Tabela 15, foi igual a -1,4482, não correspondendo ao inicialmente postulado pelo autor, que estabeleceu para a relação linear entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio quadrático em povoamento sem desbaste o valor constante do coeficiente angular igual a -1,605, para todas as espécies. Também, difere dos valores de -2,33 e -1,54 para *Pinus sylvestris*, citados por Del Rio, Montero e Bravo (2001) para a Espanha, comprovando que o coeficiente angular do modelo de Reineke difere entre espécies e locais, não sendo necessariamente uma constante universal.

Na Tabela 16, são apresentadas as estatísticas da validação e seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio do povoamento. O menor valor ponderado (VP) foi obtido com o modelo de Tang, Meng e Meng, com 6 pontos, indicando que este é o melhor modelo para descrever a densidade de árvores em função do diâmetro médio em povoamentos altamente estocados, portanto sem desbaste.

Tabela 16 – Estatísticas para validação e seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio.

Estatísticas	Modelo de densidade de árvore			
	Reineke (7)	Yoda (8)	Zeide (9)	Tang (10)
Tendência (Bias)	0,0097 (4)	0,0088 (2)	0,0089 (3)	0,0086 (1)
Eficiência (E)	0,8850 (4)	0,8963 (2)	0,8946 (3)	0,8976 (1)
Desvio padrão residual relativo (S%)	4,2282 (2)	4,2282 (2)	4,1453 (1)	4,2282 (2)
Desvio médio relativo (D%)	9,4286 (4)	9,3372 (2)	9,3475 (3)	9,3215 (1)
Qui-quadrado (χ^2)	-0,0004 (2)	-0,0003 (1)	-0,0004 (2)	-0,0003 (1)
Soma dos escores (VP)	(16)	(9)	(12)	(6)

Sendo () a ordem da colocação do modelo dentro do critério estatístico.

O resultado da validação do modelo, que indicou o modelo de Tang, Meng e Meng coincidiu com a seleção feita por meio do coeficiente de determinação, do erro padrão da estimativa e do coeficiente de variação.

5.7 Determinação do autodesbaste por espaçamento³

Os coeficientes e as estatísticas da equação de densidade de árvores pelo diâmetro proposta por Tang, Meng e Meng na equação 10, ajustada individualmente para os espaçamentos de 1,5x1,0 m (1,5 m²), 2,5x1,0 m (2,5 m²), 1,5x2,0 m (3,0 m²), 2,0x2,0 m (4,0 m²), 1,5x3,0 m (4,5 m²), 2,5x2,0 m (5,0 m²), 2,0x3,0 m (6,0 m²) e 2,5x3,0 m (7,5 m²) (Tabela 17), apresentou excelente ajuste e baixo erro padrão da estimativa.

O teste de validação também confirmou esse resultado, com o valor de Bias sempre inferior a 0,0099, e a eficiência superior a 0,99, em todos os espaçamentos.

Tabela 17 – Estatísticas do modelo de densidade e diâmetro de Tang, Meng e Meng, ajustado por espaçamento.

Espaçamento (m)	Parâmetros			R ²	S _{yx}	Bias	E
	S _f	β	γ				
1,5x1,0	1378,3	1,9578	5,4411	0,9998	0,0595	0,0031	0,9997
2,5x1,0	1354,9	1,6886	16,5602	0,9998	0,0549	0,0028	0,9997
1,5x2,0	1213,0	1,7784	14,3297	0,9998	0,0495	0,0017	0,9999
2,0x2,0	1406,8	1,3864	23,3919	0,9999	0,0274	0,0007	0,9999
1,5x3,0	1595,9	1,9100	4,5000	0,9999	0,0558	0,0007	0,9999
2,5x2,0	1352,8	1,2271	59,2456	0,9998	0,0423	0,0016	0,9998
2,0x3,0	1401,0	1,2000	54,7276	0,9999	0,0276	0,0015	0,9998
2,5x3,0	1159,9	1,7000	7,5600	0,9999	0,1014	0,0099	0,9998

Sendo R² o coeficiente de determinação; S_{yx} o erro padrão da estimativa; Bias a tendência; E eficiência; e S_f, β e γ os coeficientes.

As linhas da Figura 9, representando os espaçamentos iniciais, mostram uma tendência de supressão de árvores quando a densidade se aproxima da curva de máxima densidade de árvores, gerada com dados de menor espaçamento (1,5x1,0m).

Essa densidade representa a máxima capacidade de tolerância fisiológica das árvores que se mantêm vivas na população sob as condições do *habitat*. A partir desse ponto, as

³Parcialmente desenvolvido no Mestrado por Schneider (2008)

árvores passam a não suportar mais a concorrência, ocorrendo então a mortalidade, que normalmente incide sobre as árvores mais dominadas, localizados nos estratos inferiores do dossel.

No ponto de declínio repentino da densidade de árvores, ocorreu, em todos os espaçamentos, o processo de autodesbaste na população. Como observado nas curvas da Figura 9, o momento da ocorrência do autodesbaste, representado pela dimensão do diâmetro médio, depende do espaçamento inicial, utilizado na implantação do povoamento.

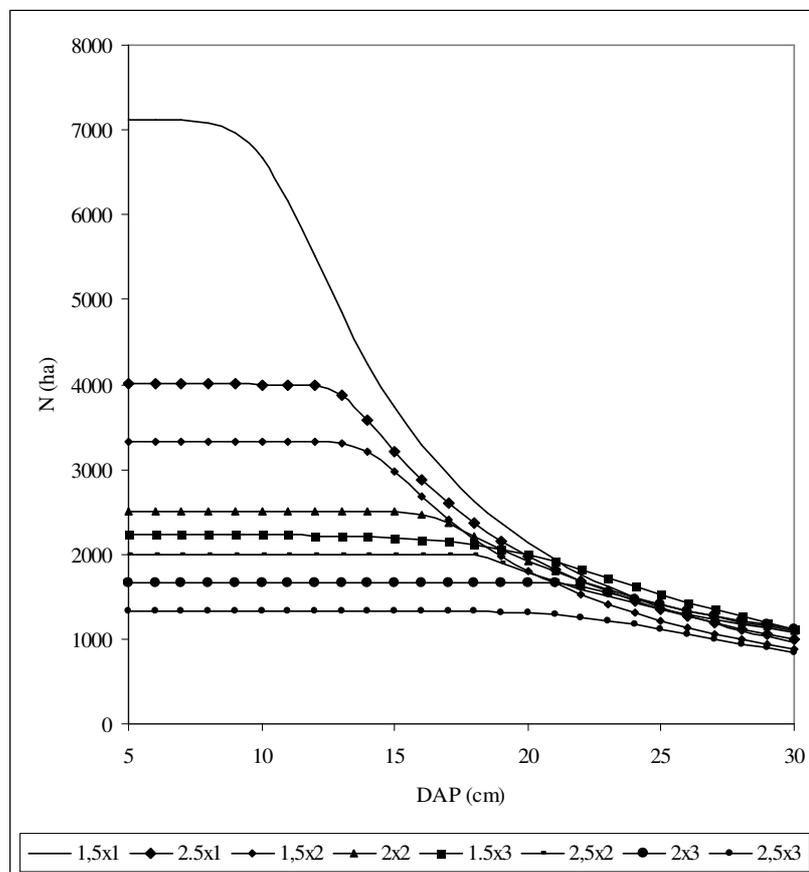


Figura 9 – Tendência da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio em diferentes espaçamentos de implantação do povoamento.

Analisando-se os valores do parâmetro β , na Tabela 17, que reflete para a interpretação da lei do autodesbaste, verifica-se que houve uma grande variação devido ao espaçamento do plantio, sem a manutenção de uma tendência lógica. Esse resultado não confirmou o preconizado inicialmente por Tang, Meng e Meng (1994) sobre a validade do coeficiente angular de $-3/2$ para todas as situações de manejo e tratamento silvicultural,

situação na qual as curvas de densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio não apresentariam variação no padrão de desenvolvimento em todos os espaçamentos. Entretanto deve-se considerar que a diferença encontrada no desenvolvimento das curvas refletiu a variação da mortalidade de árvores frente à competição e que esta nunca ocorre de maneira exatamente regular, mas se estabelece sob influência de vários fatores ambientais, o que pode explicar a variação encontrada no parâmetro β .

Por outro lado, para qualquer densidade estudada, as curvas apresentaram a mesma tendência de desenvolvimento, com decréscimo da densidade ao se aproximar da curva de máxima densidade, calculada para o menor espaçamento e sob influência da competição mais precocemente.

Essa observação foi comprovada ao analisar as curvas geradas com a equação calculada com dados dos espaçamentos mais reduzidos (1,5x1,0 m e 2,5x1,0 m), gerados para cada densidade inicial, alterando o valor inicial (N_1).

Essas curvas de densidades de árvores por hectare apresentaram o mesmo padrão de desenvolvimento em todos os espaçamentos, conforme relacionado na Figura 10.

Conforme as curvas da Figura 10, o autodesbaste ocorreu em uma dimensão de diâmetro médio diretamente proporcional à densidade de árvores de plantio, isto é, quanto maior o espaçamento inicial, maior o diâmetro médio no momento da ocorrência do autodesbaste na população.

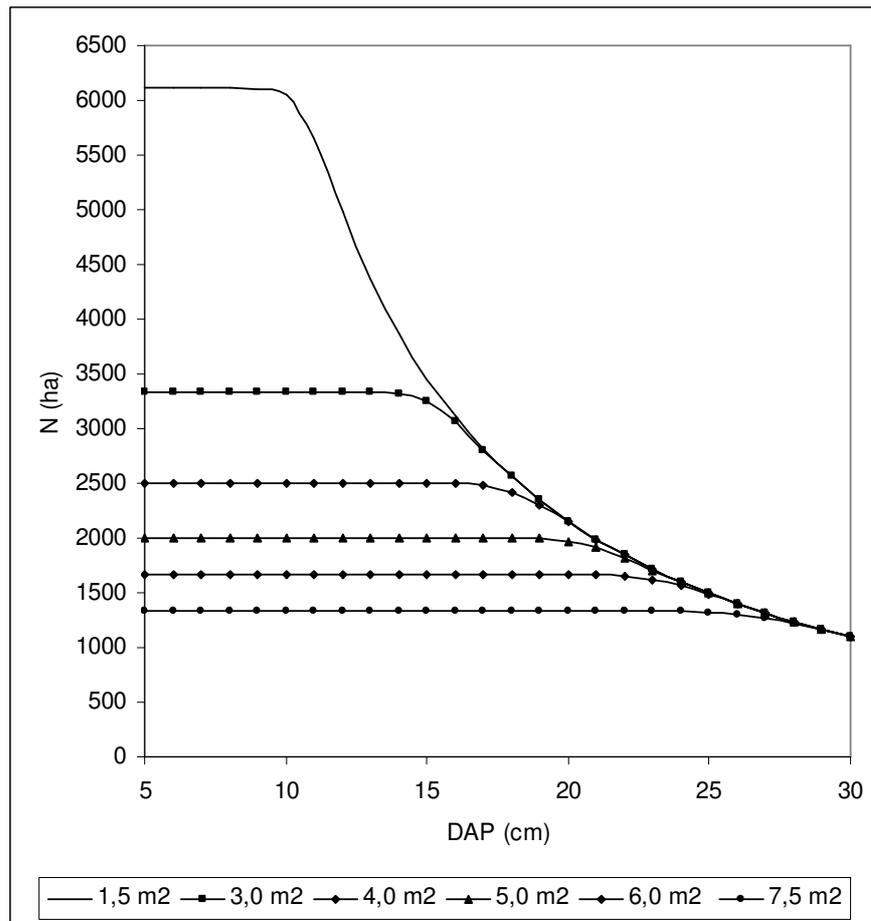


Figura 10 – Tendências médias do autodesbaste definido pela densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio em espaçamentos reduzidos obtidas através do modelo de Tang, Meng e Meng (1994).

5.8 Densidade relativa da população

O modelo de Reineke, transformado por Curtis (1982) para descrever a área basal por hectare em função do diâmetro médio, foi expresso por:

$$G = 2,6594(d^{0,5622}) \quad (13)$$

Essa equação apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,51 e um coeficiente de variação de 2,51%, aliado a uma boa dispersão dos resíduos por diâmetro, como mostra a Figura 11.

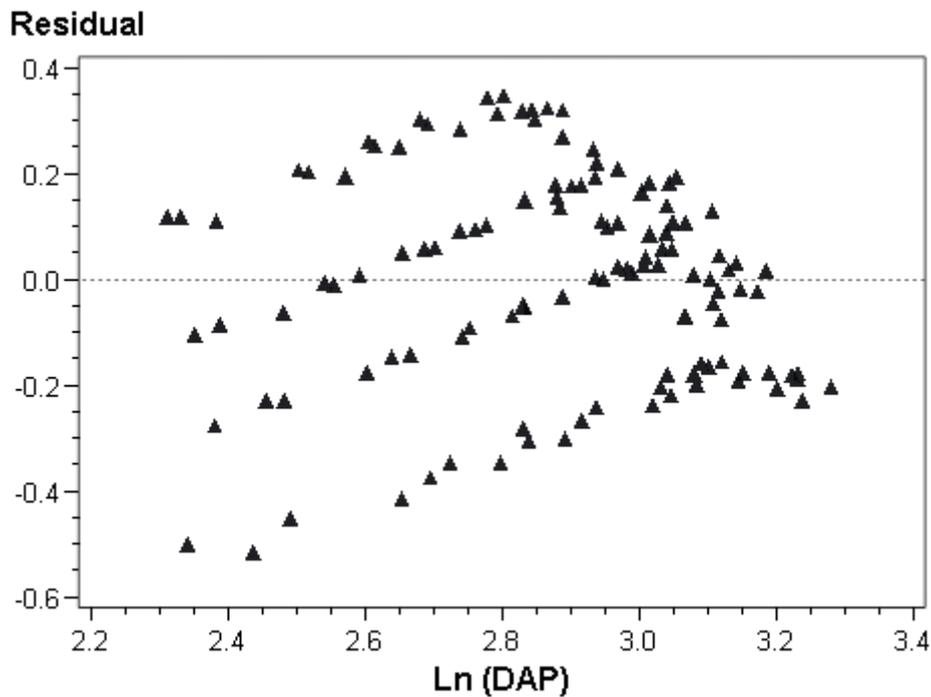


Figura 11 – Dispersão dos resíduos de área basal em função do diâmetro médio.

O parâmetro angular 0,5622 da equação 13, que descreve o gradiente da linha de regressão, ou seja, a velocidade de acréscimo de área basal por hectare com o aumento do diâmetro médio, foi ligeiramente superior ao limite (0,4 a 0,5), estabelecido por Curtis (1982), e usado por outros autores.

A operação da equação forneceu a densidade relativa dos povoamentos pela expressão:

$$DR = G/d^{0,5622} \quad (14)$$

Sendo DR a densidade relativa e d o diâmetro médio da população.

A equação estimou valores decrescentes de densidade relativa (DR) como uma relação do diâmetro médio quando aplicado por Índice de Densidade do Povoamento, apresentando linhas decrescentes proporcionais e levemente curvilíneas (Figura 12). A estratificação, segundo o Índice de Densidade do Povoamento de 600 a 1.400, mostrou o decréscimo da densidade relativa quando do aumento do diâmetro, podendo-se preconizar que se tratava de uma população superestocada, devido à ausência de desbaste.

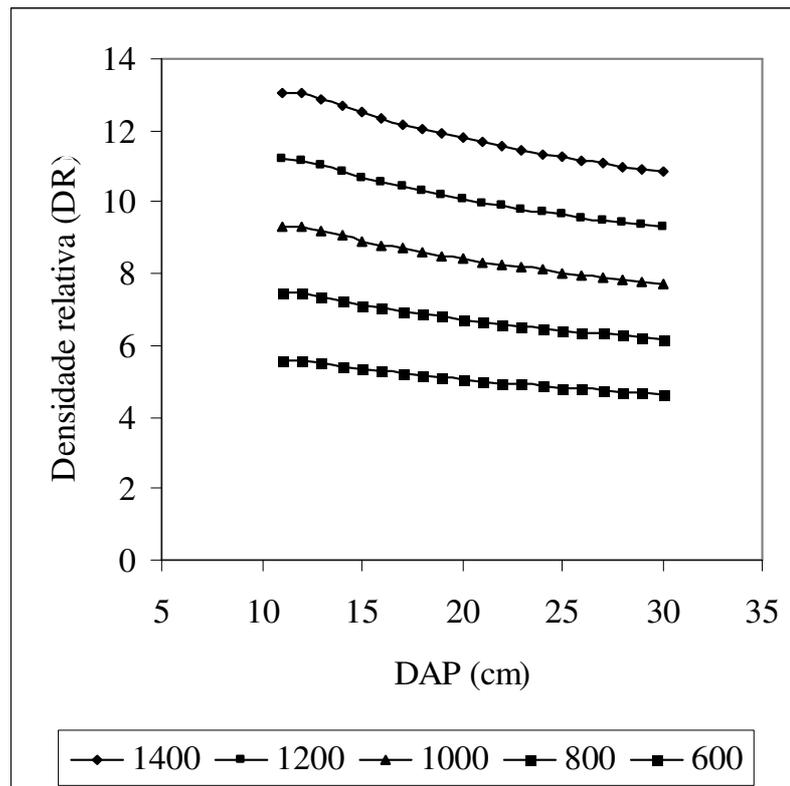


Figura 12 – Tendência da densidade relativa em função do diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.

5.9 Determinação das zonas de concorrência

As zonas de concorrência determinadas algebricamente, seguindo a orientação de Saunders e Puettmann (2000) e Harrington (1997) para *Pinus taeda* L. mostraram, para este estudo, a variação do número de árvores por hectare nas densidades teóricas de manejo e de início da mortalidade do povoamento, respectivamente nas densidades 0,45 e 0,55, em relação à linha de máxima produção (Figura 13).

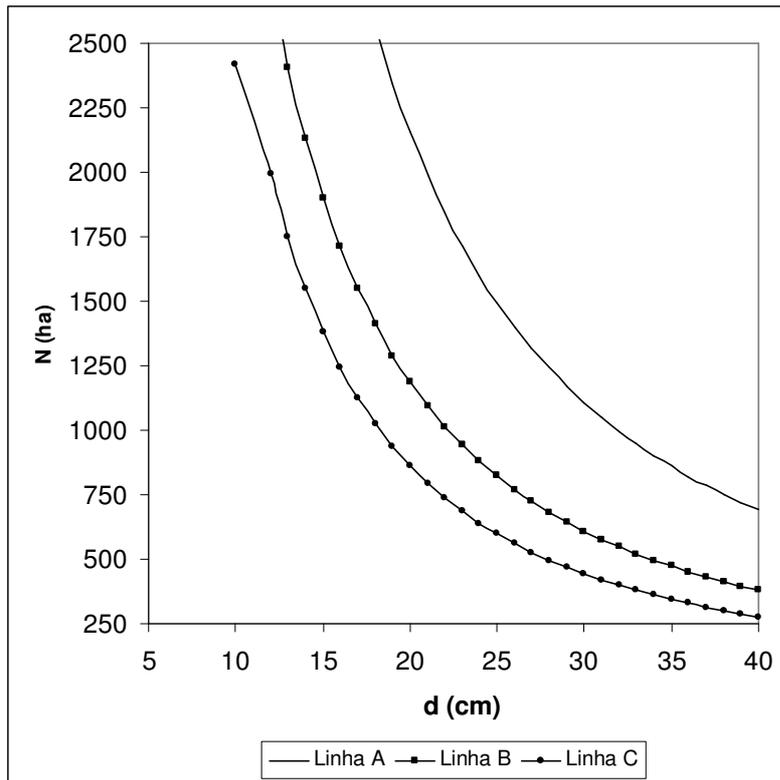


Figura 13 – Limites das fases de concorrência entre indivíduos em densidade de árvores por diâmetro médio, em unidade aritmética: Linha A – máxima densidade por diâmetro, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B – manejo com estoque completo.

As três linhas descritas também estabeleceram zonas de densidade para o manejador. Estas descreveram condições específicas, como as regiões entre as linhas B-A, em que o povoamento se encontrava superestocado, situação indesejada devido à iminente perda de árvores pela mortalidade; e entre as linhas C-B, região em que o estoque do povoamento era completo, portanto havia uma situação desejada e almejada no manejo. Abaixo da linha C, ocorreu uma condição de povoamento subestocado, onde não se conseguiu o máximo aproveitamento do solo.

Essas relações entre as zonas de competição foram comprovadas com o cálculo do incremento corrente anual em diâmetro, entre o 6º e o 7º ano, feito com dados das parcelas permanentes de densidade completa. Esses incrementos, quando relacionados com as densidades relativas (Figura 14), mostraram zonas de competição definidas em 50, 25 e 12,5 % da máxima densidade, assumindo um DR 10 (100%) na linha de máxima densidade populacional. Na Figura 14, fica evidenciado que o máximo incremento corrente anual em

diâmetro ocorreu na zona entre 12,5 e 25% da densidade máxima, resultado condizente com os divulgados por Curtis (1982), Archibald e Bowling (1995), Reid (2004), entre outros.

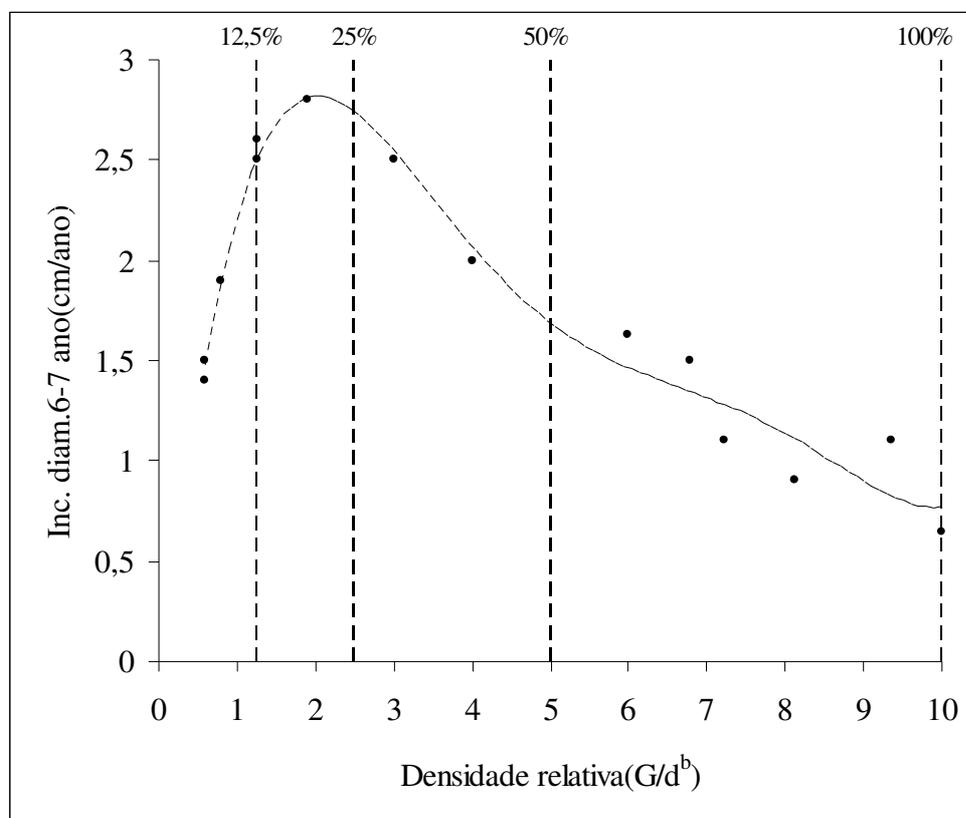


Figura 14 – Incremento corrente anual em diâmetro entre o 6º e o 7º ano para *Pinus taeda* L. em função da densidade relativa, indicando as zonas de competição.

5.10 Relação do diâmetro pela área basal (d:G)

A equação de densidade e diâmetro de Tang, Meng e Meng padronizada para o diâmetro de referência de 25 cm, originou curvas decrescentes da máxima densidade de árvores por hectare (Figura 15). O momento exato da ocorrência do início da mortalidade de árvores, para um valor do diâmetro médio e um determinado número de árvores por hectare (média dos espaçamentos iniciais testados), mostrou que o autodesbaste ocorreu em momentos diferentes e com diâmetros distintos, aumentando em uma relação direta com o espaçamento inicial, conforme mostrado na Figura 15.

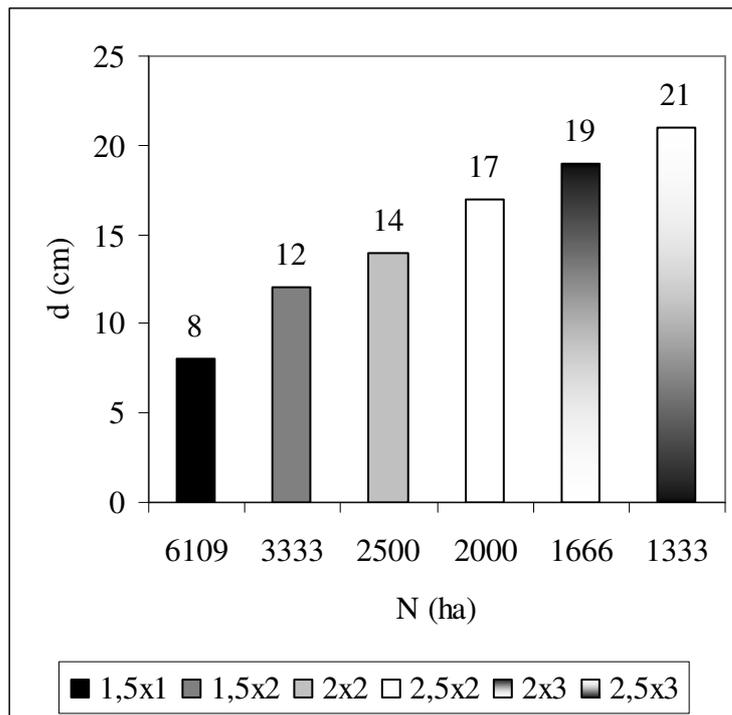


Figura 15 – Diâmetro no momento da ocorrência do autodesbaste em relação ao número de árvores por hectare com referência ao espaçamento inicial.

A análise da Figura 15 permite definir que, em povoamentos implantados em espaçamento de 2,0x2,0 m ou 3,0x2,0 m, por exemplo, o autodesbaste ocorreu no momento em que o diâmetro médio atingiu valores de 14 e 19 cm, respectivamente. A partir desse momento, ocorreu expressiva concorrência e, por conseguinte, mortalidade de árvores, sendo possível inferir que a execução de desbaste deveria ocorrer antes do início da mortalidade natural, evitando perdas de produção de madeira viva.

Nessas condições, no momento de ocorrência do autodesbaste, a relação do quociente do diâmetro médio pela área basal por hectare, representada na Figura 16, mostrou que o quociente variou significativamente com o espaçamento inicial de implantação do povoamento, em que os valores, nos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 3,0x2,0 m, foram iguais a 0,36 e 0,40, respectivamente.

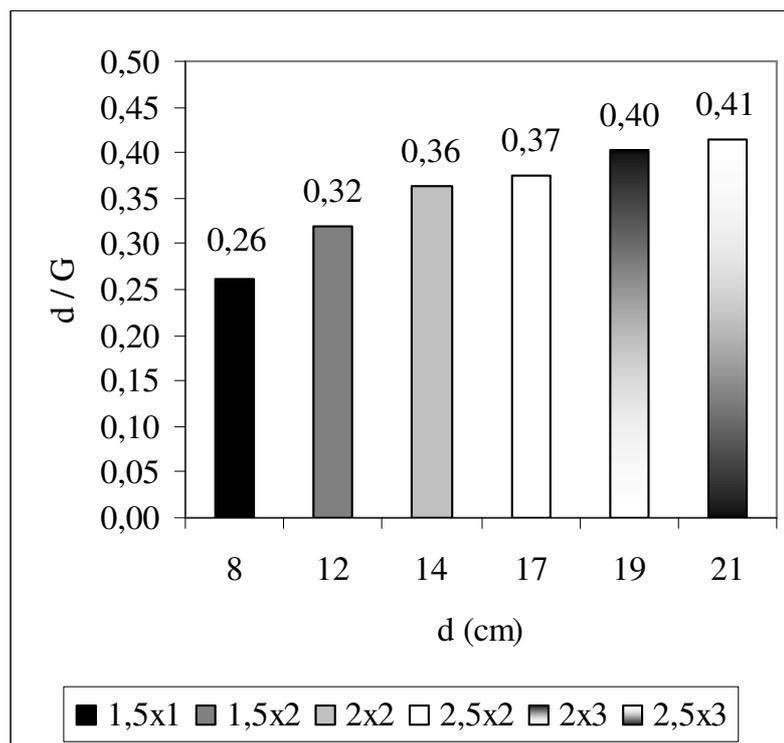


Figura 16 – Relação do diâmetro pela área basal no momento da ocorrência do autodesbaste por espaçamento inicial.

A área basal por hectare, determinada segundo as variações do diâmetro médio em cada espaçamento e segundo os valores do número de árvores estimados no modelo de Tang, Meng e Meng mostrou que o crescimento da área basal dependeu diretamente do diâmetro médio da população, estabelecendo níveis estratificados segundo a densidade de plantio e, assim, uma relação inversa com o espaço vital disponível às árvores (Figura 17). Em todos os espaçamentos utilizados, os valores tenderam a aproximar-se da área basal máxima, acima de 78 m²/ha, mantendo, ainda, uma tendência de incremento ascendente.

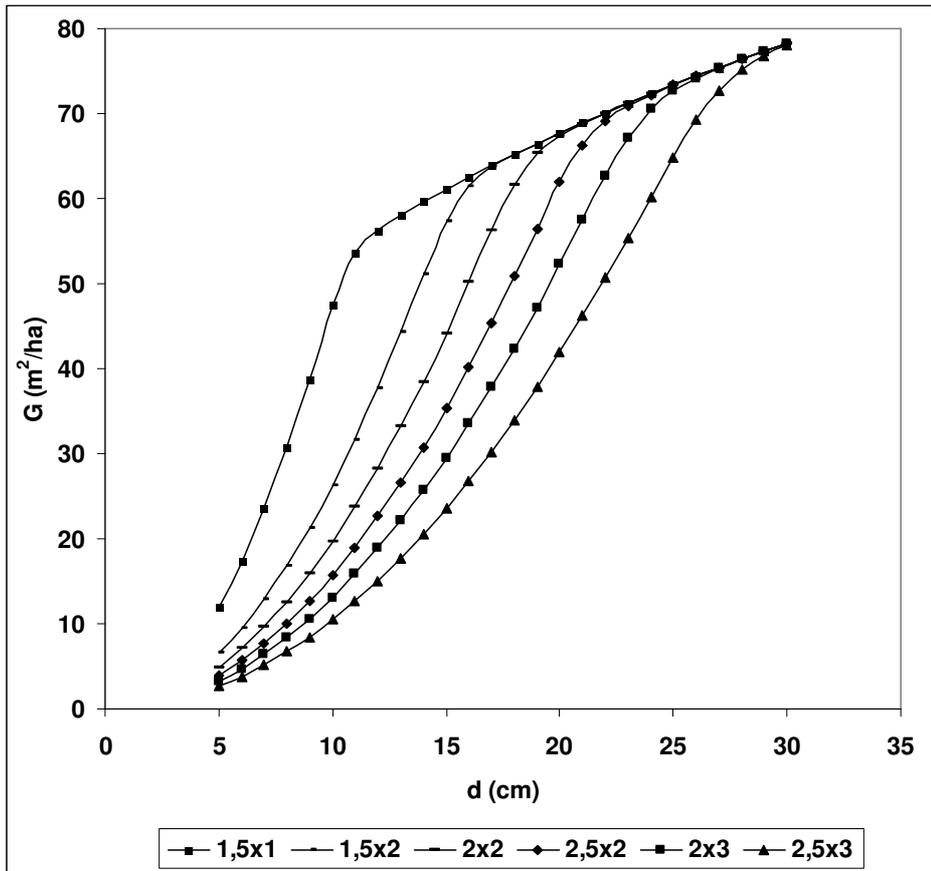


Figura 17 – Desenvolvimento da área basal em relação ao diâmetro por espaçamento inicial.

O desenvolvimento da relação do diâmetro médio pela área basal para todos os espaçamentos testados, em relação à dimensão do diâmetro médio, mostrou grande variação de valores, de 0,3 a 2,0, dos espaçamentos reduzidos aos mais amplos, respectivamente (Figura 18). Esta relação apresentou curvas de forma exponencial negativa, estabelecendo níveis que se estabilizaram próximos a 0,5, aproximadamente, no momento do autodesbaste.

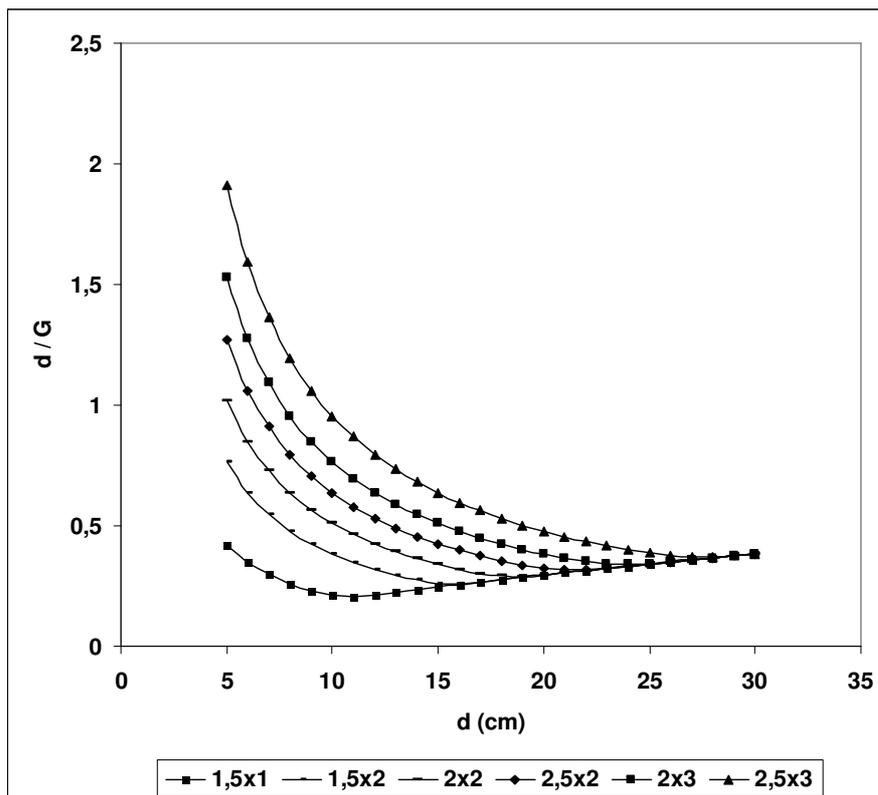


Figura 18 – Relação do diâmetro pela área basal em relação ao diâmetro por espaçamento inicial.

5.11 Índices de Densidade do Povoamento⁴

A densidade máxima de árvores, descrita com a equação ajustada de Tang, Meng e Meng, e padronizada para o diâmetro de 25 cm, definiu os Índices de Densidade do Povoamento gerados a partir do valor máximo de 1.400 até o mínimo de 600, com intervalo de classe de índice de 200. Os valores de densidade apresentados na Tabela 18 e na Figura 19 mostram o decréscimo exponencial das frequências ocorrido com o aumento do diâmetro, descrevendo curvas proporcionais entre si.

⁴Parcialmente desenvolvido no Mestrado por Schneider(2008)

Tabela 18 – Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.

DAP (cm)	Densidade máxima	Índices de Densidade do Povoamento				
		1.400	1.200	1.000	800	600
10	6.042	5.660	4.851	4.043	3.234	2.426
11	5.646	5.289	4.534	3.778	3.022	2.267
12	4.978	4.664	3.997	3.331	2.665	1.999
13	4.373	4.097	3.511	2.926	2.341	1.756
14	3.873	3.628	3.110	2.591	2.073	1.555
15	3.458	3.239	2.777	2.314	1.851	1.388
16	3.110	2.914	2.497	2.081	1.665	1.249
17	2.816	2.638	2.261	1.884	1.507	1.130
18	2.563	2.401	2.058	1.715	1.372	1.029
19	2.346	2.197	1.883	1.569	1.256	942
20	2.156	2.020	1.731	1.443	1.154	866
21	1.990	1.864	1.598	1.332	1.065	799
22	1.844	1.727	1.480	1.234	987	740
23	1.714	1.605	1.376	1.147	917	688
24	1.598	1.497	1.283	1.069	855	642
25	1.494	1.400	1.200	1.000	800	600
26	1.401	1.313	1.125	938	750	563
27	1.317	1.234	1.058	881	705	529
28	1.241	1.162	996	830	664	498
29	1.171	1.097	940	784	627	470
30	1.108	1.038	889	741	593	445

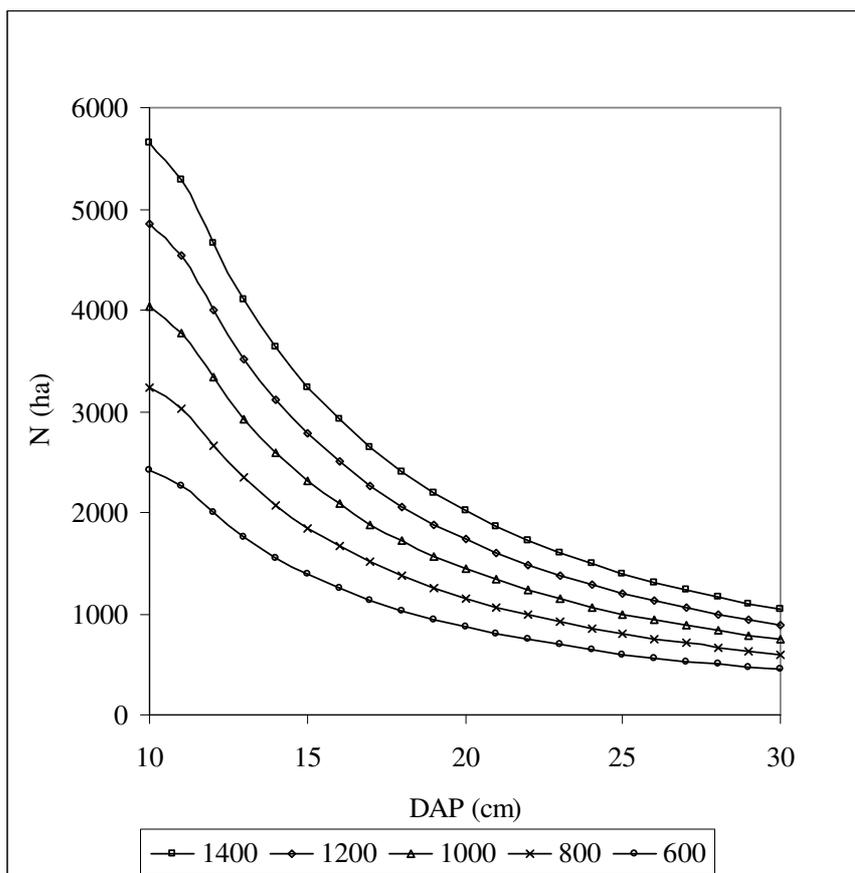


Figura 19 – Índice de Densidade do Povoamento com a representação da densidade de árvores por hectare por diâmetro médio em unidade aritmética.

5.12 Relações do volume da árvore média com a densidade⁵

Entre as equações relacionadas na Tabela 19, que descrevem o volume da árvore média, o modelo 20 apresentou melhor desempenho, com maior coeficiente de determinação (0,9863), menor erro padrão da estimativa (0,1496) e menor coeficiente de variação (4,78 %), indicando boa precisão estatística.

⁵ Parcialmente desenvolvido no Mestrado por Schneider (2008)

Tabela 19 – Parâmetros estatísticos das equações de volume testadas.

N. equação	Parâmetros				$R^2_{Aj.}$	S_{xy}	CV %
	b_0	b_1	b_2	b_3			
15	13,941	-1,9546	0,8266		0,8266	0,2624	-12,1
16	-17,141	0,6091	0,9845		0,9845	0,1914	-5,01
17	5,5041	-1,264	0,9784		0,9784	0,1695	-5,89
18	0,0010	0,000009	0,9883		0,9853	0,1497	4,87
19	-10,236	1,8702	0,9833		0,9833	0,1904	8,87
20	20468,3	-3,6090	0,0375	-1,0639	0,9863	0,1496	4,78

Sendo $R^2_{Aj.}$ o coeficiente de determinação ajustado; S_{xy} o erro padrão da estimativa; CV o coeficiente de variação em %; e b_0 , b_1 , b_2 os b_3 os coeficientes.

A relação hipsométrica calculada para estimar a variável altura, usada na equação 72, apresentou um coeficiente de determinação de 0,89, erro padrão da estimativa de 0,0509, e coeficiente de variação igual a 2,05%, indicando igualmente uma boa precisão. Essa equação corresponde ao modelo de Backmann reduzido, sendo expressa por:

$$\ln(h) = 1,0657 \cdot \ln(d) - 0,0200 \cdot \ln^2(d) \quad (72)$$

Sendo h a altura (m), d o diâmetro (cm) e N o número de árvores por hectare.

Os volumes médios em relação à densidade de árvores por hectare e ao diâmetro médio dopovoamento encontram-se representados na Figura 20, resultante da aplicação dos parâmetros da equação 20 e com altura estimada na equação 72.

As curvas de volumes médios seguiram uma forma hiperbólica, indicando que essa variável diminuiu com o aumento da densidade populacional e confirmando, assim, a mesma relação obtida para o diâmetro. As interpretações das linhas e zonas de concorrência coincidem com o anteriormente analisado para a relação do diâmetro e da densidade de árvores por hectare.

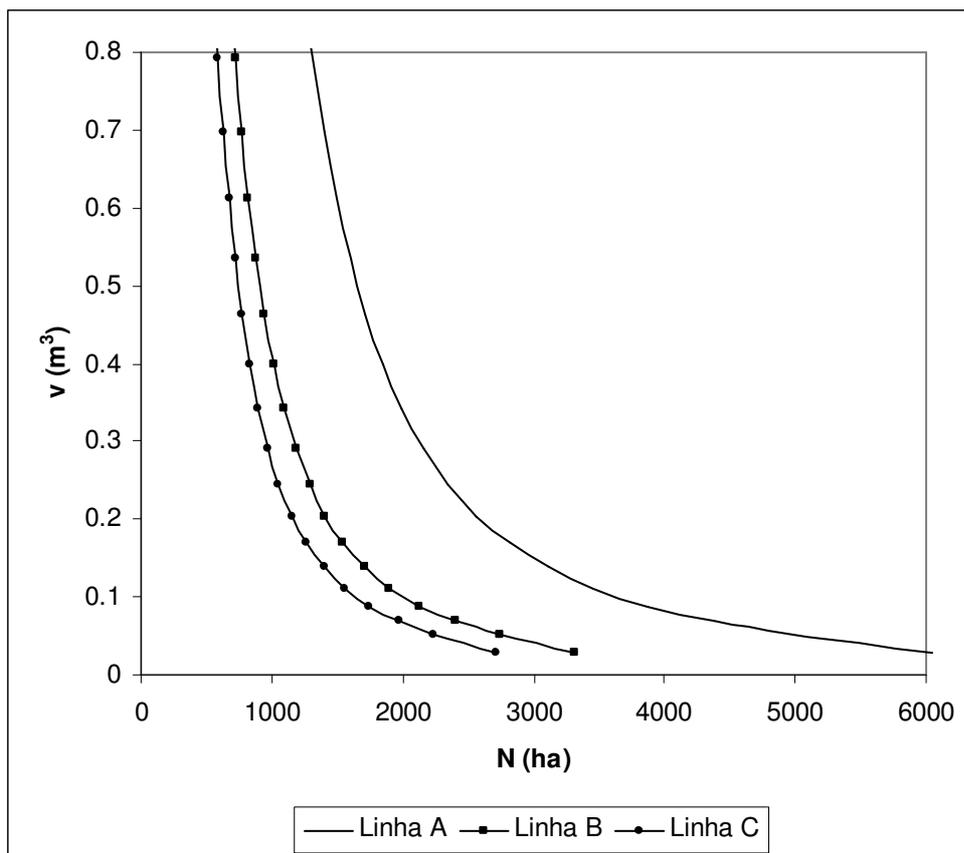


Figura 20 – Volume médio em relação à densidade de árvores por hectare: Linha A – volume máximo por densidade, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B – manejo com estoque completo.

5.12.1 Relação da produção com o Índice de Densidade do Povoamento

A Tabela 20 e Figura 21 resumem as áreas basais calculadas para as densidades de árvores por hectare distribuídas por Índice de Densidade do Povoamento.

Observa-se que as áreas basais distribuem-se paralelamente entre si, com aumento do diâmetro nos Índices de Densidade do Povoamento. Da mesma forma, os volumes por hectare, relacionados na Figura 22, mostram as maiores produções volumétricas por hectare nos maiores Índices de Densidade do Povoamento.

Tabela 20 – Área basal (m^2ha^{-1}) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento				
	1.400	1.200	1.000	800	600
10	44,45	38,10	31,75	25,40	19,05
11	50,26	43,08	35,90	28,72	21,54
12	52,74	45,21	37,67	30,14	22,60
13	54,37	46,61	38,84	31,07	23,30
14	55,85	47,87	39,89	31,91	23,93
15	57,24	49,07	40,89	32,71	24,53
16	58,58	50,21	41,84	33,47	25,11
17	59,87	51,31	42,76	34,21	25,66
18	61,10	52,37	43,64	34,92	26,19
19	62,29	53,40	44,50	35,60	26,70
20	63,45	54,38	45,32	36,26	27,19
21	64,57	55,34	46,12	36,89	27,67
22	65,65	56,27	46,89	37,51	28,14
23	66,70	57,17	47,64	38,11	28,59
24	67,72	58,05	48,37	38,70	29,02
25	68,72	58,90	49,09	39,27	29,45
26	69,69	59,74	49,78	39,82	29,87
27	70,64	60,55	50,46	40,36	30,27
28	71,56	61,34	51,12	40,89	30,67
29	72,47	62,11	51,76	41,41	31,06
30	73,35	62,87	52,39	41,92	31,44

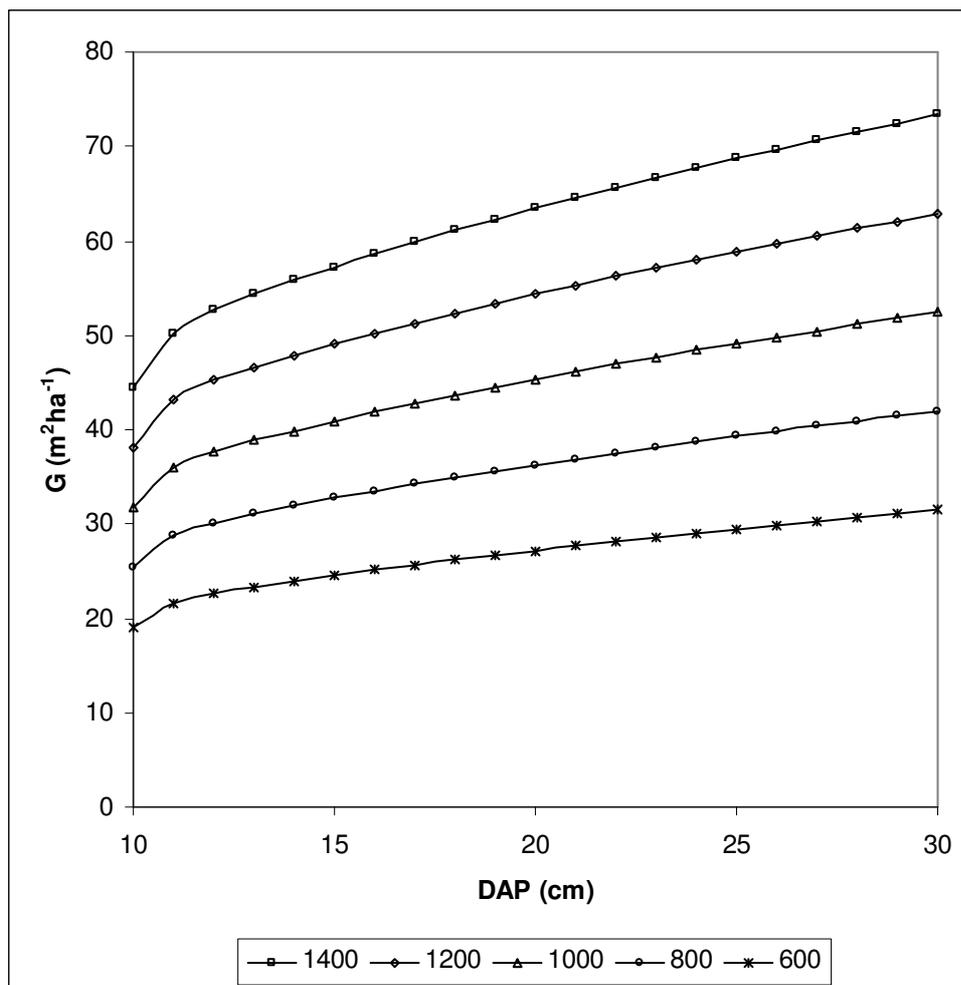


Figura 21 – Área basal por hectare em função do diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.

Os volumes por IDPs apresentaram uma forma hiperbólica, com tendência de afastamento das curvas com o aumento do diâmetro. Essa tendência pode ser considerada normal em povoamentos superestocados, pois se enquadra na estrutura de crescimento de populações equiâneas de *Pinus taeda* L., conforme Tabela 21 e representados na Figura 22.

Tabela 21 – Volume ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.

DAP Médio (cm)	Índice de Densidade do Povoamento				
	1.400	1.200	1.000	800	600
10	163,0	139,7	116,4	93,1	69,9
11	208,6	178,8	149,0	119,2	89,4
12	245,6	210,5	175,4	140,3	105,2
13	281,7	241,4	201,2	161,0	120,7
14	319,5	273,9	228,2	182,6	136,9
15	359,4	308,0	256,7	205,4	154,0
16	401,2	343,9	286,6	229,3	171,9
17	444,9	381,3	317,8	254,2	190,7
18	490,5	420,4	350,3	280,3	210,2
19	537,8	461,0	384,2	307,3	230,5
20	587,0	503,1	419,3	335,4	251,6
21	637,8	546,7	455,6	364,5	273,3
22	690,3	591,7	493,1	394,5	295,9
23	744,5	638,1	531,8	425,4	319,1
24	800,3	685,9	571,6	457,3	343,0
25	857,6	735,1	612,6	490,0	367,5
26	916,5	785,5	654,6	523,7	392,8
27	976,9	837,3	697,8	558,2	418,7
28	1.038,7	890,4	742,0	593,6	445,2
29	1.102,1	944,6	787,2	629,8	472,3
30	1.166,9	1.000,2	833,5	666,8	500,1

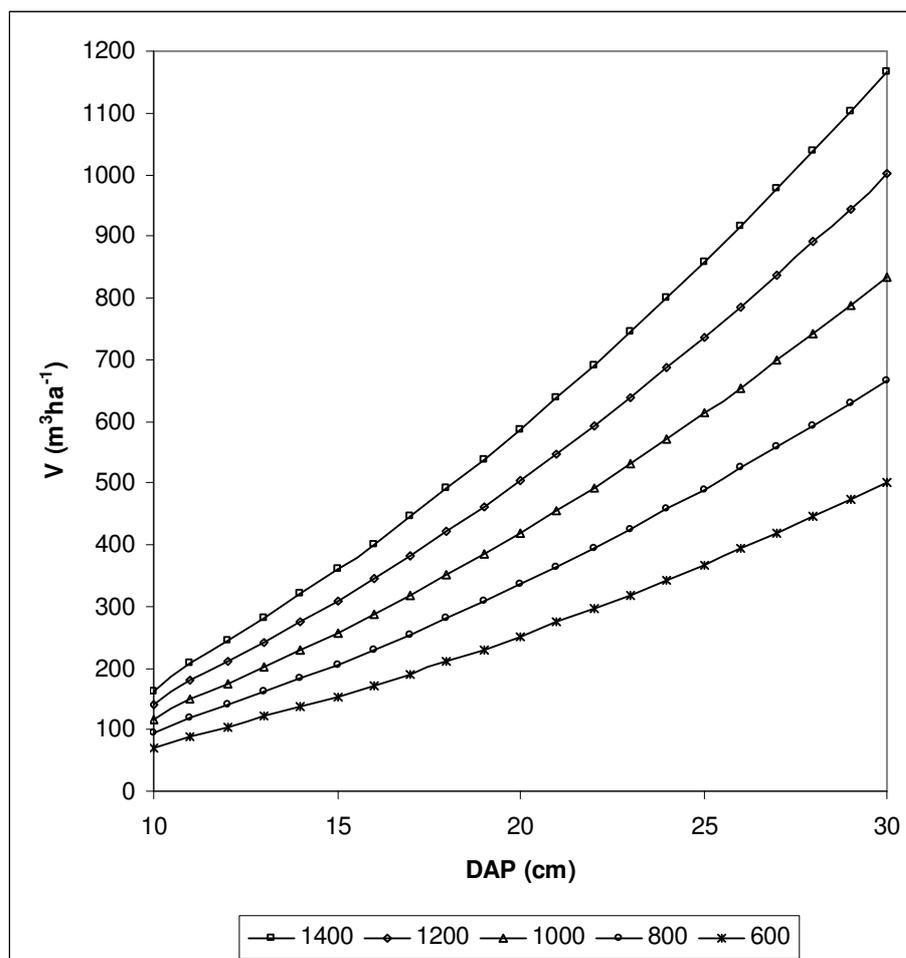


Figura 22 – Volume por hectare em função do diâmetro médio por Índice de Densidade do Povoamento.

5.12.2 Diagramas de Manejo da Densidade - DMD

O Diagrama de Manejo da Densidade (DMD), concebido pelo cruzamento das informações de densidade de árvores, área basal ou volume por hectare, em relação ao diâmetro médio para cada índice de densidade discriminado, permitiu elaborar o diagrama que se encontra na Tabela 20, representado na Figura 23.

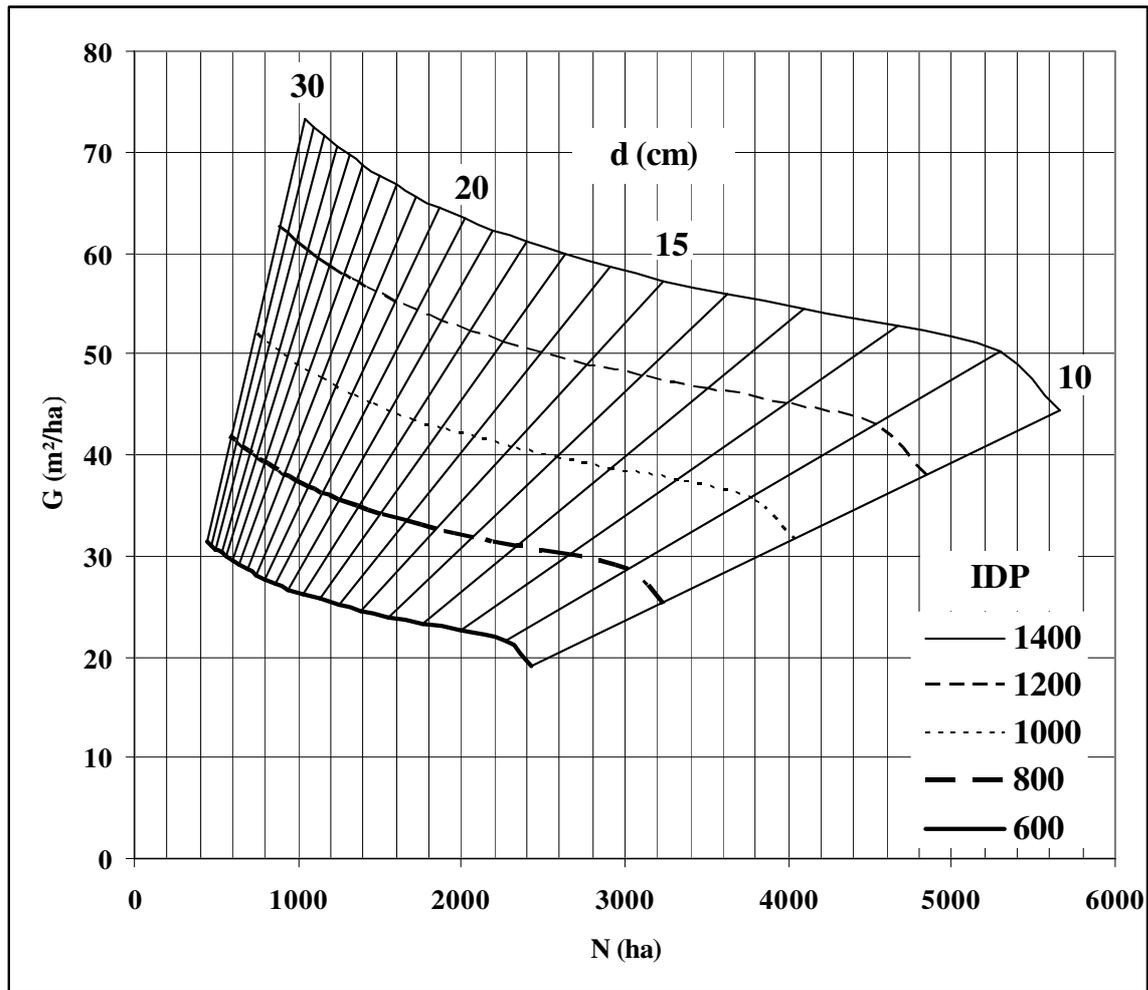


Figura 23 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento considerando a inter-relação da área basal pelo número de árvores e da área basal por hectare com o diâmetro médio.

Da mesma forma, representado na Figura 24, o Diagrama de Manejo da Densidade obtido com a combinação das variáveis dendrométricas número de árvores por hectare, volume por hectare e diâmetro médio, estratificados por IDP na Tabela 21, descreve a variação do volume por hectare para diferentes combinações de diâmetro, frequência e Índice de Densidade da População.

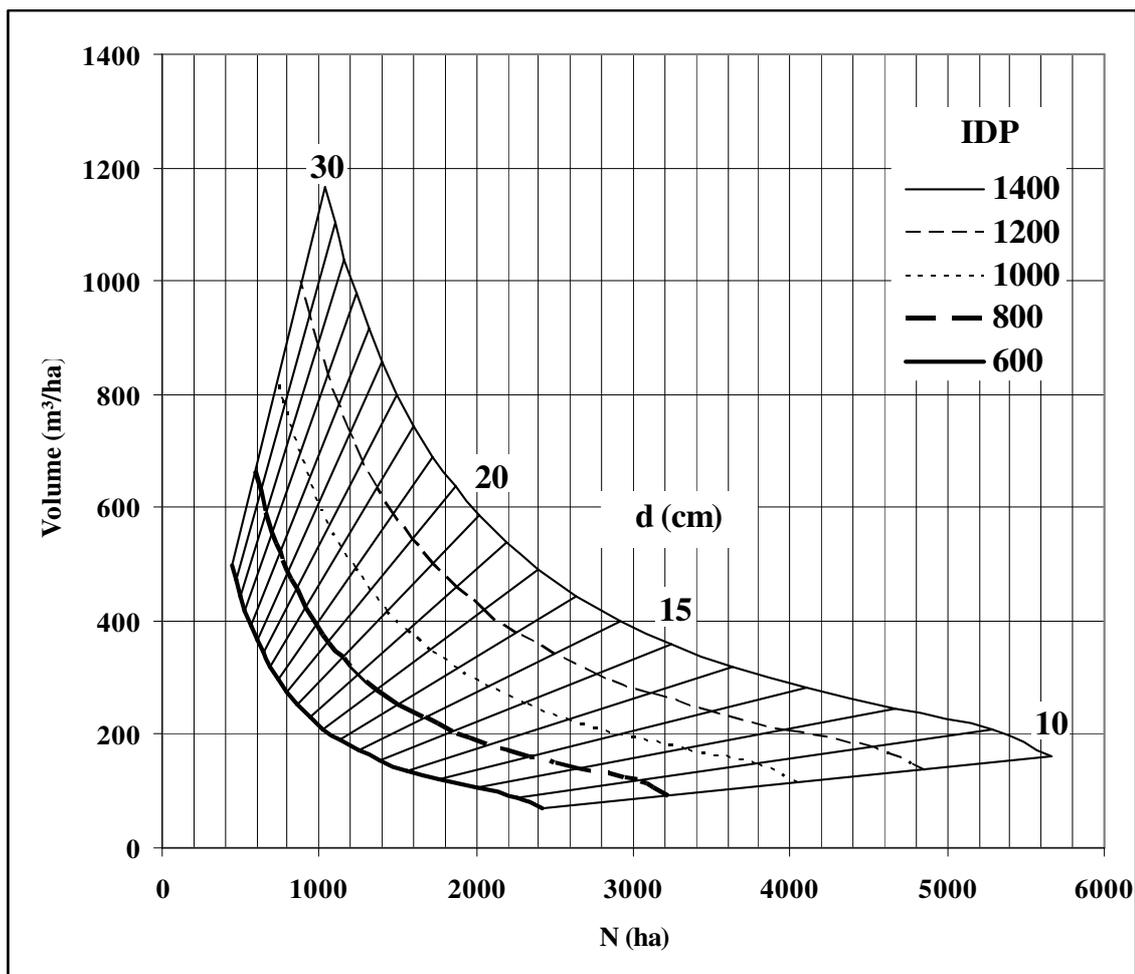


Figura 24 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento, considerando a inter-relação do volume pelo número de árvores por hectare com o diâmetro médio.

Para a utilização prática dos Diagramas de Manejo da Densidade, deve-se, inicialmente, conhecer o número de árvores por hectare e o diâmetro médio da população-alvo. Supondo um povoamento de *Pinus taeda* L. com diâmetro médio de 10 cm e 2.426 árvores por hectare, pode-se determinar o IDP a que pertence; neste caso, um IDP igual a 600 (veja Figura 19). Então, para este povoamento com um IDP igual a 600, tomando os Diagramas de Manejo da Densidade para área basal e volume em hectare, conforme as Figuras 21 e 22, ou as Tabelas 20 e 21, respectivamente, foi possível prognosticar os valores das variáveis definidas pelo número de árvores e pela área basal por hectare para um diâmetro médio específico ao longo do tempo, como representado na Tabela 22.

Tabela 22 – Prognose dos parâmetros dendrométricos de uma população com IDP igual a 600.

DAP (cm)	N (ha)	G (m²ha⁻¹)	V (m³ha⁻¹)
10	2.426	19,05	69,9
15	1.388	24,53	154,0
20	866	27,19	251,6
25	600	29,45	367,5
30	445	31,44	500,1

Sendo N o número de árvores por hectare, G a área basal por hectare e V o volume por hectare.

5.12.3 Validação dos Diagramas de Manejo da Densidade - DMD

Na Tabela 23, encontram-se a análise comparada e as diferenças absolutas e relativas dos volumes por hectare reais e estimados no DMD para um povoamento implantado no espaçamento de 2,0x2,0 m. Para o total, a diferença máxima foi de -7,39 m³ ha⁻¹, representando -1,79 % ao comparar o volume inventariado, tomado no modelo ajustado, com as estimativas dos volumes por hectare. A pequena diferença encontrada em relação ao volume inventariado, em parcelas permanentes, instaladas em povoamentos com espaçamento de 2,0x2,0 m, remediados nas idades de 10, 14 e 18 anos (Tabela 23), confirmou a precisão do modelo de DMD e a sua possibilidade de uso como estimador do volume por hectare de populações florestais em densidade completa.

O valor da Eficiência (E) das estimativas volumétricas por hectare do DMD em relação aos volumes reais foide 0,99, indicando alta precisão, pois este valor aproxima-se da unidade. Para o mesmo fim, χ^2 apresentou o valor de 0,00034, não significativo a 0,01 % de probabilidade, indicando que os volumes reais por hectare não diferiram estatisticamente dos estimados no modelo do DMD, comprovando, também, a sua elevada eficiência.

Tabela 23 – Diferenças absolutas e relativas dos volumes por hectare reais e estimados no Diagrama de Manejo da Densidade (DMD) para um povoamento implantado em espaçamento de 2,0x2,0 m.

Idade (ano)	N. amostra	Povoamento real			DMD	Dif. abs.	Dif. rel.
		D (cm)	N (ha)	V (m ³ ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	(%)
10	1	17,0	2.383	379	401,9	-22,90	-6,04
	2	17,0	2.383	373,6	401,9	-28,30	-7,57
	3	16,1	2.500	355,2	344,2	11,00	3,10
14	1	19,5	2.008	534,8	535,1	-0,30	-0,06
	2	18,8	2.070	507	507,2	-0,20	-0,04
	3	18,9	2.031	473,3	497,3	-24,00	-5,07
18	1	21,2	1.875	653,9	641,5	12,40	1,90
	2	21,0	1.836	616,7	628,2	-11,50	-1,86
	3	21,1	1.719	585,5	588,2	-2,70	-0,46
Média/Erro (%)				497,7	497,7	-7,39	-1,79

Assim, considerando-se esses resultados estatísticos, o modelo do Diagrama de Manejo da Densidade (DMD) pode ser empregado sem restrição e com segurança na estimativa dos volumes por hectare, bem como ser utilizado para prognose da produção em volume, área basal, diâmetro médio e número de árvores, visando estabelecer estratégias de manejo e de planejamento florestal.

5.13 Distribuição de probabilidade de frequência

O estudo da distribuição de probabilidade de frequência de árvores por classe de diâmetro foi realizado em três momentos distintos. Inicialmente, foi efetuado o estudo do desenvolvimento da probabilidade de frequência por classe de diâmetro e por idade, através do ajuste e da análise de precisão dos modelos Normal, Ln-normal, Weibull e Gama. Após, foi efetuada uma análise comparativa das equações de Weibull com dois e três parâmetros. Por fim, foi realizado o estudo da prognose da probabilidade de frequência por classe de

diâmetro através do modelo de Weibull com dois parâmetros, devido à sua flexibilidade, precisão e facilidade de ajuste.

5.13.1 Distribuição de probabilidade de frequência por diâmetro e idade

O estudo da probabilidade de frequência por classe de diâmetro e por idade utilizando os dados oriundos das parcelas permanentes, sem desbaste, medidos nas idades de 6, 8, 12, 14, 16 e 18 anos, nos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m, resultou em 2040 observações, cujos valores médio, mínimo e máximo e desvio padrão foram resumidos na Tabela 24.

Tabela 24 – Valores médio, mínimo e máximo e desvio padrão dos dados mensurados nas parcelas permanentes observadas no tempo, nos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.

Variável	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Idade (ano)	12,3	4,4	6,0	18,0
Diâmetro (cm)	20,4	5,8	7,3	44,8
Altura (m)	14,1	4,8	4,4	23,0
Altura dominante (m)	16,5	5,0	8,3	23,0
Área basal (m ² ha ⁻¹)	55,5	20,7	24,1	86,7
Número de árvores (ha)	1.431	0,17	1.200	1.667
Volume (m ³ ha ⁻¹)	434,4	261,0	72,3	976,0

Os parâmetros dos modelos Normal, Ln-normal, Weibull e Gama de probabilidade de frequência por classe de diâmetro, estratificados por idade, encontram-se discriminados na Tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros das equações de distribuição de frequência para as idades de 6, 8, 12, 14, 16 e 18 anos para dados dos espaçamentos de 2,0x2,0m e 2,5x3,0 m.

Idade (ano)	Nº eq.	Funções	Parâmetros				
			μ	Σ	α	β	C
6	23	Normal	14,3619	2,1535	-	-	
	24	Ln-normal	-	0,1568	-	-	
	25	Weibull	-	15,0101	-	-	7,4083
	26	Gama	-	0,3390	42,3603	-	
8	23	Normal	17,8355	3,0511	-	-	
	24	Ln-normal	-	0,1826	-	2,8653	
	25	Weibull	-	19,0203	-	-	6,5928
	26	Gama	-	0,5607	31,8052	-	
12	23	Normal	21,3122	4,7850	-	-	
	24	Ln-normal	-	0,2353	-	3,0327	
	25	Weibull	-	23,2130	-	-	4,9141
	26	Gama	-	1,1200	19,0285	-	
14	23	Normal	22,6441	5,0041	-	-	
	24	Ln-normal	-	0,2226	-	3,0954	
	25	Weibull	-	24,6600	-	-	4,7705
	26	Gama	-	1,0977	20,6271	-	
16	23	Normal	23,6540	5,5335	-	-	
	24	Ln-normal	-	0,2370	-	3,1359	
	25	Weibull	-	25,8448	-	-	4,4941
	26	Gama	-	1,2912	18,3191	-	
18	23	Normal	23,7943	6,2585	-	-	
	24	Ln-normal	-	0,2745	-	3,1333	
	25	Weibull	-	26,1807	-	-	4,1068
	26	Gama	-	1,7000	13,9962	-	

Sendo μ , σ , α , β , c os parâmetros do modelo.

Na Tabela 26, encontram-se os parâmetros da qualidade do ajuste, expressa pelos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises, Anderson-Darling e Qui-quadrado. Esses testes mostraram que, de forma geral, todos os modelos de probabilidade descreveram bem a distribuição do número de árvores por classe de diâmetro, alternando-se o melhor teste estatístico, de acordo com a idade e método de análise.

A seleção do modelo de probabilidade de frequência por classe de diâmetro determinado pela média dos escores (VP) atribuídos às estatísticas analisadas na tabela 26 mostrou uma inversão da precisão dos modelos no transcurso da idade da população.

Nas idades de 6, 8 e 12 anos, o modelo Normal apresentou o melhor valor ponderado dos escores atribuídos, sendo seguido do modelo de Weibull. O modelo Gama teve melhor desempenho nas idades de 14, 16 e 18 anos, seguido pelos modelos Normal e Weibull.

A distribuição da probabilidade de frequência por classe de diâmetro, ajustada pelos modelos Normal, Ln-normal, Weibull e Gama, representados nas Figuras 25 e 26, como exemplo, para as idades de 6 e 16 anos, respectivamente, para os dados agrupados de povoamentos implantados em espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m, mostraramo deslocamento dos percentis por classe de diâmetro com o envelhecimento da floresta, alterando a assimetria e a curtose das curvas.

Na idade de 6 anos, os percentis das curvas ajustaram-se em menor amplitude diamétrica, apresentando assimetria igual a -0,172 e curtose igual a 0,087, portanto, representando uma distribuição com leve assimetria à direita e com uma curva aproximadamente mesocúrtica. Na idade de 16 anos, ocorreu maior dispersão dos percentis por classe de diâmetro, fazendo com que a curva de distribuição apresente-se de forma mais achatada, mas ainda assimétrica (0,444), com tendência de redução das frequências nas menores classes de diâmetro e com curtose de 0,187.

Os coeficientes de assimetria e a curtose determinados para todas as idades analisadas indicaram o grau de similaridade com a curva de distribuição normal. Sendo a assimetria uma medida da simetria da distribuição, baseada na soma de três desvios padrões, a partir da média, quando a cauda da distribuição está acentuada à esquerda da média, a assimetria é negativa e, quando à direita, passa a ser positiva.

Tabela 26 – Testes estatísticos de aderência das funções de probabilidade de frequência ajustados por idade dos espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.

Idade (ano)	Funções	Testes estatísticos							
		Kolmogorov-Smirnov		Cramer-von Mises		Anderson-Darling		Qui-quadrado	
6	Normal	0,0452 (0,060)	1	0,1068 (0,093)	2	0,6536 (0,093)	1	4,0918 (0,252)	1
	Ln-normal	0,0722 (<0,010)	3	0,3927 (<0,005)	4	2,3169 (<0,005)	4	117,1291 (<0,001)	4
	Weibull	-		0,0762 (0,229)	1	0,7523 (0,049)	2	10,6492 (0,014)	2
	Gama	0,0638 (<0,001)	2	0,2691 (<0,001)	3	1,5824 (<0,001)	3	34,5339 (<0,001)	3
8	Normal	0,0489 (0,026)	1	0,0743 (0,247)	1	0,4805 (0,237)	1	6,7870 (0,148)	1
	Ln-normal	0,0611 (<0,010)	3	0,3918 (<0,005)	4	2,6290 (<0,005)	4	39,9270 (<0,001)	4
	Weibull	-		0,0880 (0,168)	2	0,5807 (0,146)	2	7,3132 (0,120)	2
	Gama	0,0543 (0,009)	2	0,2394 (0,002)	3	1,6212 (<0,001)	3	24,2771 (<0,001)	3
12	Normal	0,0470 (>0,150)	1	0,0452 (>0,250)	1	0,2740 (>0,250)	1	6,3173 (0,503)	1
	Ln-normal	0,0699 (0,024)	3	0,1367 (0,037)	4	0,9199 (0,020)	4	15,5482 (0,030)	4
	Weibull	-		0,0690 (>0,250)	2	0,4506 (>0,250)	2	9,6191 (0,211)	2
	Gama	0,0596 (0,105)	2	0,0770 (0,230)	3	0,5105 (0,199)	3	10,1313 (0,181)	3
14	Normal	0,0539 (0,011)	3	0,1829 (0,009)	3	1,1644 (<0,005)	3	18,0994 (0,012)	3
	Ln-normal	0,0411 (0,140)	2	0,0819 (0,203)	2	0,4882 (0,229)	2	5,6014 (0,587)	4
	Weibull	-		0,3541 (<0,010)	4	2,5058 (<0,010)	4	38,3879 (<0,001)	4
	Gama	0,0400 (0,178)	1	0,0638 (>0,250)	1	0,3772 (>0,250)	1	5,5527 (0,593)	1
16	Normal	0,0465 (0,058)	3	0,1541 (0,022)	3	0,9616 (0,017)	3	28,2444 (<0,001)	3
	Ln-normal	0,0423 (0,118)	2	0,0620 (0,379)	2	0,4143 (0,356)	2	13,4548 (0,097)	2
	Weibull	-		0,3334 (<0,010)	4	2,3353 (<0,010)	4	60,4033 (<0,001)	4
	Gama	0,0286 (>0,500)	1	0,0290 (>0,500)	1	0,1886 (>0,500)	1	10,4867 (0,233)	1
18	Normal	0,0437 (0,080)	2	0,0995 (0,117)	2	0,6447 (0,094)	2	18,6582 (0,045)	1
	Ln-normal	0,0537 (<0,010)	3	0,1779 (0,010)	4	1,1582 (<0,005)	3	35,2763 (<0,001)	4
	Weibull	-		0,1687 (0,012)	3	1,1692 (0,010)	4	25,5760 (0,004)	3
	Gama	0,0365 (>0,250)	1	0,0645 (>0,250)	1	0,4293 (>0,250)	1	20,0619 (0,029)	2

Sendo: () a probabilidade de significância. Os números em negrito representam a ordem de seleção para a estatística e idade considerada.

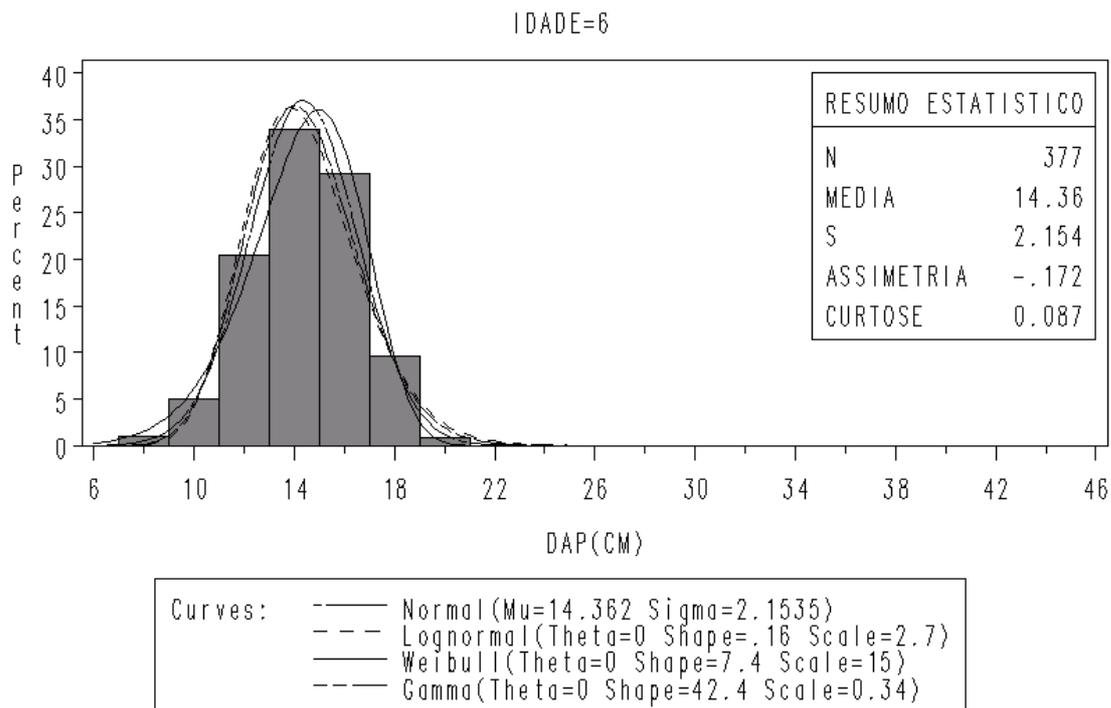


Figura 25 – Distribuição probabilística das frequências por classe de diâmetro aos 6 anos de idade com dados originados de povoamentos implantados em espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.

Por outro lado, a curtose é uma medida que expressa o quanto a distribuição de probabilidade de frequência excede em altura da curva normal de distribuição, sendo determinada no quarto momento. Se a curva for achatada (platicúrtica), a curtose é negativa, e, quando for pontiaguda (leptocúrtica), a curva é positiva.

Dessa forma, os resultados de assimetria e curtose encontrados durante os anos analisados variaram assumindo valores ora positivos, com assimetria à direita e leptocúrtica, ora valores negativos, com assimetria à esquerda e platicúrtica.

De acordo com as estatísticas e curvas analisadas, as quatro distribuições probabilísticas forneceram estimativas acuradas, podendo ser selecionadas para descrever a distribuição de frequência por classe de diâmetro. A seleção do modelo foi, entretanto, realizada por critério pessoal, recaindo sobre o modelo de Weibull em decorrência da flexibilidade, facilidade de ajuste e acurácia.

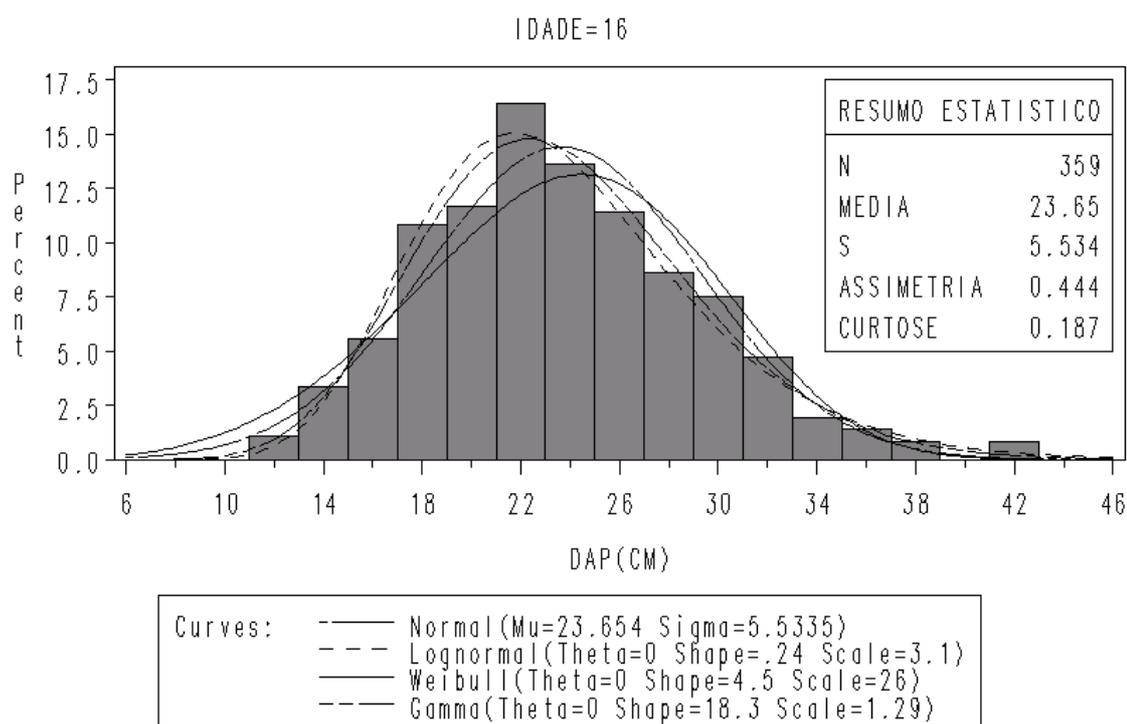


Figura 26 – Distribuição probabilística das frequências por classe de diâmetro aos 16 anos de idade com dados originados de povoamentos implantados em espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.

5.13.2 Comparação da função de Weibull com dois e três parâmetros

Na Tabela 27, encontram-se os parâmetros estatísticos das funções de Weibull com dois e três parâmetros, ajustadas para dados agrupados de parcelas em espaçamentos de 2,0x2,0 m e 2,5x3,0 m, as quais mostraram-se igualmente precisas para descrever a distribuição de frequência por classe de diâmetro. O valor do desvio padrão do modelo com dois e três parâmetros foi igual, respectivamente, a 6,21 e 5,89. A diferença foi muito pequena para justificar a seleção da função com três parâmetros, considerando o aumento da complexidade em relação à de dois parâmetros. Devido a isso, deu-se preferência pelo uso da função de Weibull com dois parâmetros para os estudos da probabilidade de frequência por classe de diâmetro.

Tabela 27 – Parâmetros estatísticos da função de Weibull com dois e três parâmetros.

Parâmetros/Símbolos		2 parâmetros	3 parâmetros
Parâmetro	Símbolo	Estimador	Estimador
Princípio	Theta	-	7,223693
Escala	Sigma	22,68455	14,98543
Forma	C	3,660249	2,401634
Média	μ	20,45963	20,50818
Desvio padrão	S	6,218752	5,892544

As estatísticas de Cramer-von Mises, Anderson-Darling e Qui-quadrado mostraram a significância da função de Weibull de dois e três parâmetros, confirmando sua eficiência, porém com valores um pouco menores no modelo com três coeficientes, conforme Tabela 28.

Tabela 28 – Estatísticas da função de Weibull com dois e três parâmetros

Teste estatístico		Weibull 2parâmetros		Weibull 3parâmetros	
		Estimador	Prob.	Estimador	Prob.
Kolmogorov-Smirnov	D	-	-	0,0395110	0,004
Cramer-von Mises	W-Sq	2,685016	<0,010	0,6798588	0,016
Anderson-Darling	A-Sq	18,244319	<0,010	4,5659528	0,005
Chi-Square	Chi-Sq	239,062893	<0,001	57,6945324	<0,001

Sendo(-) um valor não calculado para o método e Prob. a probabilidade.

A análise dos valores dos percentis estimados pelas duas funções de Weibull (Tabela 29) evidencia somente pequenas diferenças, ora subestimado, ora superestimando os percentis, como pode ser melhor visualizado na Figura 27.

Tabela 29 – Percentis da função na distribuição de Weibull com dois e três parâmetros.

Percentis	Observado	Weibull 2 parâmetros	Weibull 3 parâmetros
1,0	10,5045	6,45528	9,43074
5,0	12,3349	10,07654	11,57440
10,0	13,6082	12,26649	13,09492
25,0	15,9160	16,13995	16,14379
50,0	19,7358	20,52309	20,08815
75,0	24,1923	24,80195	24,39231
90,0	28,6487	28,48980	28,43120
95,0	31,5136	30,61352	30,88708
99,0	35,9701	34,42964	34,2612

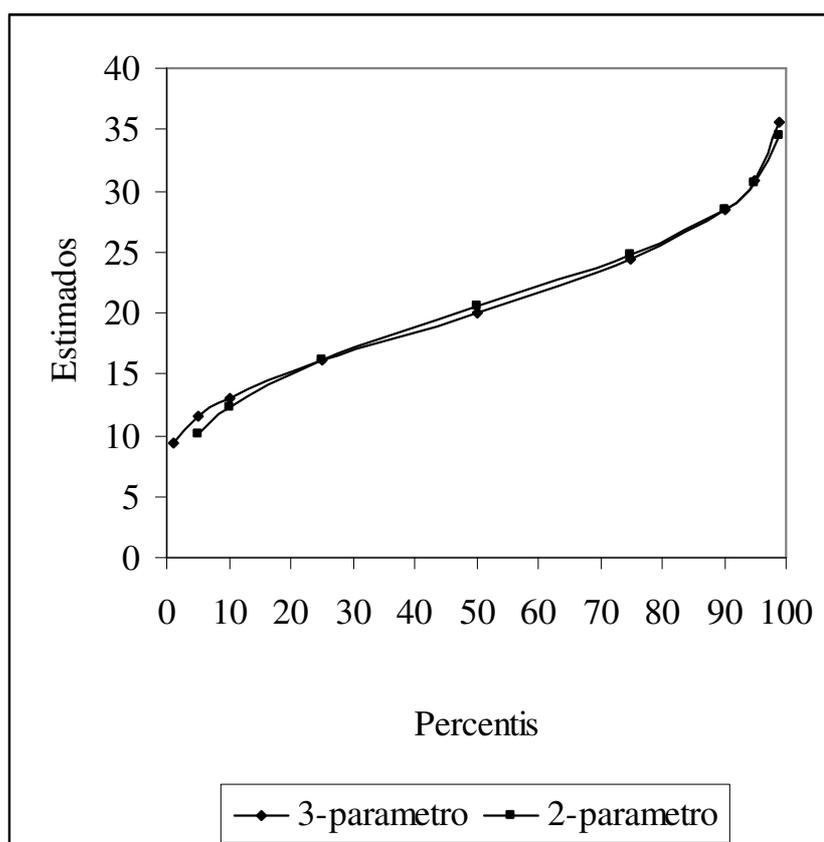


Figura 27 – Distribuição dos percentis da função de Weibull com dois e três parâmetros.

5.13.3 Prognose da probabilidade de frequência por classe diamétrica

Os parâmetros b e c da função de Weibull, equação 31, estimados como função de variáveis dendrométricas, resultaram nas equações 34 e 35, respectivamente.

$$b = \exp[1,3798 + 0,0684 \cdot \ln(G) - 0,0305 \cdot \ln(h_{100}) + 0,5612(1/t)] \quad (34)$$

$$c = \exp[2,3991 + 0,1037 \cdot \ln(G) - 0,1018 \cdot \ln(h_{100}) - 0,4316(1/t)] \quad (35)$$

Sendo b e c os parâmetros da função de Weibull, G a área basal por hectare, t a idade, h_{100} a altura dominante e x o centro de classe de diâmetro.

Na Tabela 30, encontram-se o erro padrão e os limites de confiança dos parâmetros estimados, indicando a adequação estatística das equações. O erro padrão da estimativa do modelo de Weibull, ajustado por estas regressões aninhadas, foi muito baixo, igual a 1,6951, indicando adequação e alta precisão.

Tabela 30 – Estatísticas das equações de determinação dos parâmetros (b_i , c_i) da equação de Weibull.

Parâmetros	Estimadores	Erro padrão	Limites de confiança (95%)	
			LI	LS
b_{21}	1,3798	0,4132	0,5696	2,1901
b_{22}	0,0684	0,1327	-0,1918	0,3286
b_{23}	-0,0305	0,4781	-0,9681	0,9071
b_{24}	0,5612	0,3736	-0,1716	1,2939
c_{21}	2,3991	1,5714	-0,6827	5,4809
c_{22}	0,1077	0,4733	-0,8206	1,0359
c_{23}	-0,1018	1,8041	-3,6399	3,4363
c_{24}	-0,4316	1,4410	-3,2577	2,3944

Sendo b_{21} , b_{22} ... c_{24} os parâmetros das equações dos coeficientes da função de Weibull, LI o limite inferior e LS o limite superior.

A utilização da função de Weibull e das regressões aninhadas resultou nas distribuições de frequência por classe diamétrica para os estágios de desenvolvimento real de um povoamento, nas idades de 10, 15 e 20 anos, representados na Figura 28.

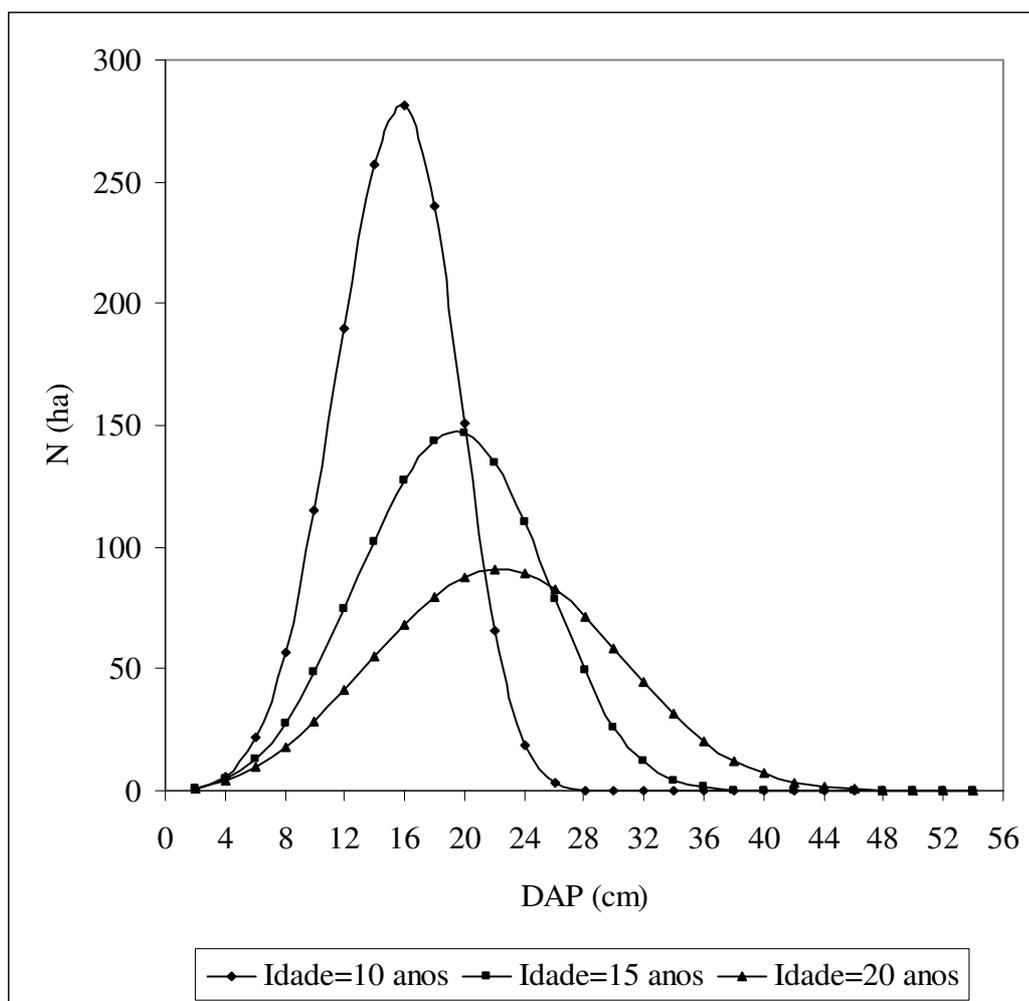


Figura 28 – Prognose da distribuição de frequência por classe de diâmetro com os parâmetros da equação de Weibull estimados por regressão aninhada.

Neste caso específico, a primeira curva de distribuição de frequência por classe diamétrica representa, em povoamentos com idade de 10 anos, densidade de 1400 árvores/ha, área basal de $25 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ e altura dominante de 12 m. A segunda distribuição de frequência por classe diamétrica, em posição intermediária, representa o povoamento na idade de 15 anos, com 1100 árvores/ha, área basal de $35 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ e altura dominante de 20 m. A terceira

distribuição de frequência por classe diamétrica, por sua vez, representa a população com 20 anos, com densidade de 900 árvores/ha, área basal de 45 m² ha⁻¹ e altura dominante de 28 m.

A análise das curvas dessas três condições temporais mostrou uma movimentação das frequências no tempo quando da variação simultânea das variáveis independentes densidade, altura dominante e idade.

A variação nas frequências, nas classes de diâmetro, decorre do crescimento das árvores da população e da mortalidade natural, em função do autodesbaste e desbaste da população. Esses fatores determinaram a mudança na forma das curvas de distribuição de frequência, acentuando a amplitude diamétrica, com uma curtose negativa e assimetria positiva.

Esses resultados mostraram que, para efeitos de prognose da distribuição de frequência por classe de diâmetro de *Pinus taeda* L., o método proposto por Cao (2004) apresentou boa acurácia, com ótima perspectiva de utilização prática para modelagem da produção volumétrica por classe de diâmetro e determinação dos sortimentos de madeira no tempo e por classe de sítio. Essas mesmas conclusões foram constatadas por Carelli Neto (2008) para a mesma finalidade e espécie.

5.14 Forma de tronco e sortimentos

5.14.1 Seleção da equação de forma de tronco

Na Tabela 31, encontram-se os resultados dos parâmetros estatísticos das equações de forma de tronco ajustadas para os dados agrupados dos espaçamentos de 3,0x2,0 m e 2,5x3,0 m, conforme funções de forma de tronco relacionadas na Tabela 2.

As estatísticas de ajuste e precisão mostraram coeficiente de determinação superior a 0,91, e coeficiente de variação entre 5,08 e -33,97, do melhor ao pior modelo.

A seleção da melhor equação de forma, baseada no Valor Ponderado (VP) dos escores, indicou o polinômio de 5º grau, expresso pela equação 46, como o melhor, com 10 pontos, sendo seguido da equação 45, com 13 pontos, como pode ser observado na Tabela 32.

Tabela 31 – Estatísticas das equações de forma de tronco ajustado para o conjunto de árvores dos espaçamentos de 3,0x2,0 m e 2,5x3,0 m.

N° eq.	Coeficientes						R ² _{Aj.}	S _{yx}	CV%	Bias	E
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅					
40	1,2162	-1,7318	0,6041	-	-	-	0,9101	0,8071	11,43	2,7E-07	-0,52
41	0,0845	0,6177	-	-	-	-	0,9204	0,0607	-33,97	5,8E-07	-0,46
42	1,2729	-1,2415	-0,0576	-	-	-	0,9203	0,0833	11,44	9,2E-08	-0,92
43	1,1047	-0,7404	-	-	-	-	0,9107	0,0507	5,92	6,8E-08	-0,68
44	0,0786	0,5808	-0,0328	-	-	-	0,9206	0,0606	-33,89	1,6E-06	-0,46
45	1,1236	-1,3907	2,4588	-2,48456	-	-	0,9346	0,0446	5,22	-1,8E07	0,94
46	1,1414	-2,4233	11,4460	-30,8921	37,4272	-17,4494	0,9835	0,0435	5,08	9,1E-08	0,91
47	-	0,1035	0,9972	-0,6690	0,6181	-	0,9757	0,0857	11,24	0,11	0,94
48	-	2,0153	0,1832	1,0015	0,0285	-	0,9365	0,0765	10,04	-7,5E-08	0,93
49	-	1,1898	0,3116	-	-	-	0,9789	0,0789	10,35	-0,0017	0,92

Sendo R²_{Aj.} o coeficiente de determinação ajustado, S_{yx} o erro padrão da estimativa, CV o coeficiente de variação em percentagem, Bias a tendência e E a eficiência.

Os valores residuais, apresentados na Figura 29, não apresentaram tendências e tiveram dispersão compatível com a variável dependente. Observa-se uma distribuição diferenciada dos resíduos quando a relação de d_i/d é igual e superior a 1,0. Essa tendência é frequente nos estudos de forma, pois, nessa região do tronco, os d_i são maiores que o DAP e recebem influência do sistema radicular próximo ao solo.

Essa equação polinomial do 5º grau de forma de tronco relativa apresentou uma excelente precisão estatística, com um coeficiente de determinação ajustado de 0,9835, erro padrão da estimativa de 0,0435 e coeficiente de variação baixo de 5,08% dos valores estimados em relação à média.

Tabela 32 – Valor dos escores dos parâmetros estatísticos das equações da forma de tronco.

Nº eq.	R ² _{Aj.}	S _{yx}	CV %	Bias	E	VP
40	5	10	7	6	6	34
41	4	5	10	7	7	33
42	4	8	8	4	3	27
43	5	3	3	1	5	17
44	4	4	9	8	7	32
45	3	2	2	5	1	13
46	1	1	1	3	4	10
47	2	9	6	10	1	28
48	3	6	4	2	2	17
49	2	7	5	9	3	26

Sendo VP o valor dos escores dos parâmetros estatísticos.

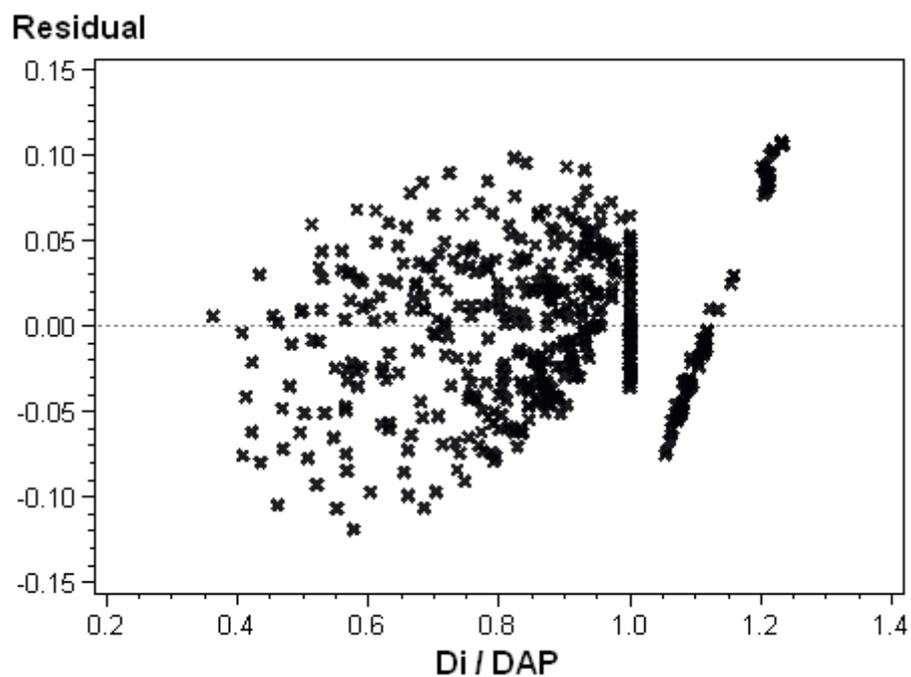


Figura 29 – Distribuição dos resíduos de forma de tronco do polinômio do 5º grau para os dados agrupados dos espaçamentos de 3,0x2,0 m e 3,0x2,5 m.

Uma análise de covariância aplicada às equações dos dois espaçamentos de 3,0 x 2,0 m e 2,5x3,0 m utilizando uma variável dummy para a classificação dos espaçamentos mostrou existir diferença entre as duas equações. Para fins de simplificação de análise, a covariância foi avaliada com o modelo polinomial do 3º grau, tendo como variável dependente d_i/d e independente h_i/h e as covariáveis idade, espaçamento e interação da idade com h_i/h . Ao espaçamento foi atribuída uma variável dummy, tendo assumido valor 1 (presença) no espaçamento de 3,0x2,0 m e 0 (ausência) no de 2,5x3,0 m, conforme a Tabela 33.

Tabela 33 – Análise de covariância entre os espaçamentos de 3,0x2,0 m e 2,5x3,0 m para a soma dos quadrados do Tipo I.

F. V.	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	27	15,7443	0,5831	295,2	<0,0001
(h_i/h)	1	15,3642	15,3642	17,09	<0,0001
(h_i/h) ²	1	0,3990	0,3990	207,34	<0,0001
(h_i/h) ³	1	0,2136	0,2136	108,16	<0,0001
Espaçamento: D_1	1	0,0297	0,0297	15,01	<0,0001
Idade	11	0,04739	0,0043	2,18	0,0144
(h_i/h)*Idade	11	0,0513	0,0047	2,36	0,0075
Resíduo	479	0,9462	0,0019		
Total	506	16,6905			

Sendo F.V. a fonte de variação; GL os graus de liberdade; SQ a soma de quadrados; QM o quadrado médio; F o valor de F calculado; Prob.>F a probabilidade maior que F calculado; h_i a altura na posição i ; h a altura total; e D_1 a variável dummy.

Os resultados mostraram que o polinômio reduzido do 3º grau, simplificado para fins de análise, apresentou alta significância, com valor de F igual a 295,2 (Prob.<0,0001), o mesmo ocorrendo para todas as variáveis independentes (h_i/h), com Prob.<0,0001. Da mesma forma, a variável dummy associada ao espaçamento (dummy1) produziu influência na forma de tronco das árvores, com valor de F igual a 15,01 (Prob.<0,0001), indicando que a espécie sofre influência do maior espaço entre as linhas de plantas, o que alterou a forma geométrica das árvores nos espaçamentos testados. A forma de tronco das árvores também sofreu influência significativa com o desenvolvimento da idade, com valor de F igual a 2,18

(Prob.=0,0144), bem como com a interação das idades com as alturas relativas (idade x h_i/h), com um valor de F igual a 2,36 (Prob.=0,0075). Esse resultado indicou a necessidade do emprego de equações de forma independentes geradas por espaçamento, respectivamente, para as árvores dos espaçamentos de 3,0 x2,0 m e 2,5x3,0 m:

a) equação da forma de tronco para o espaçamento de 3,0 x2,0 m:

$$d_i/d = 1,11279 - 1,8281.(h_i/h) + 7,0120.(h_i/h)^2 - 17,0289.(h_i/h)^3 + 18,3799.(h_i/h)^4 - 8,0178.(h_i/h)^5 \quad (51)$$

b) equação de forma de tronco para o espaçamento de 2,5x3,0 m:

$$d_i/d = 1,17164 - 3,02765.(h_i/h) + 15,6984.(h_i/h)^2 - 43,0640.(h_i/h)^3 + 52,2771.(h_i/h)^4 - 23,6825.(h_i/h)^5 \quad (51)$$

Essas equações de forma de tronco para os espaçamentos de 3,0x2,0 m e 2,5x3,0 m apresentaram, respectivamente, um coeficiente de determinação ajustado igual a 0,9627 e 0,9151 e um coeficiente de variação igual a 3,96 % e 9,77 %.

Embora a análise de covariância tenha indicado a necessidade do uso de equações independentes para os espaçamentos, a análise gráfica da forma da árvore, ajustada com as equações de forma de tronco por espaçamento, não mostrou grande diferença (Figura 30), permitindo, para uso prático, o emprego de uma equação única para descrever a forma de tronco nos dois casos estudados.

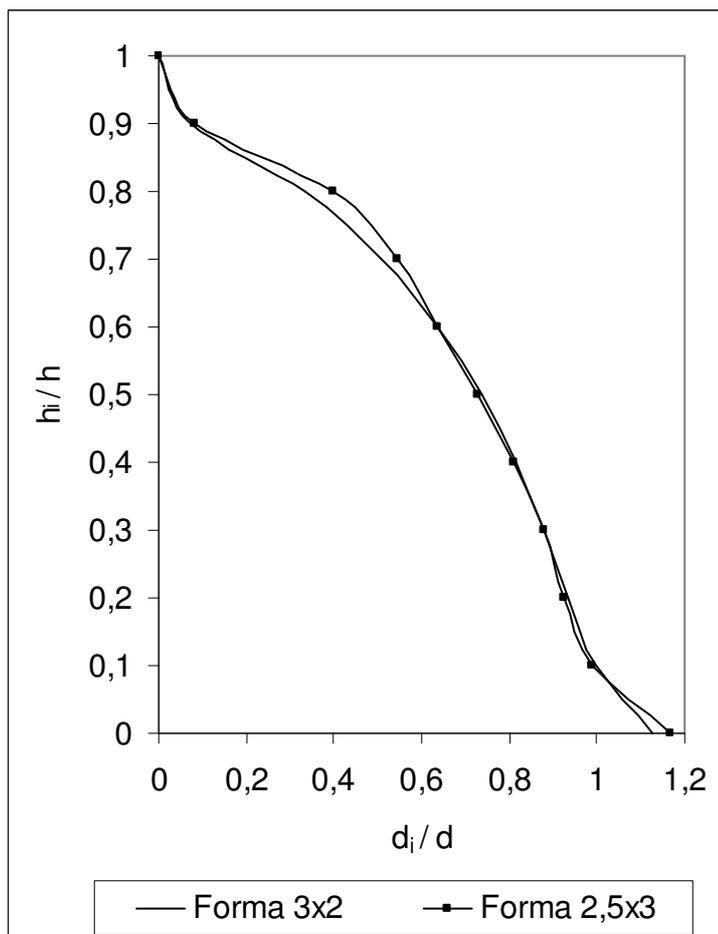


Figura 30 – Forma relativa média de tronco das árvores originadas dos espaçamentos de 3,0 x2,0 m e 2,5x3,0 m.

A redução do volume da árvore com casca para a sem casca, necessária em decorrência da origem dos dados por análise de tronco, gerando volumes sem casca, foi determinada pelo Fator de Casca (FC), descrito como função do diâmetro à altura do peito (d). A equação apresentou boa precisão estatística, com coeficiente de determinação igual a 0,96 e coeficiente de variação igual a 5,08%, sendo expressa por:

$$FC = d^2 / [\exp(0,27585 + 0,16105 \cdot d - 0,00118 \cdot d^2)] \quad (73)$$

Para o desenvolvimento da relação hipsométrica, a variação de altura média estimada foi corrigida para a variação de ± 1 m da média, permitindo cobrir diferenças de altura para um mesmo valor de diâmetro da árvore. A equação calculada apresentou coeficiente de

determinação igual a 0,77 e coeficiente de variação igual a 9,43%, indicando também boa precisão de ajuste.

Para a concatenação das funções da forma de tronco, da relação hipsométrica e do fator de casca, bem como dos valores e das dimensões das classes de sortimento da madeira, previamente definidas, foi elaborada uma tabela dos sortimentos de base relativa, para diâmetros entre 10 e 50 cm, conforme apresentado na Tabela 34.

$$h = d^2 / (2,9673 + 0,0953.d + 0,04023.d^2) \quad (74)$$

Tabela 34 – Sortimentos de madeira para árvores individuais de *Pinus taeda* L.

DAP (cm)	h (m)	Volume (m³c/c)	S1 %	S2 %	S3 %	S4 %	PER %	RES %	Fator Casca
10	11	0,039	93,0	0	0	0	4,0	3,0	0,83
10	12	0,043	90,5	0	0	0	6,7	2,8	0,83
10	13	0,046	87,6	0	0	0	9,9	2,6	0,83
11	12	0,051	90,5	0	0	0	6,7	2,8	0,82
11	13	0,056	87,6	0	0	0	9,9	2,6	0,82
11	14	0,060	94,7	0	0	0	2,9	2,4	0,82
12	13	0,066	87,6	0	0	0	9,9	2,6	0,81
12	14	0,071	94,7	0	0	0	2,9	2,4	0,81
12	15	0,077	93,0	0	0	0	4,8	2,2	0,81
13	14	0,084	94,7	0	0	0	2,9	2,4	0,81
13	15	0,090	93,0	0	0	0	4,8	2,2	0,81
13	16	0,096	91,0	0	0	0	6,9	2,1	0,81
14	15	0,104	93,0	0	0	0	4,8	2,2	0,80
14	16	0,111	91,0	0	0	0	6,9	2,1	0,80
14	17	0,118	95,7	0	0	0	2,4	2,0	0,80
15	15	0,120	93,0	0	0	0	4,8	2,2	0,80
15	16	0,128	91,0	0	0	0	6,9	2,1	0,80
15	17	0,136	95,7	0	0	0	2,4	2,0	0,80
16	16	0,145	91,0	0	0	0	6,9	2,1	0,80
16	17	0,154	95,7	0	0	0	2,4	2,0	0,80
16	18	0,163	94,4	0	0	0	3,7	1,9	0,80
17	16	0,164	91,0	0	0	0	6,9	2,1	0,80
17	17	0,174	95,7	0	0	0	2,4	2,0	0,80
17	18	0,184	94,4	0	0	0	3,7	1,9	0,80
18	17	0,195	95,7	0	0	0	2,4	2,0	0,80
18	18	0,207	94,4	0	0	0	3,7	1,9	0,80
18	19	0,218	97,1	0	0	0	1,2	1,8	0,80
19	17	0,217	95,7	0	0	0	2,4	2,0	0,80
19	18	0,230	94,4	0	0	0	3,7	1,9	0,80
19	19	0,243	97,1	0	0	0	1,2	1,8	0,80
20	18	0,255	94,4	0	0	0	3,7	1,9	0,81
20	19	0,269	97,1	0	0	0	1,2	1,8	0,81

DAP (cm)	h (m)	Volume (m³c/c)	S1 %	S2 %	S3 %	S4 %	PER %	RES %	Fator Casca
20	20	0,283	96,3	0	0	0	2,0	1,7	0,81
21	18	0,281	94,4	0	0	0	3,7	1,9	0,81
21	19	0,297	97,1	0	0	0	1,2	1,8	0,81
21	20	0,312	96,3	0	0	0	2,0	1,7	0,81
22	18	0,309	65,7	28,8	0	0	3,7	1,9	0,81
22	19	0,326	69,6	27,4	0	0	1,2	1,8	0,81
22	20	0,343	70,1	26,2	0	0	2,0	1,7	0,81
23	19	0,356	69,6	27,4	0	0	1,2	1,8	0,82
23	20	0,375	70,1	26,2	0	0	2,0	1,7	0,82
23	21	0,394	49,0	46,4	0	0	3,0	1,6	0,82
24	19	0,388	46,7	50,4	0	0	1,2	1,8	0,82
24	20	0,408	48,0	48,3	0	0	2,0	1,7	0,82
24	21	0,428	49,0	46,4	0	0	3,0	1,6	0,82
25	19	0,421	46,7	50,4	0	0	1,2	1,8	0,82
25	20	0,443	48,0	48,3	0	0	2,0	1,7	0,82
25	21	0,465	30,7	64,6	0	0	3,0	1,6	0,82
26	19	0,455	27,4	69,6	0	0	1,2	1,8	0,83
26	20	0,479	29,3	67,1	0	0	2,0	1,7	0,83
26	21	0,503	30,7	64,6	0	0	3,0	1,6	0,83
27	19	0,491	27,4	69,6	0	0	1,2	1,8	0,83
27	20	0,516	29,3	67,1	0	0	2,0	1,7	0,83
27	21	0,542	30,7	64,6	0	0	3,0	1,6	0,83
28	20	0,555	29,3	67,1	0	0	2,0	1,7	0,83
28	21	0,583	16,1	79,3	0	0	3,0	1,6	0,83
28	22	0,611	20,4	77,0	0	0	1,1	1,5	0,83
29	20	0,596	14,7	81,7	0	0	2,0	1,7	0,84
29	21	0,626	16,1	79,3	0	0	3,0	1,6	0,84
29	22	0,655	20,4	77,0	0	0	1,1	1,5	0,84
30	20	0,638	14,7	81,7	0	0	2,0	1,7	0,84
30	21	0,670	16,1	79,3	0	0	3,0	1,6	0,84
30	22	0,701	20,4	77,0	0	0	1,1	1,5	0,84
31	20	0,681	14,7	81,7	0	0	2,0	1,7	0,85
31	21	0,715	16,1	79,3	0	0	3,0	1,6	0,85
31	22	0,749	20,4	77,0	0	0	1,1	1,5	0,85
32	20	0,726	14,7	55,5	26,2	0	2,0	1,7	0,85
32	21	0,762	16,1	54,2	25,1	0	3,0	1,6	0,85
32	22	0,798	9,7	63,6	24,1	0	1,1	1,5	0,85
33	20	0,772	14,7	55,5	26,2	0	2,0	1,7	0,85
33	21	0,810	16,1	54,2	25,1	0	3,0	1,6	0,85
33	22	0,849	9,7	63,6	24,1	0	1,1	1,5	0,85
34	20	0,819	14,7	55,5	26,2	0	2,0	1,7	0,86
34	21	0,860	5,8	64,4	25,1	0	3,0	1,6	0,86
34	22	0,901	9,7	63,6	24,1	0	1,1	1,5	0,86
35	21	0,911	5,8	43,2	46,4	0	3,0	1,6	0,86
35	22	0,955	9,7	43,1	44,6	0	1,1	1,5	0,86
35	23	0,998	11,0	42,8	42,9	0	1,8	1,5	0,86
36	21	0,964	5,8	43,2	46,4	0	3,0	1,6	0,86
36	22	1,010	9,7	43,1	44,6	0	1,1	1,5	0,86
37	21	1,018	5,8	43,2	46,4	0	3,0	1,6	0,87
37	22	1,067	9,7	25,3	62,4	0	1,1	1,5	0,87
37	23	1,115	11,0	25,5	60,2	0	1,8	1,5	0,87
38	21	1,074	5,8	24,9	64,6	0	3,0	1,6	0,87

DAP (cm)	h (m)	Volume (m³c/c)	S1 %	S2 %	S3 %	S4 %	PER %	RES %	Fator Casca
38	22	1,125	9,7	25,3	62,4	0	1,1	1,5	0,87
38	23	1,177	3,8	32,7	60,2	0	1,8	1,5	0,87
39	21	1,132	5,8	24,9	64,6	0	3,0	1,6	0,87
39	22	1,185	9,7	25,3	62,4	0	1,1	1,5	0,87
39	23	1,239	3,8	32,7	60,2	0	1,8	1,5	0,87
40	21	1,190	5,8	24,9	64,6	0	3,0	1,6	0,87
40	22	1,247	9,7	25,3	62,4	0	1,1	1,5	0,87
40	23	1,304	3,8	18,2	74,7	0	1,8	1,5	0,87
41	21	1,251	5,8	24,9	64,6	0	3,0	1,6	0,87
41	22	1,310	3,2	17,2	77,0	0	1,1	1,5	0,87
41	23	1,370	3,8	18,2	74,7	0	1,8	1,5	0,87
42	21	1,312	7,8	13,7	72,4	0	4,0	2,1	0,88
42	22	1,375	3,2	17,2	52,9	24,1	1,1	1,5	0,88
42	23	1,437	3,8	18,2	51,6	23,1	1,8	1,5	0,88
43	21	1,376	5,8	10,2	54,2	25,1	3,0	1,6	0,88
43	22	1,441	3,2	17,2	52,9	24,1	1,1	1,5	0,88
43	23	1,507	3,8	18,2	51,6	23,1	1,8	1,5	0,88
44	21	1,440	5,8	10,2	54,2	25,1	3,0	1,6	0,88
44	22	1,509	3,2	17,2	52,9	24,1	1,1	1,5	0,88
44	23	1,577	3,8	18,2	51,6	23,1	1,8	1,5	0,88
45	21	1,506	0,0	16,1	54,2	25,1	3,0	1,6	0,88
45	22	1,578	3,2	17,2	52,9	24,1	1,1	1,5	0,88
45	23	1,650	3,8	18,2	51,6	23,1	1,8	1,5	0,88
46	21	1,574	0,0	16,1	32,9	46,4	3,0	1,6	0,88
46	22	1,649	3,2	17,2	32,4	44,6	1,1	1,5	0,88
46	23	1,724	3,8	7,2	42,8	42,9	1,8	1,5	0,88
47	21	1,643	0,0	16,1	32,9	46,4	3,0	1,6	0,88
47	22	1,722	3,2	17,2	32,4	44,6	1,1	1,5	0,88
47	23	1,800	3,8	7,2	42,8	42,9	1,8	1,5	0,88
48	21	1,714	0,0	16,1	32,9	46,4	3,0	1,6	0,88
48	22	1,796	3,2	6,6	43,1	44,6	1,1	1,5	0,88
48	23	1,877	3,8	7,2	42,8	42,9	1,8	1,5	0,88
49	22	1,871	3,8	8,0	30,8	54,2	1,3	1,9	0,88
49	23	1,956	3,8	7,2	25,5	60,2	1,8	1,5	0,88
49	24	2,041	2,0	12,2	25,6	58,2	0,6	1,4	0,88
50	22	1,948	3,2	6,6	25,3	62,4	1,1	1,5	0,88
50	23	2,037	3,8	7,2	25,5	60,2	1,8	1,5	0,88

Sendo S1 o diâmetro na ponta fina de > 8 a 19,9 cm; S2 o diâmetro na ponta fina de 20 a 29,9 cm; S3 o diâmetro na ponta fina de 30 a 39,9 cm; S4 o diâmetro na ponta fina > 40 cm; PER as perdas no toco em %; e RES o resíduo em %.

5.14.2 Prognose dos sortimentos

O desenvolvimento e a variação do número de árvores por classe de diâmetro em diferentes espaçamentos e idades, descritos pela função de probabilidade de Weibull, e suas

co-regressões aninhadas dos parâmetros b e c, associadas ao modelo integrado da equação polinomial do 5º grau de forma de tronco, geram as prognoses dos sortimentos de madeira por classe de diâmetro e no tempo, que foram relacionados na Tabela 34.

Tabela 35 – Distribuição dos volumes em $m^3 ha^{-1}$ por classe de sortimentos e diâmetro de um povoamento de 18 anos de idade.

DAP (cm)	Volume ($m^3 ha^{-1}$)	Sortimentos absolutos ($m^3 ha^{-1}$)					
		S1	S2	S3	S4	PER	RES
8	0,0003	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0010	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
12	0,0545	0,0516	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,0013
14	0,7845	0,7139	0,0000	0,0000	0,0000	0,0541	0,0165
16	4,1284	3,9509	0,0000	0,0000	0,0000	0,0991	0,0826
18	12,0052	11,3329	0,0000	0,0000	0,0000	0,4442	0,2281
20	23,1544	22,4830	0,0000	0,0000	0,0000	0,2779	0,4168
22	32,0080	22,2776	8,7702	0,0000	0,0000	0,3841	0,5761
24	37,7971	18,1426	18,2560	0,0000	0,0000	0,7559	0,6426
26	47,0301	13,7798	31,5572	0,0000	0,0000	0,9406	0,7995
28	54,0091	8,6955	42,8292	0,0000	0,0000	1,6203	0,8641
30	50,9334	8,2003	40,3902	0,0000	0,0000	1,5280	0,8149
32	42,8031	6,8913	23,1993	10,7436	0,0000	1,2841	0,6848
34	32,9621	1,9118	21,2276	8,2735	0,0000	0,9889	0,5274
36	24,8460	2,4101	10,7086	11,0813	0,0000	0,2733	0,3727
38	16,9425	1,6434	4,2865	10,5721	0,0000	0,1864	0,2541
40	11,0883	1,0756	2,8053	6,9191	0,0000	0,1220	0,1663
42	7,0125	0,2244	1,2062	3,7096	1,6900	0,0771	0,1052
44	4,3097	0,1379	0,7413	2,2798	1,0386	0,0474	0,0646
46	2,5922	0,0830	0,4459	0,8399	1,1561	0,0285	0,0389
48	1,5517	0,0497	0,1024	0,6688	0,6921	0,0171	0,0233
50	0,9533	0,0362	0,0686	0,2431	0,5739	0,0172	0,0143
52	0,5972	0,0227	0,0418	0,1535	0,3595	0,0108	0,0090
Total	407,0	124,1	206,6	55,3	5,2	9,1	6,7

O controle da eficiência do modelo realizado com uma simulação dos sortimentos de madeira, com volume com casca expresso em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ para um povoamento com idade de 18 anos, volume de $407 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ e número de árvores igual a 1.200/ha mostrou, com boa precisão, eficiência e grande facilidade operacional.

Nesta condição, observa-se, na tabela 35, a distribuição do volume nas seguintes classes de sortimento: S1 (8-19,9 cm) = $124,1 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$; S2 (20-28,9 cm) = $206,6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$; e S3 (38-39,9 cm) = $55,3 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$; 34 (>40 cm) = $5,2 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$. Além destes, o volume de perdas no toco (altura = 0,15 m) alcançou $9,1 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, e o volume das ponteiros ($d < 8 \text{ cm}$), $6,7 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Como demonstrado, a metodologia permitiu prognosticar a quantidade e distribuição dos sortimentos de madeira para qualquer idade, densidade da população e qualidade do sítio do povoamento com facilidade e boa precisão em qualquer idade e densidade do povoamento.

5.15 Integração do sítio com o Diagrama de Manejo da Densidade

A Figura 31 representa o resultado da elaboração do DMDPs, com integração de vários parâmetros do povoamento, como: volume médio, diâmetro médio, densidade de árvores por hectare e altura dominante, relacionada à classificação de sítio do povoamento.

Com este Diagrama de Manejo da Densidade do Povoamento, pode-se estimar qual o volume médio, o diâmetro médio e a altura para uma densidade de árvores por hectare em um determinado sítio, em determinado momento de desenvolvimento da população, sem ou com a execução de desbaste. Da mesma forma, o DMDP forneceu o volume total de uma determinada condição de densidade, verificando o valor do volume médio para uma densidade de árvores por hectare no ponto de encontro com a linha de iminente mortalidade (linha tracejada), abaixo da linha de máxima densidade (linha escura).

Como exemplo, para uma densidade igual a 1100 árvores/ha, o volume médio foide $0,199 \text{ m}^3$, e a produção, igual a $383,3 \text{ m}^3 \text{ha}$, com diâmetro médio igual a 18 cm e altura de 14 m.

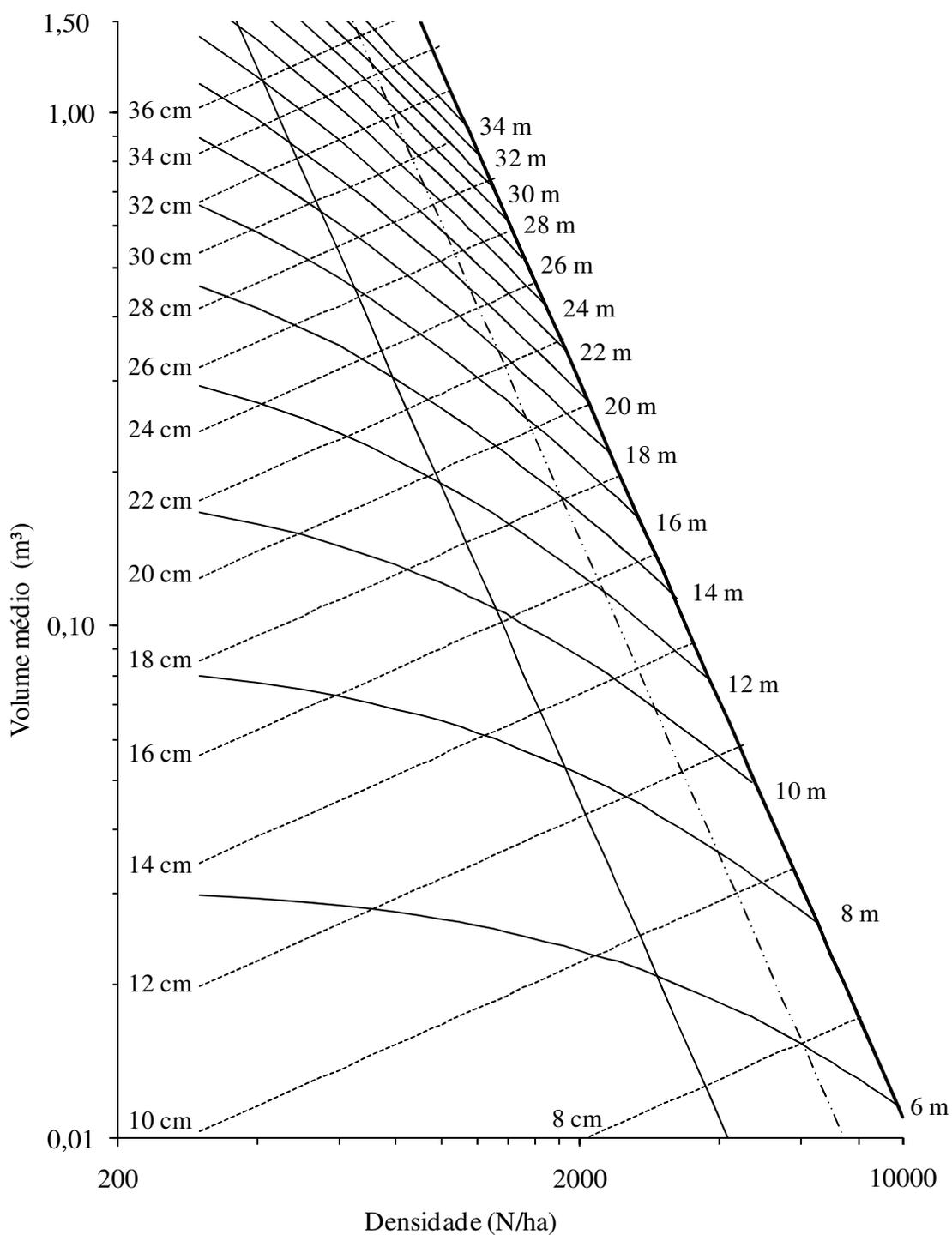


Figura 31 – Diagrama de Manejo da Densidade de Povoamentos de *Pinus taeda* L. com os parâmetros médios da população: volume (m³), diâmetro (cm), altura (m) e densidade de árvores (ha).

A manipulação da densidade é uma das mais importantes ferramentas para os silvicultores alcançarem os objetivos de identificação dos níveis limitantes da concorrência

dos povoamentos. Atributos do povoamento, como a relação da altura pelo diâmetro, o diâmetro da copa, a percentagem de cobertura, a relação dos galhos com o tamanho dos nós e o vigor das árvores, têm extrema influência na densidade do povoamento e afetam a qualidade da madeira, a quantidade e o valor, a resistência a pragas e doenças, o valor do povoamento, a disponibilidade para recreação e a capacidade hidrológica do local.

Um dos mais efetivos métodos de planejamento da densidade de manejo de povoamentos equiâneos é, sem dúvida, o uso dos Diagramas de Manejo da Densidade de Povoamentos (DMDPs), pois eles constituem-se em uma representação do desenvolvimento do povoamento sob vários formatos, que ilustram a interação entre a densidade de árvores/ha ou outras medidas do estoque e vários parâmetros do povoamento, como o diâmetro, a altura e o volume (Figura 31). Quando usados em conjunto com as curvas de altura dominante sobre a idade (índice de sítio), o fator tempo passa a ser integrado ao modelo. Como resultado, esses diagramas permitem ao silvicultor comprovar o desenvolvimento da trajetória do povoamento para vários estabelecimentos de densidade de árvores por hectare e regimes de desbastes para um dado sítio.

Os Diagramas de Manejo da Densidade do Povoamento (DMDPs) incluem uma linha de máxima densidade e outra que indica a mortalidade natural estabelecida pela concorrência das árvores por espaço físico. Esta segunda linha permite definir uma área de iminente mortalidade, sendo, aproximadamente, o momento em que inicia o autodesbaste acelerado de árvores na população.

A relação entre vários parâmetros do povoamento nos DMDPs, expressa pelo volume médio, pelo diâmetro médio, pela densidade de árvores e pela altura dominante, reflete-se no modelo de produção, permitindo determinar o tipo de manejo da produção a ser adotado na condução do povoamento para alcançar um objetivo de produção e um diâmetro médio no corte final.

Para projetar a trajetória do povoamento, com ou sem execução de desbastes nos DMDPs, são requeridos os valores de densidade inicial de árvores por hectare para a altura dominante da população, obtendo-se o diâmetro médio e o correspondente volume médio. Esta trajetória de desenvolvimento da densidade de árvores por hectare deve, preferencialmente, ser conduzida sobre a linha de iminente mortalidade (linha tracejada), que indica o momento do surgimento do início da mortalidade de árvores no povoamento, que se situa a 50% da linha de máxima densidade de árvores por hectare (linha cheia). Sobre esta linha de iminente mortalidade de árvores, pode-se estabelecer a zona ótima de manejo da densidade de árvores por hectare, que se situa 10% abaixo e 5% acima desta linha de iminente

mortalidade, como sendo o limite de tolerância para a presença de mortalidade natural de árvores na população. De outra forma, estes limites da zona ótima de manejo da densidade da população correspondem aos limites de 40 a 55% da linha de densidade máxima da população, anteriormente determinada para o presente caso.

Assim, a densidade de árvores da população manejada deve mover-se sobre esta linha tracejada (iminente mortalidade), oscilando dentro da zona ótima de manejo do povoamento, evitando que se ultrapasse o limite superior e, enfim, que ocorra morte de árvores. Por outro lado, pode-se também intensificar o desbaste para uma densidade menor que o limite inferior da zona ótima de manejo, quando for desejado efetuar um desbaste mais pesado. No entanto, isto produz efeito negativo sobre a produção máxima, porém incrementa a dimensão do diâmetro.

Dessa forma, os DMDPs permitem obter, a qualquer momento, respostas para o desenvolvimento da população, conhecer a densidade de árvores por hectare, o diâmetro médio e o volume médio para uma altura dominante (sítio) e, com isso, determinar a produção e os incrementos alcançados para uma idade e o índice de sítio, utilizando esses resultados para fins de planejamento da produção ou para determinação econômica.

5.16 Manejo estrutural da densidade populacional

O crescimento do diâmetro em função da densidade populacional controlada com um, dois e três desbastes, com variação da idade de corte final em uma população com densidade inicial de 1500 árvores por hectare, implantada com espaçamento de 3,0 x 2,0 m, para a qual foi assumida uma mortalidade inicial de 10%, possibilitou descrever os regimes de manejo.

Nos cenários apresentados, a idade de aplicação dos desbastes e da rotação foi determinada pela projeção da altura dominante e do diâmetro médio na idade correspondente, baseada nas funções de diâmetro médio, com R^2 igual a 0,9985 e CV igual a 3,24%, e de altura dominante, com R^2 igual a 0,9958 e CV igual a 1,53%, como segue:

$$a) d = \exp(1,2620 \cdot \ln(h_{100}) - 0,0670 \cdot \ln^2(h_{100})) \quad (75)$$

$$b) h_{100} = \exp(1,3638 \cdot \ln(t) - 0,0975 \cdot \ln^2(t)) \quad (76)$$

Os regimes de manejo foram concebidos para serem executados desbastes limitados às linhas C e B dos diagramas de manejo.

5.16.1 Regime de manejo 1: trajetória da população conduzida sem desbaste e com corte raso aos 13 anos

Para representar uma situação pouco corrente de manejo de *Pinus taeda* L., sem a realização de desbaste, foi realizada a simulação que se encontra representada na Figura 32.

Neste regime de manejo, percebe-se que a trajetória do diâmetro médio por densidade de árvores por hectare da população, sem a realização de desbaste, desenvolve-se com a presença da mortalidade de indivíduos, ultrapassando a Linha B, pela concorrência natural entre as árvores da população.

Devido à não realização de desbaste, a mortalidade tende a aumentar, podendo, em um determinado momento, aproximar-se até da Linha A, de intensa mortalidade de árvores. Assim, no manejo em densidade completa, sem desbaste, a idade de corte final deveria ser definida no momento em que a densidade de árvores do povoamento atingisse ou se aproximasse da Linha B. Caso seja tolerada uma certa mortalidade de árvores na população, a idade de corte final poderia ser postergada, por exemplo, para uma idade em que fosse atingido um diâmetro médio de 21,3 cm, com cerca de 1400 árvores por hectare. Isto representa uma mortalidade natural de cerca de 67 % da densidade inicial estabelecida, de 1500 árvores por hectare que resultaram do plantio.

Para este caso específico, em que a idade de corte final foi fixada em 13 anos, o diâmetro médio é de 21,3 cm, com uma densidade populacional de 1400 árvores por hectare e uma produção de 404 m³ ha⁻¹. A trajetória do diâmetro médio por densidade populacional encontra-se representada na Figura 32.

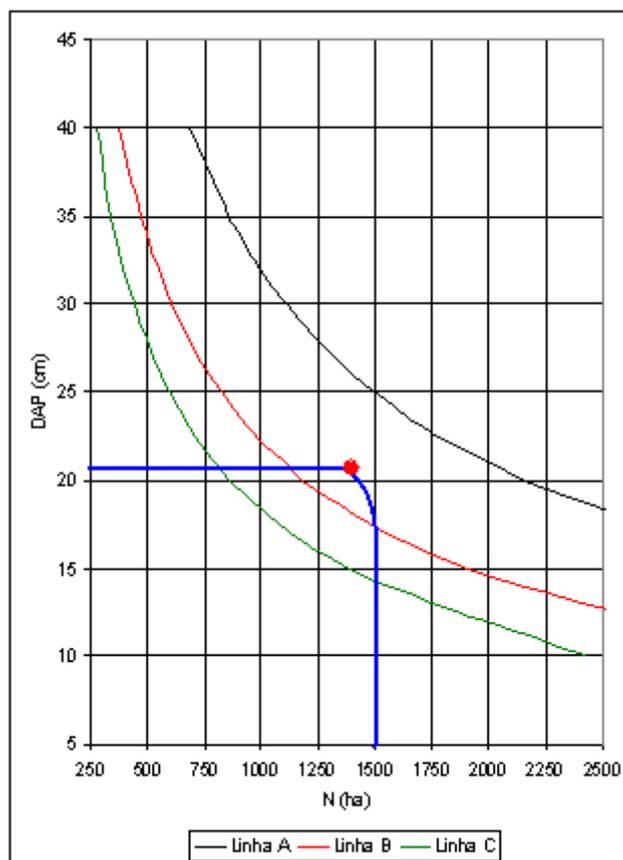


Figura 32 – Regime de manejo 1: trajetória do povoamento com o crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores sem a realização de desbastes.

5.16.2 Regime de manejo 2: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em população conduzida com um desbaste e corte final aos 13 anos

O regime de manejo com a trajetória do povoamento, com diâmetro médio, calculada em função da densidade, representada na Figura 33, mostrou que o desbaste deve ocorrer quando o diâmetro médio atingir, aproximadamente, 16,0 cm (Linha B representando o início da mortalidade), reduzindo a densidade a 410 árvores por hectare e com o povoamento passando a conter 1090 árvores por hectare (Linha C).

Com essa densidade de árvores por hectare, a população volta a crescer livre de concorrência até atingir novamente a Linha B (início da mortalidade), com um diâmetro médio de 21,3 cm. A partir deste ponto, inicia novamente a mortalidade natural, que somente pode ser evitada caso ocorra mais um desbaste. Porém, como a estratégia de manejo foi

realizar apenas um desbaste, esta mortalidade inicial pode ser tolerada, até certo ponto, em favor de um maior diâmetro médio no corte final.

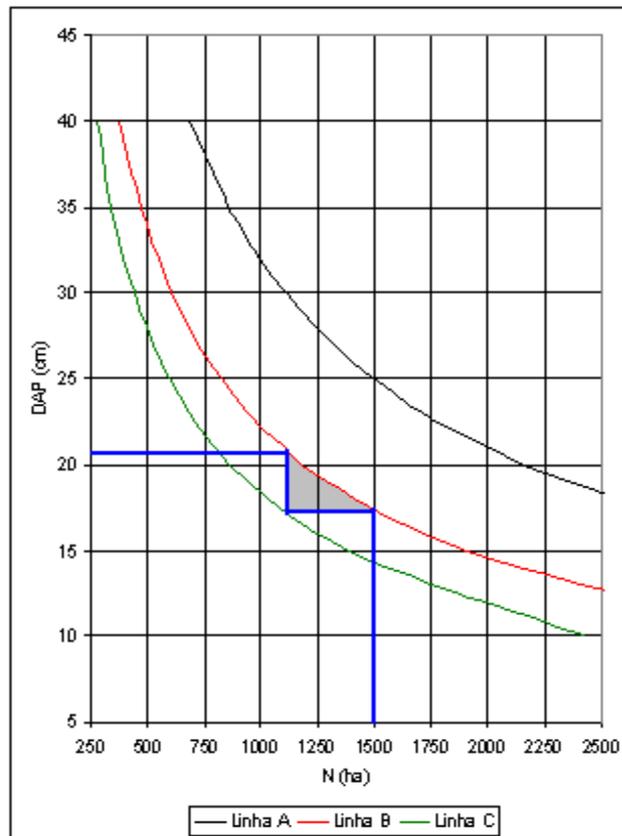


Figura 33 – Regime de manejo 2: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com um desbaste, aos 9 anos, e corte final aos 13.

5.16.3 Regime de manejo 3: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em população conduzida com dois desbastes e corte final aos 18 anos

Neste caso, o primeiro desbaste ocorreu como no regime de manejo 2, isto é, quando o povoamento atingiu, aproximadamente, 16,0 cm (Linha B representando o início da mortalidade), tendo a densidade sido reduzida a 410 árvores por hectare e com o povoamento passando a conter 1090 árvores por hectare (Linha C), voltando a crescer livre de concorrência até atingir a Linha B, quando o diâmetro médio alcançou 21,3 cm. Na ocasião, o segundo desbaste foi executado com o abate de 290 árvores por hectare. A partir daí, a

população voltou a crescer, atingindo a Linha B quando o diâmetro médio erade 26,0 cm (Figura 34).

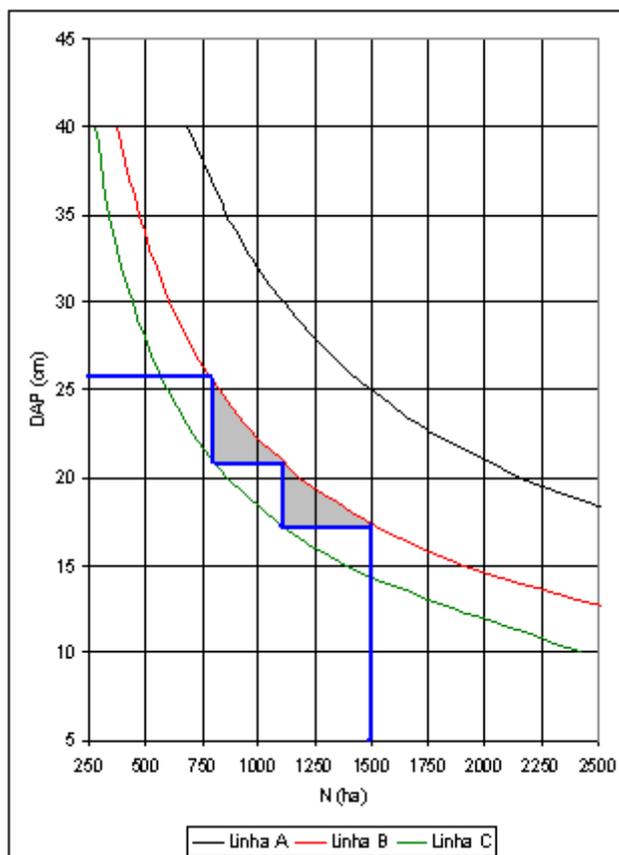


Figura 34 – Regime de manejo 3: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com dois desbastes, aos 9 e 13 anos, e corte final aos 18.

5.16.4 Regime de manejo 4: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em função da densidade da população conduzida com três desbastes e corte final aos 22 anos

No terceiro desbaste, conforme Figura 35, após a realização dos dois desbastes simulados no regime de manejo 3, ocorreu a redução da densidade para 570 árvores por hectare, com o corte de 230 árvores por hectare, possibilitando ao povoamento atingir o diâmetro médio de 30,0 cm.

Após a execução dos três desbastes previstos, somente pode-se tolerar a ocorrência de mortalidade em favor de um maior diâmetro médio quando do momento do corte final.

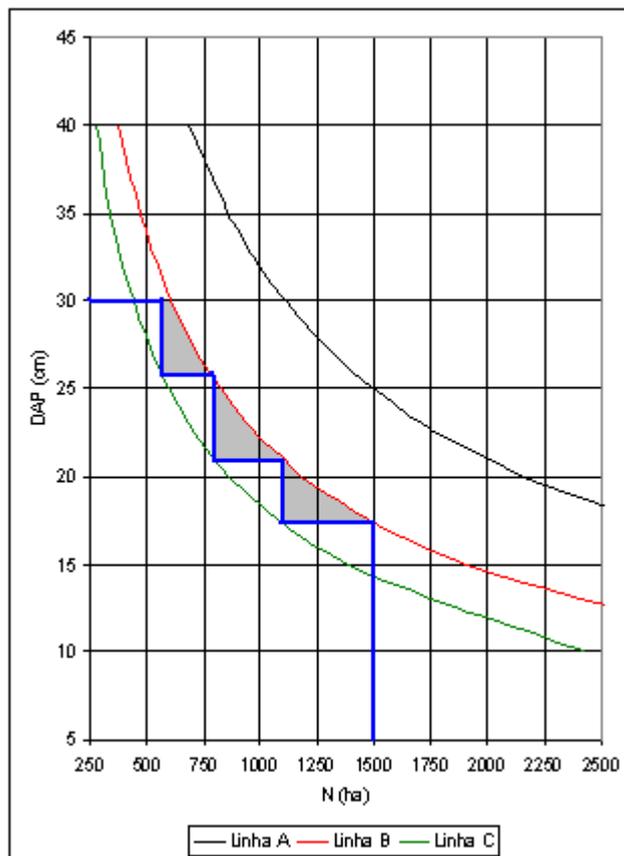


Figura 35 – Regime de manejo 4: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com a realização de dois desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 22.

5.16.5 Regime de manejo 5: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em função da densidade da população conduzida com três desbastes e corte final aos 26 anos

Com a realização de três desbastes e rotação aos 26 anos, quatro anos a mais do que o regime de manejo 4, o povoamento onde remanesceram 570 árvores por hectare atingiu o diâmetro médio de 33,0 cm.

A manutenção dessa densidade leva a uma nova situação de competição e ao estabelecimento do autodesbaste que poderá ser evitado com a realização de um quarto desbaste (Figura 36).

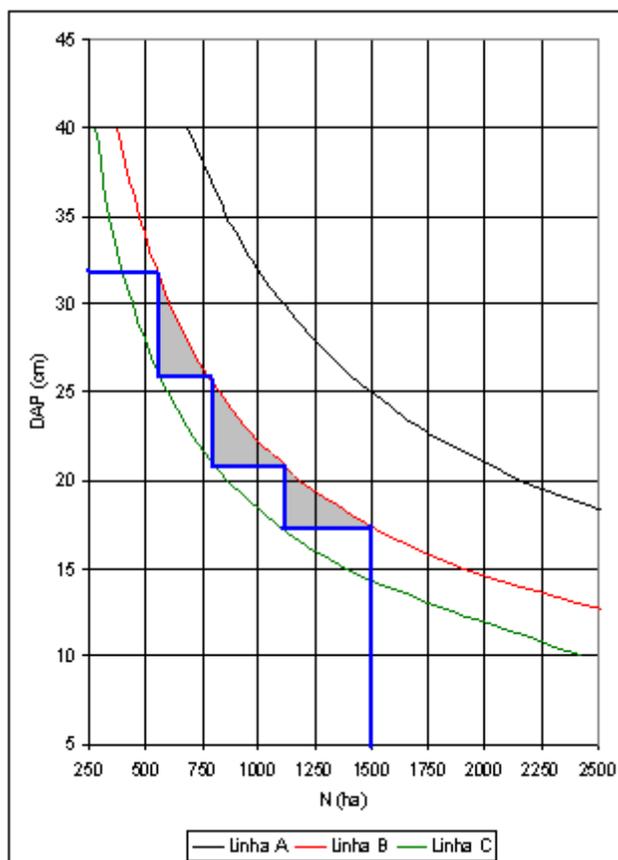


Figura 36 – Regime de manejo 5: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com a realização de três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 26.

5.16.6 Regime de manejo 6: trajetória do povoamento com padrão de crescimento do diâmetro em função da densidade com três desbastes e corte final aos 28 anos

Este regime de manejo, definido para ser executado com três desbastes e com idade de corte final aos 28 anos, portanto com rotação prolongada em dois anos em relação ao regime de manejo 5, assume a estratégia de tolerar a presença de mortalidade natural. Dos desbastes realizados aos 9 anos, com o corte de 410 árvores, aos 13, com o corte de 290 árvores e aos 18, o terceiro corte, com o corte de 230 árvores por hectare, remanesceram, na ocasião, 570 árvores vivas por hectare. A partir de então, foi aplicada uma taxa de probabilidade de mortalidade de 12,2%, como povoamento alcançando cerca de 500 árvores por hectare aos 28 anos, conforme representado na Figura 37 pela área escura acima da Linha B. Na mesma

figura, verificou-se que o aumento da idade de corte final do povoamento para 28 anos permitiu elevar o diâmetro médio para 35,0 cm.

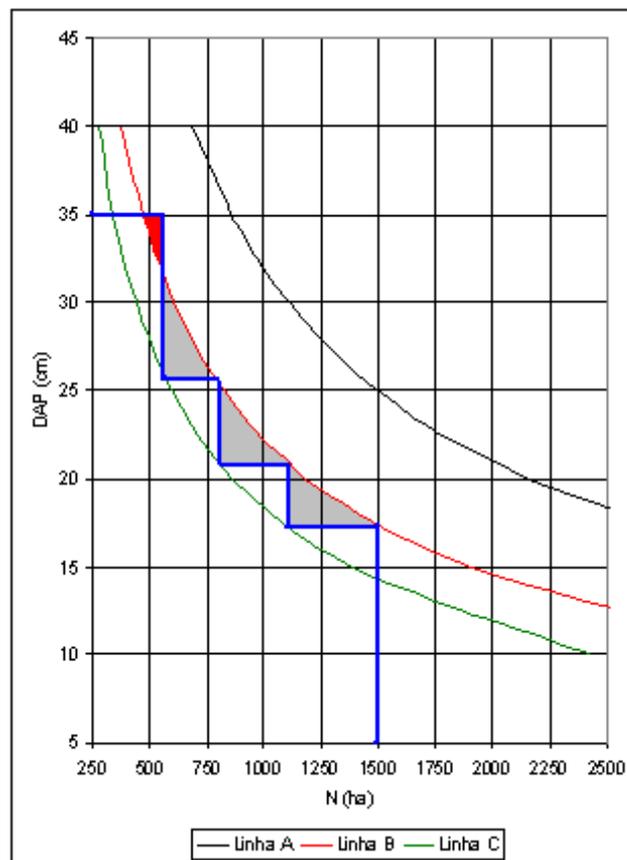


Figura 37 – Regime de manejo 6: trajetória do povoamento com crescimento do diâmetro médio por densidade de árvores com três desbastes mais pesados, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 28.

5.16.7 Síntese das densidades das trajetórias dos povoamentos por regimes de manejo

Na Tabela 36, foi apresentada uma síntese do desenvolvimento do povoamento em relação à densidade de árvores por hectare para um diâmetro médio correspondente, como resultado dos seis regimes de manejo simulados em populações equiâneas de *Pinus taeda* L., conduzidas em sistema de alto fuste.

Tabela 36 – Densidades absolutas antes e depois do desbaste por regime de manejo.

Regime de manejo	Operação	Idade (ano)	DAP (cm)	Densidade Populacional (ha)		
				Antes do desbaste	Depois do desbaste	Desbaste
1	Sem desbaste	13	21,3	1.400	-	-
	Desbaste	9	16	1.500	1.090	410
2	Corte final	13	21,3	1.090	-	-
	Desbaste	9	16	1.500	1.090	410
3	Desbaste	13	21,3	1.090	800	290
	Desbaste	18	26	800	-	-
	Corte final	18	26	800	-	-
4	Desbaste	9	16	1.500	1.090	410
	Desbaste	13	21,3	1.090	800	290
	Desbaste	18	26	800	570	230
	Corte final	22	30	570	-	-
5	Desbaste	9	16	1.500	1.090	410
	Desbaste	13	21,3	1.090	800	290
	Desbaste	18	26	800	570	230
	Corte final	26	33	570	-	-
6	Desbaste	9	16	1.500	1.090	410
	Desbaste	13	21,3	1.090	800	290
	Desbaste	18	26	800	570	230
	Corte final	28	35	500*	-	-

Sendo * a frequência descontada da mortalidade de 12,2%; e os regimes de manejo: 1 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 18 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos.

Os resultados mostraram a dinâmica das densidades de árvores por hectare com o desenvolvimento do diâmetro médio ao longo do tempo e o efeito da aplicação dos desbastes. Para cada regime de manejo, foram registradas as densidades de árvores por hectare que existiam antes da realização do desbaste, as remanescentes e as desbastadas.

5.16.8 Produção dos regimes de manejo por classe de diâmetro e sortimentos de madeira

As produções totais e os volumes por classe de sortimento por idade e regimes de manejo encontram-se discriminadas na Tabela 37.

Estes sortimentos foram calculados com a integração das equações de forma de tronco, dos sortimentos de madeira e da distribuição de probabilidade de frequência por classe de diâmetro e apresentaram, para os seis regimes de manejo, grande variação de produtividade e de diâmetros médios, tanto nos desbastes como no corte final. Esse resultado, que já era esperado, deve-se ao efeito temporal e ao número de desbastes aplicados. O ingresso de madeira nos maiores sortimentos foi proporcional ao número de desbastes aplicados e à idade de corte final estabelecida para os regimes de manejo.

A evolução do volume dos sortimentos de madeira do regime de manejo 5, com três desbastes realizados aos 9, 13 e 18 anos e corte final aos 26, é demonstrada na Figura 38, na qual se observa que o volume, nos maiores sortimentos, surgiu com o envelhecimento do povoamento, em consequência dos desbastes realizados. Isto indica que madeira de grandes dimensões para uso, por exemplo, na laminação ou no faqueado, exige a utilização de regimes de manejo com um maior número de desbastes e, por conseguinte, com rotações mais longas.

Tabela 37 – Produções dos regimes de manejo sem desbaste e com um, dois e três desbastes.

Regime de manejo	Tratos	Idade (ano)	D (cm)	h (m)	N (ha)	V (m^3ha^{-1})	Sortimentos (m^3ha^{-1})			
							S1	S2	S3	S4
1	Sem									
	Desb.	13	21,3	16,2	1.400	404,0	131,0	136,0	117,6	15,7
2	Desb.1	9	16,0	17,8	410	65,9	12,9	10,8	20,1	19,1
	CR	13	21,3	23,4	1.090	409,7	122,4	127,2	109,5	30,4
3	Desb.1	9	16,0	17,8	410	65,9	12,9	10,8	20,1	19,1
	Desb.2	13	21,3	23,4	290	109,0	27,4	26,8	32,1	19,3
	CR	18	26,0	28,4	800	542,5	88,2	112,1	129,4	198,6
4	Desb.1	9	16,0	17,8	410	65,9	12,9	10,8	20,1	19,1
	Desb.2	13	21,3	23,4	290	109,0	27,4	26,8	32,1	19,3
	Desb.3	18	26,0	28,4	230	155,9	13,8	25,6	36,0	78,3
	CR	22	30,0	32,5	570	655,3	65,4	68,5	94,1	397,7
5	Desb.1	9	16,0	17,8	410	65,9	12,9	10,8	20,1	19,1
	Desb.2	13	21,3	23,4	290	109,0	27,4	26,8	32,1	19,3
	Desb.3	18	26,0	28,4	230	155,9	13,8	25,6	36,0	70,7
	CR	26	33,0	35,6	570	781,0	67,8	73,9	131,2	495,8
6	Desb.1	9	16,0	17,8	410	65,9	12,9	10,8	20,1	19,1
	Desb.2	13	21,3	23,4	290	109,0	27,4	27,4	45,3	32,9
	Desb.3	18	26,0	28,4	230	155,9	13,8	13,8	37,9	102,0
	CR	28	35,0	37,6	500	743,2	60,8	71,2	126,1	477,2

Sendo d o diâmetro à altura do peito, em cm; h a altura total, em m; N o número de árvores por hectare; V o volume total em m^3ha^{-1} ; S1 o sortimento de 8 a 19,9 cm; S2 o sortimento de 20 a 29,9 cm; S3 o sortimento de 30 a 39,9 cm; S4 o sortimento > 40 cm; e os regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos.

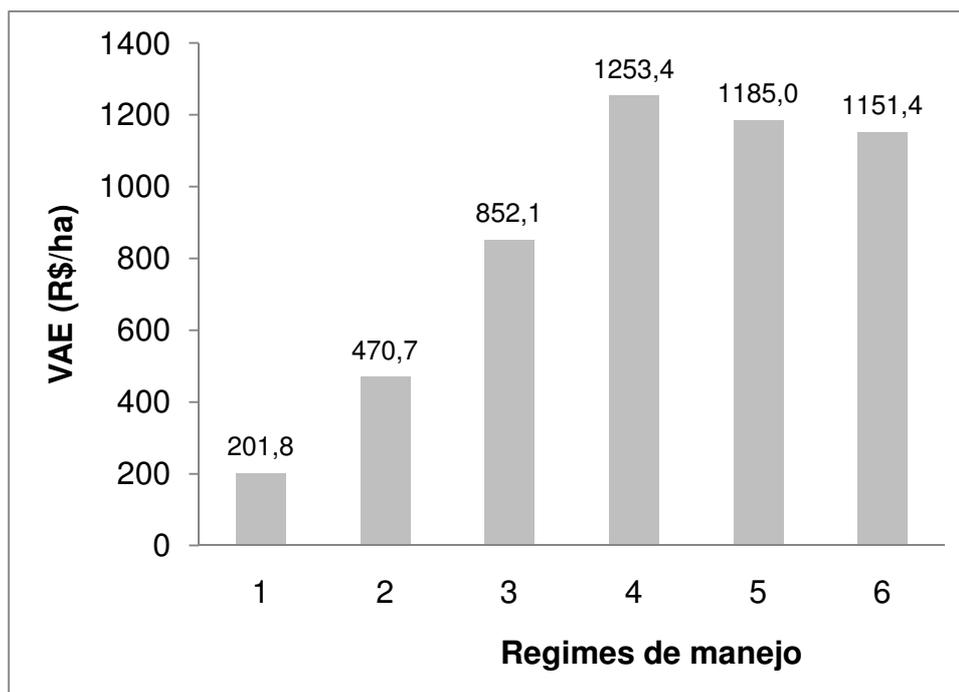


Figura 38 – Evolução do volume dos sortimentos de distribuição por idade em regime de manejo com três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 26.

5.17 Avaliação econômica dos regimes de manejo

Na avaliação econômica dos regimes de manejo formulados, foram utilizados os custos operacionais, preços dos sortimentos de madeira praticados em empreendimentos florestais e dos insumos, como médias para a região do Planalto Médio Catarinense.

Para efeito de análise da repercussão financeira da aplicação de regimes de manejo com um, dois e três desbastes e com variação da idade de corte final, foi determinado o Valor Presente Líquido das alternativas e, para a comparação, o respectivo Valor Anual Equivalente, bem como a taxa interna de retorno e a razão dos benefícios sobre os custos.

5.17.1 Valor Presente Líquido

O resultado da determinação do Valor Presente Líquido considerando uma taxa de juro de 6,75 % a.a. nos regimes de manejo com um, dois e três desbastes e com variação da idade de corte final, conforme a Tabela 38.

Tabela 38 – Valor Presente Líquido dos regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de *Pinus taeda* L. Data: 30/04/2010.

RM	CF ano	RF R\$ ha⁻¹	Cultura R\$ ha⁻¹	A + T R\$ ha⁻¹	M R\$ ha⁻¹	VPL R\$ ha⁻¹
1	13	22.497,1	8.275,3	5.945,2	3.318,7	2.120,9
2	13	29.106,2	8.275,3	5.945,2	3.318,7	4.948,1
3	18	60.942,9	11.471,6	9.958,1	5.172,7	10.597,0
4	22	101.910,4	14.896,9	14.258,5	7.159,6	15.587,6
5	26	129.360,1	19.345,0	19.843,0	9.639,8	14.736,9
6	28	145.649,6	22.044,7	23.232,5	11.205,8	14.318,6

Sendo RM o regime de manejo; CF o corte final; RF a receita futura; A o custo administração; T o custo de arrendamento; M o custo de manutenção; VPL o valor presente líquido; e os regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos.

Os dados da Tabela 38 indicam que o regime de manejo 4, com realização de três desbastes nas idades de 9, 13 e 18 anos e corte final aos 22, com R\$ 15.587,6 ha⁻¹, foi o regime economicamente mais eficiente. Este valor é muito superior ao obtido para a região dos Campos de Cima da Serra, RS, igual a R\$ 5.317,90 ha⁻¹, com desbastes aos 9, 14 e 18 anos e corte raso aos 25, ambos para a mesma espécie (SCHNEIDER, 2006).

O segundo regime mais eficiente foi o regime de manejo 5, com três desbastes aplicados nas idades de 9, 13 e 18 anos e corte final aos 26, seguido pelo regime de manejo 6, que considerou a aplicação de três desbastes nas idades de 9, 13 e 18 anos e corte final aos 28. As alternativas de menor atratividade foram os regimes de manejo 1 e 2, com a realização de corte final aos 13 anos, sem e com um desbaste, respectivamente.

Analisando os valores presente líquidos dos regimes de manejo 4 e 5, com os maiores desempenhos financeiros, percebe-se uma diferença absoluta de R\$ 850,70 ha⁻¹ em favor do regime de manejo 4, que pressupõe a realização de desbastes aos 9, 13 e 18 anos e corte final aos 22 anos, economicamente mais eficiente que os demais regimes de manejo, como é mostrado na Figura 39.

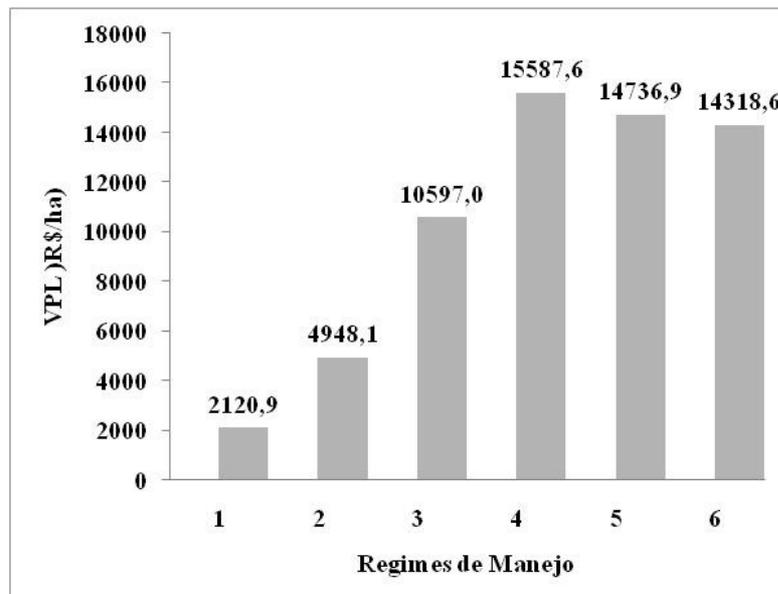


Figura 39 – Valor Presente Líquido dos regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de *Pinus taeda* L. Regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.

5.17.2 Valor Anual Equivalente

Na Tabela 39, encontram-se os cálculos do Valor Anual Equivalente (VAE) aplicado ao estudo. Em decorrência da diferença nos horizontes de planejamento dos quatro regimes de manejo, com idade de rotação de 18, 22, 26 e 28 anos, atualizou-se o Valor Presente Líquido para uma série equivalente no tempo, sendo, portanto, comparável financeiramente, o que revelou que o regime de manejo 4, um VAE igual a R\$ 1.253,40 ha⁻¹ foi o regime de maior eficiência econômica. Na sequência, situaram-se os regimes de manejo 5 e 6, respectivamente, com VAE igual a R\$ 1.185,00 ha⁻¹ e R\$ 1.151,40 ha⁻¹. Esse resultado para os seis regimes de manejo mostrou ser preferível conduzir os povoamentos *Pinus taeda* L. com emprego de três desbastes com corte final aos 22 anos.

Tabela 39 – Valor Anual Equivalente dos regimes de manejo para *Pinus taeda* L. Data: 30/04/2010.

RM	CF	RF	Cultura	A + T	M	VPL	VAE
	ano	R\$ha⁻¹	R\$ha⁻¹	R\$ha⁻¹	R\$ha⁻¹	R\$ha⁻¹	R\$ha⁻¹
1	13	22.497,1	8.275,3	5.945,2	3.318,7	4.241,8*	201,8
2	13	29.106,2	8.275,3	5.945,2	3.318,7	9.896,2*	470,7
3	18	60.942,9	11.471,6	9.958,1	5.172,7	10.597,0	852,1
4	22	101.910,4	14.896,9	14.258,5	7.159,6	15.587,6	1.253,4
5	26	129.360,1	19.345,0	19.843,0	9.639,8	14.736,9	1.185,0
6	28	145.649,6	22.044,7	23.232,5	11.205,8	14.318,6	1.151,4

Sendo RM o regime de manejo; CF o corte final; RF a receita futura; A o custo administração; T o custo de arrendamento; M o custo de manutenção; VPL o Valor Presente Líquido; VAE o Valor Anual Equivalente; e os regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010. * VPL acumulado de dois cultivos no ciclo máximo.

Por outro lado o regime de manejo 3, uma rotação de 18 anos permite um giro de capital mais rápido do que em 28 anos, regime de manejo 6, tornando a aplicação mais atrativa ao investidor, pois o capital retorna em um período de tempo mais curto, favorecendo a formação e o fluxo de caixa da empresa. No entanto, o resultado financeiro é inferior aos regimes de manejo 4, 5 e 6, como pode ser melhor visualizado na Figura 39.

Estes valores contrastam-se aos encontrados por Savisnki Júnior (2000) que determinou numa avaliação econômica para várias culturas do Estado de Santa Catarina, entre as quais o reflorestamento com *Pinus taeda* L. para preços médios do mercado regional, encontrou um valor do Fluxo Anual Equivalente de R\$ 218,3 ha⁻¹ inferior ao encontrado no presente trabalho de R\$ 1.185,0 ha⁻¹ no regime de manejo 5, com três desbastes e corte final aos 26 anos. Esta diferença pode estar condicionada a produtividade das florestas da espécie, horizonte de planejamento máximo e as condições do mercado regional no momento da tomados dos parâmetros econômicos de custos do empreendimento e preços dos sortimentos de madeira.

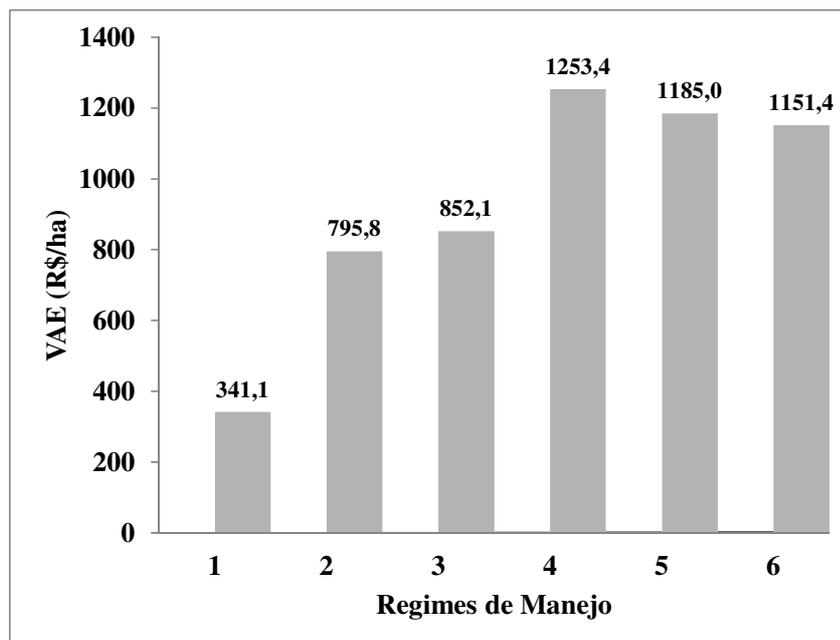


Figura 40 – Valor Anual Equivalente (VAE) de regimes de manejo utilizados na condução de povoamentos de *Pinus taeda* L. Regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.

5.17.3 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno nos seis regimes de manejo simulados, conforme a Tabela 40, teve valor máximo no regime de manejo 4, com desbaste aos 9, 13 e 18 anos e corte final aos 22, que foi igual a 14,83% a.a. A segunda maior TIR foi obtida no regime de manejo 3, com desbaste aos 9 e 13 anos e corte final aos 18. As demais taxas, em ordem decrescente, foram encontradas nos regimes de manejo 6, 5, 2 e 1, respectivamente. Os regimes de manejo 1 e 2, sem e com um desbaste e rotação de 13 anos, foram novamente as alternativas de menor atratividade econômica.

Os valores de TIR (Tabela 40) mostraram que os investimentos florestais conduzidos segundo estes regimes de manejo possibilitam obter retorno financeiro, mesmo quando considerado o empréstimo junto a agentes financeiros para fomento da atividade florestal, com taxa nominal de 6,75% a.a., atualmente praticada na época, sob a pressuposição de que o mercado regional mantenha, no mínimo, a mesma relação de custos e preços dos sortimentos de madeira.

Tabela 40 – Taxa interna de retorno para os seis regimes de manejo simulados.

Regime de manejo	Corte final (ano)	Desbastes Idade (ano)	TIR (%/a.a.)
1	13	-	9,38
2	13	9	12,62
3	18	9, 13	14,25
4	22	9, 13, 18	14,83
5	26	9, 13, 18	13,76
6	28	9, 13, 18	13,80

Sendo TIR a taxa interna de retorno ao ano; e os regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.

5.17.4 Razão benefícios sobre custos (B/C)

A exequibilidade econômica e operacional dos regimes de manejo, simulados no Diagrama de Manejo da Densidade dos povoamentos de *Pinus taeda* L. para os custos e preços de sortimentos relacionados anteriormente, foi determinada pela razão entre os benefícios sobre os custos totais, atualizados a uma taxa de juros de 6,75% a.a., avaliada nos dados da Tabela 41 e Figura 39.

Tabela 41 – Razão dos benefícios totais sobre os custos totais dos regimes de manejo para *Pinus taeda* L. Data: 30/04/2010.

Regime de manejo	Corte final (ano)	Desbastes Idade (ano)	Receitas futuras R\$ha⁻¹	Despesas futuras R\$ha⁻¹	Razão B/C
1	13	-	22.497,1	17.539,2	1,28
2	13	9	29.106,2	17.539,2	1,66
3	18	9, 13	60.943,0	26.602,5	2,29
4	22	9, 13, 18	101.910,4	36.315,1	2,81
5	26	9, 13, 18	129.360,1	48.827,8	2,65
6	28	9, 13, 18	145.649,6	56.483,0	2,58

Sendo B/C a razão dos benefícios totais sobre os custos totais e os regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.

O regime de manejo com a realização de três desbastes, aos 9, 13 e 18 anos, e corte final aos 22 apresentou a maior razão entre os benefícios sobre os custos totais, igual a 2,81, atualizado a uma taxa de juros de 6,75% a.a. Este valor indicou que os investimentos em reflorestamento com estas espécies, sob o regime de manejo considerado, propiciam retorno econômico a uma proposição de aproximadamente 2,8:1, ou seja, de cada unidade monetária investida, o retorno líquido ao proprietário é de cerca de 2,8 vezes esse valor. Este resultado é significativo, demonstrando a atratividade econômica dos reflorestamentos com *Pinus taeda* L. quando manejados sob a prescrição do regime de manejo descrito, pois garante um retorno econômico seguro ao capital investido.

Os demais valores da razão dos benefícios sobre os custos também foram atrativos economicamente, sendo encontrada a menor razão no regime de manejo 1, igual a 1,28.

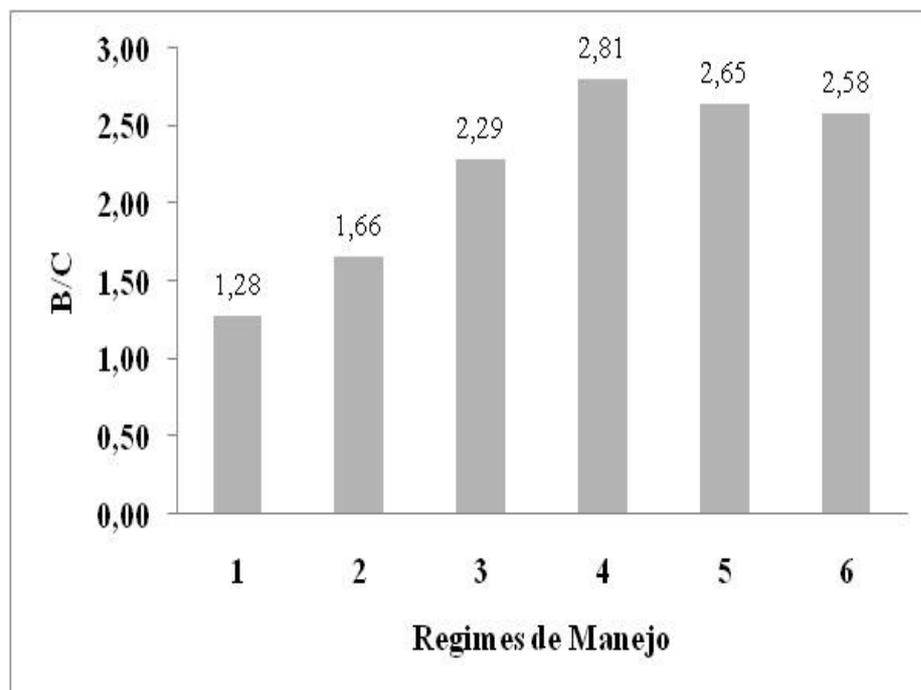


Figura 41 – Razão benefícios sobre custos dos regimes de manejo utilizados na condução de **povoamentos** de *Pinus taeda* L. Regimes de manejo: 1 – sem desbaste e corte final aos 13 anos; 2 – com um desbaste e corte final aos 13 anos; 3 – com dois desbastes e corte final aos 18 anos; 4 – com três desbastes e corte final aos 22 anos; 5 – com três desbastes e corte final aos 26 anos; e 6 – com três desbastes e corte final aos 28 anos. Data: 30/04/2010.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, realizado para modelar a estrutura da produção de *Pinus taeda* L. com base no Diagrama de Manejo da Densidade para condução em sistema de alto fuste, permitiram chegar às seguintes conclusões:

- a) os modelos propostos por Reineke, Yoda, Zeide e Tang, Meng e Meng, para ajustar a densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio do povoamento, apresentam boa precisão estatística, sendo que o modelo de Tang, Meng e Meng mostrou maior acurácia e eficiência que os demais;
- b) a dimensão do diâmetro médio no ponto em que inicia o autodesbaste na população varia consideravelmente com a densidade de árvores implantadas por hectare;
- c) para todos os espaçamentos de plantio analisados, não se comprova o valor do coeficiente angular de $-3/2$ proposto por Tang, Meng e Meng estabelecido universalmente como valor fixo da lei de autodesbaste, sendo este valor dependente do espaçamento inicial de plantio;
- d) o limite de autodesbaste de populações menos densas, com menor espaçamento inicial, ocorre com um diâmetro médio um pouco inferior àquele obtido com o de máxima densidade, sendo este diretamente proporcional à densidade de árvores por hectare quando da implantação da floresta, quanto maior o espaçamento inicial, maior o diâmetro médio no momento do início do autodesbaste da população;
- e) o incremento corrente anual em diâmetro entre o 6º e o 7º ano, quando relacionado com a densidade relativa, permite identificar as zonas de crescimento: espaço excessivo, crescimento, estoque completo e iminente mortalidade;
- f) as linhas que delimitam as zonas de concorrência permitem projetar com acurácia a trajetória do povoamento pela densidade populacional, identificando o diâmetro dos desbastes e da idade de corte final;
- g) os índices de Densidade do Povoamento variam entre o valor mínimo de 600 até o máximo de 1400, permitindo cobrir toda a amplitude da densidade populacional e os efeitos da mortalidade natural;
- h) os diagramas de Manejo da Densidade elaborados com as variáveis diâmetro médio, área basal e volume por Índice de Densidade do Povoamento mostram-se

eficientes e permitem estimar os valores de diâmetro médio, o número de árvores e o volume por hectare com acurácia;

- i) as estimativas de volume por hectare no DMD em relação aos valores reais apresentou uma eficiência igual a 0,99, o que comprova alta acurácia;
- j) as distribuições de probabilidade Normal, Ln-normal, Weibull e Gama descrevem com acurácia a frequência de árvores por classe de diâmetro. No entanto, a função de Weibull com dois parâmetros foi utilizada para prognosticar as probabilidades de frequência por classe de diâmetro no tempo, devido à simplicidade de ajuste, à eficiência e à praticidade de emprego, embora seja um pouco menos precisa que a função Weibull com três parâmetros;
- k) a forma de tronco das árvores ajustada pelo polinômio do 5º grau, permite fazer as melhores estimativas dos diâmetros relativos;
- l) entre os regimes de manejo simulados, o maior Valor Presente Líquido ocorre no regime de manejo 4, com desbastes aos 9, 13 e 18 anos e corte final aos 22 anos, com valor igual a R\$ 15.587,6 ha⁻¹.
- m) a comparação dos regimes de manejo pela equivalência dos horizontes de planejamento aos 28 anos, realizado pelo Valor Anual Equivalente, indica o regime de manejo 4 como o de maior eficiência econômica;
- n) a taxa interna de retorno em todos os regimes de manejo simulados é atrativa, variando de 9,38% a.a. no regime de manejo sem desbaste e corte final aos 13 anos a 14,83% a.a. no regime de manejo com três desbaste e corte final aos 22 anos, sendo este o regime de maior retorno de investimento;
- o) a razão dos benefícios sobre os custos totais mostra todos os regimes de manejo economicamente atrativos, com os benefícios econômicos superando os custos totais de investimento para uma taxa de juro de 6,75% a.a., tendo o regime de manejo 4 atingido o maior valor, igual a 2,81.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, E. **Modelagem da prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 2000. 70 f. Tese (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

AHRENS, S. Análise de componentes principais e a simulação da forma de tronco. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS: o uso de funções de forma de tronco em estudos de volumetria de espécies florestais, 5., 1982, Curitiba. **Anais...** Curitiba: EMBRAPA, URPFCs, 1982. p. 77-92.

ALBUQUERQUE, J. L. **Avaliação econômica de alternativas de financiamento da produção florestal no Estado de Minas Gerais**. Viçosa. 1993, 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

ALDER, D. **Forest volume estimation and yield prediction: yield prediction**. v. 2. Roma. FAO. 1980. 194 p.

ALFARO, L. G. G. **Localização econômica dos reflorestamentos com eucaliptos, para a produção de carvão vegetal, no Estado de Minas Gerais**. 1985. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1985.

ÁLVAREZ, J. G. **Análisis y caracterización de las distribuciones diamétricas de *Pinus pinaster* Ait. En Galicia**. 1997. 269 f. Tese (Doutorado em Ingenieros de Montes) – Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 1997.

ALVES, A. A. M. **Planejamento da empresa florestal: teoria da explorabilidade**. 2. ed. Lisboa: Sociedade Astória. 1966. 179 p.

ALVES, A. A. M. **Técnica de produção florestal: fundamentos, tipificação e métodos**. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Científica, 1982. 331 p.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 49, n. 268, p. 765-769, dez.1954.

ANDO, T. **Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand**. Tokyo: 1968. 153 p. (Bull. Gov. For. Exp. Station n. 210)

ANDO, T. et al. **Studies on the system of density control of sugi (*Cryptomeria japonica*) stand**. Tokyo: 1968. 76 p. (Bull. Gov. For. Exp. Station n. 209)

ANDRAE, F. H. **Ecologia florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1978. 230 p.

ARCHIBALD, D. J.; BOWLING, C. **Jack pine density management diagram for boreal.** Ontario: Northeast Science & Technology NEST Technical Note TN-005, 1995. 19 p.

ASSMANN, E. **Principles of forest yield study.** New York: Pergamon Press, 1970. 506 p.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements.** 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 1994. 400 p.

BAILEY, R. L. Computer programs for quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, Bethesda, v. 20, n. 3, p. 229, set. 1974.

BAILEY, R. L. et al. A compatible model relating slash pine plantation survival to density, age, site index and type and intensity of thinning. **Forest Science**, Bethesda, v. 31, n. 1, p. 181-189, mar. 1985.

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

BARRETO, L. S. The clarification of self-thinning and thinning: a simulation approach. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 2, n. 2, p. 233-238, 1994.

BATISTA, J. L. F. **A função Weibull como modelo para a distribuição de diâmetro de espécies arbóreas tropicais.** 1989. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BEATTLE, B. R. F.; TAYLOR, C. R. **The economics of production.** Montana State University, John Wiley and Sons, 1985. 258 p.

BELCHER, D. M.; CLUTTER, J. L. Yield of slash pine plantations in the Georgia and North Florida coastal plain. **School of Forest Resources**, v. 2, n. 1, p. 52. 1977.

BIGIG, G. S. Taper equations for second mixed-conifers of Northean California. **Forest Science**, Bethesda, v. 30, n. 4, p. 1103-1117, 1984.

BORDERS, B. E. et al. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. **Forest Science**, Bethesda, v. 33, n. 2, p. 570-576, jun. 1987.

BUCHMAN, R. G.; PEDERSON, S. P.; WALTERS, N. R. A tree survival model with application to species of the Great Lakes region. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v. 13, p. 601-608, 1983.

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

BURKHART, H. E. **Estimating growth and mortality.** Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1974. 15 p.

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

CAO, Q. V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, Bethesda, v. 50, n. 4, p. 682-685, ago. 2004.

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

CARELLI NETO, C. **Dinâmica da distribuição diamétrica de *Pinus taeda* L. de diferentes idades e espaçamentos**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CELLINI, J. M. et al. Modelos de perfil de tronco en *Nothofagus pumilio* (Polp. et Endl.) Krasser y su utilización en el cálculo del volumen total. **Invest. Agr. Sist. Recr. For.**, Madrid, v. 11, n. 2, p. 245-261, 2002.

CHICHORRO, J. F. **Avaliação econômica de experimentos de *Eucalyptus grandis* no cerrado de Minas Gerais**. 1987. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1987.

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley and Sons, 1983. 333 p.

CLUTTER, J. L.; BELCHER, D. M. Yield of sitep repared slash pine plantations in the lower coastal plain of Georgia and Florida. In: **Growth models for long-term forecasting of timber yields**. Blacksburg: IUFRO, School of Forestry and Wildlife Resources, State Unversity. 1978. p. 53-70.

COUTO, H. T. Z. **Distribuições de diâmetros em plantações de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea***.1980. 83 f. Tese (Livre Docência da Universidade de São Paulo) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1980.

CURTIS, R. O. A simple index of stand density for Douglas-fir. **Journal Forestry**, Society of American Foresters.v. 28, p. 92-94, 1982.

CURTIS, R. O. Yield tables past and present. **Journal Forestry**, Society of American Foresters. v. 70, p. 28-32, 1972.

DAVIS, K. P. **Forest management: regulation and valuation**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1966. 519 p.

DEL RIO, M. **Régimen de claras y modelo de producción para *Pinus sylvestris* L. en los sistemas Centrale Ibérico**. 1998. 219 f. Tese (Doutorado em Ingenieros de Montes) – Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 1998.

DEL RIO, M.; MONTERO, G.; BRAVO, F. Analysis of diameter-density relationships and self-thinning in non-thinned even-aged Scots pine stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 142, p. 79-87, 2001.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, Bethesda, v. 18, n. 3, p. 241-245, 1972.

DREW, T. J.; FLEWELLING, J. W. Some recent Japanese theories of yield density relationships and their application to Monterey pine plantations. **Forest Science**, Bethesda, v. 23, p. 517-534, september, 1977.

DREW, T. J.; FLEWELLING, J. W. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. **Forest Science**, Bethesda, v. 25, p. 518-532, 1979.

EMBRAPA. **Zoneamento Pedoclimático para *Pinus taeda* no Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 21 p. CD-ROM. (Embrapa Solos. Documento n. 10).

FAO/SWE/TF. **An introduction to planning forestry development**. ROMA: FAO, 1984. 86p.

FARNDEN, C. **Stand density management diagrams for lodgepole pine, white spruce and interior Douglas-fir**. Canadian Forest Service. Pacific Forestry Centre. Information Report BC-X-360. Canadá: 1996. 41 p.

FARO, C. **Elementos da Engenharia Econômica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1979. 328 p.

FINGER, C. A. G. **Distribuição de diâmetros em acácia-negra *Acacia mearnsii* de Wild em diferentes povoamentos e idades**. 1982. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.

FLOTZ, B. W.; JOHNSTON, W. F. **Cross basal area growth of Northern White Ceder is independent of stand density over a wide range**. USA: Forest Service Research, 1967. (NOTE NC – 61).

FURNIVAL, G. M. An index for comparing equations used in constructing volume tables. **Forest Science**, Bethesda, v. 7, n. 4, p. 337-441, 1961.

GADOW, K. V. Die Erfassung von Durchmesservertelungen in gleichaltigen Kiefernbeständen. **Forstweiss**, Freising, v. 103, p. 369-374, 1984.

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

GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Washonthon: Coll. Forest. Resourc., Inst. Forest Prod. Univ. Wash, 1979. 64 p. (Contrib. 36)

GARCÍA GÜEMES, C.; CAÑADAS, N.; MONTERO, G. Modelización de la distribución diamétrica de las masas de *Pinus pinea* L. de Valladolid (España) mediante la function Weibull. **Invest. Agr. Sist. Recur. For.**, Madrid, v. 11, p. 263-282, 2002.

GARLIPP, R. C. D. **Aspectos econômicos da produtividade e da idade de corte em florestas de eucalipto**, Circular Técnica IPEF, n. 84, 21 p. 1979.

GINGRICH, S. R. Mearning and avaliating stocking and stand density in upland hardwood forests in the central states. **Forest Science**, Bethesda, v. 13, n. 1, p. 28-53, feb. 1967.

GLUFKE, C. **Crescimento de *Pinus elliottii* E. em povoamento desbastado**. 1996. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 1996.

GOULD, W. **Maximum Likelihood Estimation With Stata**. Taylor & Francis, 2006. 290 p.

HAFLEY, W .L.; SCHREUDER, H. T. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v. 4, n. 3, p. 481-487, set. 1977.

HAMILTON, D. A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of northern Idaho. **Forest Science**, Bethesda, v. 32, p. 989-1000, 1986.

HAMILTON, D. A. **Event probabilities estimated by regression**. USDA For. Serv. Intermt. Res. Stn. Res. Pap. INT-152, 1974. 18 p.

HARRINGTON, T. B. **Silvicultural approaches for thinning Southern Pines**: Method. intensity and timing. USA: University of Georgia. Publ. n. FSP001, 1997. 17 p.

HARTER, H. L.; MOORE, A. H. Maximum likelihood estimation of the parameters of the Gama and Weibull populations from complete and from censored samples. **Technometrics**, Washington, v. 7, n. 4, p. 639-643, nov. 1965.

HIBBS, D. E. The self-thinning rule and red alder management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 18, n. 4, p. 273-281, 1987.

HILEY, W. E. **Conifers**: South African methods of cultivation. London: Faber and Faber, 1959. 123 p.

HOHENADL, W. Der aufbau der Baumschafte. **FwcbI**, Freising, v. 46, p. 496-509, 1924.

HRADETZKY, J. Spline-funktion und ihre Anwendung in der forstlichen Forschung. **FwcbI**, Freising, n. 100, p. 45-59, 1981.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BERRS, T. W. **Forest Mensuration**. New York: The Ronald Press Co., 1972. 410 p.

JOHNSON, N. L.; KOTZ, S. **Distributions in statistics: Continuous univariate distributions - 2.** New York: Wiley, 1970. 307 p.

JOKELA, P. R. **Die Schaffformfunktion der Fichte und die Bestimmung der Sortimentsanteile am Stehendem Stamm.**1974. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Zurich, Zurich, 1974.

JORGE, L. A. B.; LARA, H. A. Programa de sortimento de madeira serrada de povoamentos de *Pinuselliottii* com alternativas de produtos padronizados. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 1993. p. 539-544.

KIRA, T.; OGAWA, H.; SAKAZAKI, N. Intraspecific competition among higher plants. I. Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations. **Journal Polytechnic**, Osaka City University, v. 4, n. 1, p. 1-16, 1953.

KIVISTE, A.; GONZÁLES, J. G.; ALBORECA, A. R. et al. **Funciones de crecimiento de aplicación em el âmbito forestal.** Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 2002. 190 p.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. Taper functions and their applications in forestry inventory. **Forest Chronicle**, Mattawa, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.

KUMAR, B. M.; LONG, J. N.; KUMAR, P. A density management diagram for teak plantations of Herala in peninsular India. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 74. p. 125-131, 1995.

LAASASENAHO, J.; KOIVUNIEMI, J. Dependence of some stand characteristics on stand density. **Tree Physiology**, Oxford, v. 7, p. 183-187, december, 1990.

LARSON, P. R. Some indirect effects of environment on wood formation. In: ZIMMERMANN, M. H. New York: Academic, 1964. p. 345-365.

LEE, E. T. **Statistical methods for survival data analysis.** Belmont: Lifetime Learning, 1980. 557 p.

LEE, Y. L. Predicting mortality for even-aged stands of lodgepole pine. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 47, n. 1, p. 29-32, 1971.

LEITE, H. G. et al. Um modelo para estimar a produção de madeira para celulose e energia derivado da função Weibull. **Revista Árvore**, Viçosa, v.14, p.102-118, 1990.

LITTLE, S. N. Weibull diameter distributions for mixed stands of western conifers. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v. 13, n. 1, p. 85-88, fev. 1983.

LIVESEY, F. **Formação de preço.** São Paulo: Saraiva, 1978. 150 p.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest Inventory**. München: BLV. Verlagsgesellschaft mbH, 1973. 469 p.

LONG, J. N.; SMITH, F. W. Relation between size and density in developing stands: a description and possible mechanisms. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 7, p. 191-206, january, 1985.

LOPES, H. V. S. **Análise econômica dos fatores que afetam a rotação de povoamentos de Eucaliptos**. 1990. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

MALTAMO, M. et al. Comparison of percentile based prediction an the Weibull distribution in describing the diameter distribuiton of heterogeneous scots pine stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 133, n. 3, p. 263-274, ago. 2000.

MALTAMO, M.; PUUMALAINEN, J.; PÄIVINEN, R. Comparison of Beta and Weibull functions for modeling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. **Scand. Jor. For. Res.**, v. 10, p. 284-295, 1995.

MINISTRY OF FORESTRY. **Guidelines for developing stand density management**. Canadá: Britsh Columbia Forest Service, 1999. 94 p.

MITCHELL, H. C. Regulation of farm woodlands by rule of thumb. **Journal Forestry**, Society of American Foresters, n. 41, p. 243-248, 1943.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 113, p. 109-123, 1998.

MOTTA, F. S.; BEIRSDORF. M. J. C.; GARCEZ. R. B. **Zoneamento agrícola do Rio Grande do Sul e Santa Catarina: normas agro-climáticas**. Pelotas: Ministério da Agricultura, 1971. 80 p.

NOGUEIRA, G. S. et al. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 579-589, 2005.

NORONHA, J. F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1987. 269 p.

OSAWA, A.; ALLEN, R. Allometric theory explains self-thinning relationships of mountain beech and red pine. **Ecology**, v. 74, n. 4, p. 1020-1032, 1993.

PALAHÍ, M.; MIIMA, J.; MONTERO, E. Stand-level Yield model for sots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. **Invest. Agr. Sist. Recr. For**, Madrid, v. 11, n. 2, p. 409-424, 2002.

PENNER, M. et al. A stand density management diagram for Balsam Fir in New Brunswick. In: Fundy Model Forest Network. **Canadian Forest Service**, Ottawa, 2002. 12 p.

PETERS, R. **Konstruktion eines Massentafelmodells-dargestellt am Beispiel der Baumart *Araucaria araucana* (Moh.) C. Koch.** 1971. 95 f. Tese (Doutorado) – Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 1971.

PRODAN, M. **Holzmesslehre.** Frankfurt am Main: J.D. Saurländer's Verlag, 1965. 644 p.

PRODAN, M.; et al. **Mensura Forestal.** San José: GTZ, 1997. 561 p.

REID, R. Diameter-basal area ratio as a practical stand density measure for pruned plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233. p. 375-382, 2006.

REID, R. Silvicultural management of Australian blackwood (*Acacia melanoxylon*) in plantations and multi-purpose forests. In: GOVE, J. H. Structural stocking guides: a new look at an old friend. **National Research Council Canada**, v. 34, n. 5, 2004.

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

REINSTORF, L. O. **The influence of stand density on growth of *Pinus elliottii*.** 1970. 62 f. Dissertação (Mestrado) – University of Stellenbosch, Stellenbosch, 1970.

RENNOLS, K.; PEACE, A. Flow models of mortality and yield for unthinned forest stands. **Forestry**, Edinburg, v. 1, p. 47-58, 1986.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais.** Viçosa: UVF, 2001. 389 p.

REZENDE, J.L.P. **Avaliação de projetos florestais.** Imprensa Universitária Viçosa/UFV-MG, 1995. 33p.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, v. 10, p. 290-300, 1959.

ROW, C.; GUTTENBERG, S. Determining weight volume relationship for SAW Longs. **Forest Products Journal**, Madison, v. 16, n. 5, p. 39-47, 1966.

SANQUETTA, C.R. et al. Matriz de transição para simulação da dinâmica de florestas naturais sob diferentes intensidades de corte. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.6, n.1, p.65-78, 1996.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina.** Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173 p.

SAS Institute Inc. **SAS/STAT user's guide**. Version 8 (computer manual). SAS Institute Inc. Cary. N.C. 1999.

SAS Institute. SAS User's Guide: Statistics. **PROC CAPABILITY and General Statements**. Disponível em: <<http://www.asu.edu/sas/sasdoc/sashtml/qc/index.htm>>. Acesso em: 23 nov. 2007.

SAUNDERS, M. R.; PUETTMANN, K. J. **A preliminary white spruce density management diagram for the lake states**. University of Minnesota, Dep. of For. Res, 2000. 13 p.

SAWINSKI JÚNIOR, J. **Rentabilidade econômica comparativa entre Pinus, eucalipto, erva-mate e as principais culturas agrícolas da microrregião de Canoinhas – SC**. 2000. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2000.

SCHIFFEL, A. Form und Inhalt der Fichte. Mitteilungen aus dem forstlichen Versuchswesen H.24, Wien: **Forstlichen Versuchswesen**, 1905.

SCHNEIDER, P. R. **Betriebswirtschaftliche und ertragskundliche Grundlagen der Forsteinrichtung in Sudbrasilien am Beispiel von *Pinus elliottii***. 1984. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Albert-Ludwigs Universität Freiburg, Freiburg Alemanha, 1984.

SCHNEIDER, P. R. et al. Análise da mortalidade de *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 137-143, 2005.

SCHNEIDER, P. R. **Rentabilidade em investimento florestal**. Santa Maria: FACOS/UFSM, 2006. 153 p.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2. ed. Santa Maria: UFSM. 2008. 566 p.

SCHNEIDER, P. S. P. **Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade em povoamentos de *Pinus taeda* L**. 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SHERRY, S. P. The effect of stands density and site upon the yield and profitability of wattle plantations. **Rep. Wattle Res. Inst.**, p. 39-45, 1966.

SILVA, J. A. A. da; BAILEY, R. L. Considerações teóricas sobre o uso concreto do Índice de Furnival e na seleção de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 3, p 323-327, set./dez. 1991.

SMALLEY, G. W.; BAILEY, R. L. Yield tables and stand structure for loblolly pine plantations in Tennessee. **Alabama and Georgia highlands**. Washington: USDA, 1974. 81 p.

SMITH, D. J.; WOODS. M. E. **Red pine and white pine density management diagrams for Ontario**. Ontario: Ministry of Natural Resources Southcentral Sciences Division. Sault Ste. Marie, 1997. 31 p. (Tech. Rep., 48).

SMITH, N. J.; HANN. D. W. A growth model based on the self-thinning rule. **Canadian Journal Research**, New Westminster, v. 16, p. 330-334, 1986.

SOMERS, G. L.; FARRAR JR., R. M. Biomathematical growth equations for natural longleaf pine stands. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 1, p. 227-244, mar. 1991.

SOUZA A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos – fundamentos, técnicos e aplicações**. 3. Ed. São Paulo. Atlas. 1999. 142 p.

SPEIDEL, G. **Betriebswirtschaftliche**. Hamburg: Paul Parey Verlag, 1967. 189 p.

SPIECKER, H. Durchforstungsansätze bei Eiche unter besonderer Berücksichtigung des Dickenwachstums. **Allgemeine Forstzeitschrift - u. J. -Ztg.**, v. 154, n. 2, p. 21-36, 1983.

SPURR, S. **Forest inventory**. New York: The Ronald, 1952. 476 p.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw-Hill, 1960. 481 p.

STERBA, H. **Ertragskundliche hypothese uber den Standort**. 1975. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Naturais)–Universität für Bodenkultur, Wien, Hochschule für Bodenkultur, 1975.

STERBA, H.; MONSERUD, R. A. The maximum density concept applied to uneven-aged mixed-species stands. **Forest Science**, Bethesda, v. 39. n. 3. p. 432-452. 1993.

TADAKI, Y. **The pre-estimating of stem yield bases on the competition density effect**. Tokyo: Gov. For. Exp. Stn, 1963. 17 p. (Bull, 154)

TANG, S. ; MENG, F. R.; MENG, C. H. A growth and self-thinning model for pure even-aged stands: theory and applications. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 70, p. 67-73, 1994.

TANG, S.; MENG, F. R.; MENG, C. H. The impact of initial stand density and site index on maximum stand density index and self-thinning index in a stand self-thinning model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 75, p. 61-68, 1995.

VAN LAAR, A. **Biometrische Methoden in der Forstwissenschaft. Teil I: Verfahrensgrundlagen**. South Africa: University Stellenbosch, 1979. 385 p.

VAN LAAR, A. Influence of the parameter and stand density on diameter growth of *Pinus radiata*. **South African Forestry Journal**, Pretoria, v. 70, p. 5-15, 1969.

VEIGA, R. A. A.; BRISTER, G. H. Avaliação de funções de rendimento para plantações de *Pinus elliottii* no sudeste dos Estados Unidos da América. **Revista Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 715-719, 1983.

WEIBULL, W. **The phenomenon of rupture in solids**. Ingeniors Vetenskaps Academia, n. 153, 1939.

WEST, P. W.; BOUROUGH, C. J. Tree supervision and the self-thinning. Rule in a monoculture of *Pinus radiata* D. Don. **Annals of Botany**, v. 52, p. 149-158, 1983.

WESTOBY, M. The place of the self-thinning rule in population dynamics. **American Naturalist**, Chicago, v. 118, p. 581-587, 1981.

WILSON, F. G. Numerical expression of stocking in terms of height. **Journal Forestry**, v. 44, p. 758-761, 1946.

YODA, K. et al. Self-thinning in overrowed pure stands under cultivated and natural conditions. **Journal Biology**, v. 14, p. 107-129, jan./dec., 1963.

ZEIDE, B. A relationship between size of trees and their number. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 72, p. 265-272, 1995.

ZEIDE, B. Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. **Forest Science**, Bethesda, v. 33, n. 5, p. 17-537, 1987.

ZEIDE, B. Self-thinning and stand density. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, p. 517-523, 1991.

ANEXOS

Anexo A – Rendimentos operacionais, custos e insumos utilizados em um investimento florestal.

Espécie: *Pinus taeda* L.
Sistema de manejo: Alto fuste

Espaçamento: 3,0x 2,0 m
Data: 30/04/2010

I. PREPARO DA ÁREA E PLANTIO – ÁREA DE CAMPO				
I.1. Operações mecânicas		Prod. h/ha	Custo R\$/h	Total R\$/ha
1. Limpeza da área		1,0	196,67	52,95
2. Construção e manutenção de estradas e aceiros(motoniveladora)		2,9	215,97	108,92
3. Pulverização com herbicida		1,0	196,67	780,62
4. Subsolação (trator de pneu)		2,2	196,67	77,15
5. Distribuição de mudas (carreta agr. 4 t.)		0,8	196,67	90,77
Subtotal				1.085,0
I.2. Operações manuais		Prod. h/ha	Custo R\$/h	Total R\$/ha
1. Serviços de topografia		-	-	52,95
2. Marcação de infraestrutura		2,4	45,38	108,92
3. Plantio (1.666 mudas/ha 119 mudas/h)		12,0	65,05	780,62
4. Replantio (10% - 35 mudas/h)		1,2	64,29	77,15
5. Construção e manut. de cerca (ref. 200 ha)		-	-	90,77
6. Controle de formiga (2 distrib. + 2 acomp.)		2,78	48,43	134,64
Subtotal				1.245,05
I.3 Materiais	un.	Quant. ha	Custo R\$/un.	Total R\$/ha
1. Mudas (plantio + replantio)	mil.	1832	0,35	421,4
2. Formicida Dinagro(2dist. 8 kg+2Ac.3 kg)	kg	3,0	7,87	15,6
3. Herbicida glifosate	l.	0,8	30,26	16,0
Subtotal				685,31

I.4 Transporte de materiais (R\$ 1.300,00/viagem)		Total R\$/ha
1. Mudas para plantio (81.000/viagem = 42,21 ha)		40,85
2. Mudas para replantio (81.000/viagem = 487,95 ha)		4,54
3. Herbicida glifosate		13,62
Subtotal		59,00
TOTAL DE IMPLANTAÇÃO		3.540,00
II. MANUTENÇÃO		
II.1 Operações	Ano	Custo (R\$/ha)
1. Manutenção geral + combate de formiga + coroamento + roçada	1	350,0
2. Manutenção geral + combate de formiga	2	100,0
3. Manutenção geral + desrama + roçada	3	330,0
4. Manutenção geral	4	100,0
5. Manutenção geral + desrama	5	320,0
6. Manutenção geral	6	100,0
7-R. Manutenção geral	7-R	100,0

Anexo B – Programação dos modelos de probabilidade da distribuição diamétrica.

```

=====
* AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA EM POVAMENTOS FLORESTAIS
* MÉTODO CAPABILITY
* FUNÇÕES: WEIBULL, GAMA, NORMAL E LOGNORMAL
=====
* IDADE = IDADE DO POVOAMENTO
* TRAT = TRATAMENTO (ESPAÇAMENTO)
* REP = REPETIÇÃO DOTRATAMENTO
* ARVORE = ÁRVORES DO TRATAMENTO
* CAP = CIRCUNFERÊNCIA À ALTURA DO PEITO
* H = ALTURA DA ÁRVORE
=====;
GOPTIONS FTEXT=NONE HTEXT=1 CELL;
DATA DADOS;
LABEL DAP='DAP(CM)';
INFILE 'C:/DADOS_CAO.DAT'EXPANDTABS;
INPUT OBS IDADE TRAT BLOCO ARVORE CAP H DAP G H0 N;
IF DAP EQ 0 THEN DELETE;
IF DAP LT 6 THEN DELETE;
LABEL DAP = 'DAP (cm)';
IF DAP EQ 0 THEN DELETE;
SYMBOL1 C = BLACK V = NOME1 = 1; /* HISTOGRAMA OUTLINE */
PATTERN1 C = GRAY V = S R = 3;
TITLE1 'Distribuicao Diametrica';
PROCSORT DATA=DADOS; BY IDADE TRAT; *Determinação por idade;
BY IDADE TRAT;
PROCCAPABILITY DATA = DADOS NOPRINT GRAPHICS;
VAR DAP;
SPECS LSL = 0 CLSL = BLACK LLSL = 1
USL = 44 CUSL = BLACK LUSL = 1;
HISTOGRAM /
MIDPOINTS = 0 TO 44 BY 2
NORMAL (COLOR = BLACK L = 1)
LOGNORMAL(COLOR = RED L = 1)
WEIBULL (COLOR = GREEN L = 1)
GAMA (COLOR = YELLOW L = 1)

```

```

LEGEND = LEGEND1
CFRAME = WHITE;
INSET N MEAN = 'Média' (5.3) STD = 'S' (5.3) SKEWNESS = 'Assimetria' (5.3) KURTOSIS =
'Curtose' (5.3)/
HEADER = 'RESUMO DAS ESTATISTICAS'
POS = NE
CFILL = WHITE
CTEXT = BLACK;
LEGEND1 CFRAME = WHITE CBORDER = BLACK;
BY IDADE;
RUN;
QUIT;
/*****
/* ESTIMATIVA DA EQUAÇÃO DE WEIBULL COM TRÊS PARÂMETROS */
/* KEYS: CAPABILITY ANALYSIS, WEIBULL DISTRIBUTION, */
/* PROCS: CAPABILITY NLP MACRO */
*****/
OPTIONS PS=60 LS=80;
GOPTIONS FTEXT=NONE HTEXT=1 CELL;
DATA WIRE;
INFILE 'C:/DADOS_CAO.DAT' EXPANDTABS;
INPUT OBS IDADE TRAT BLOCO ARVORE CAP H DAP G HD NH;
IF DAP LT 6 THEN DELETE;
/*-----*/
/* WEIBULL ( TRES PARAMETROS ) */
/*-----*/
PROC UNIVARIATE DATA=WIRE NOPRINT;
VAR DAP;
OUTPUT OUT=STATS N=SS MIN=MINX RANGE=RANGE;
RUN;
PROC TRANSPOSE DATA=WIRE OUT=ROW;
VAR DAP;
RUN;
DATA INTVALS;
MERGE ROW STATS;
THETA1= MINX - .02*RANGE;
CALL SYMPUT('SS',LEFT(SS));
CALL SYMPUT('THETA1',LEFT(THETA1));

```

```

RUN;
PROCCAPABILITY DATA=WIRE NOPRINT;
VAR DAP;
HISTOGRAM / WEIBULL(THETA=&THETA1 NOPRINT)
OUTFIT=PARMS1 NOPLOT;
RUN;
DATA STATS;
MERGE INTVALS PARMS1;
RUN;
DATA PARMS(TYPE=EST);
SET STATS;
KEEP _TYPE_ SIG C THETA;
_TYPE_='PARMS'; SIG = _SCALE_;
    C = _SHAPE1_;
    THETA = _LOCATN_; OUTPUT;
_TYPE_='LB'; SIG = 0.;
    C = 0.;
    THETA = .; OUTPUT;
_TYPE_='UB'; SIG = .;
    C = .;
THETA = MINX; OUTPUT;
RUN;
/* USO PROC NLP NA ITERATIVIDADE PARA ESTIMAR PARAMETROS */
PROCNLP DATA=STATS INEST=PARMS TECH=NRRIDG FD PHES OUTEST=VALUES;
ARRAY COL{*} COL1-COL&SS;
MIN LOGF;
PARMS SIG, C, THETA;
SUM1 = 0;
SUMLOGX = 0;
DO I=1 TO SS;
COLI = COL{I} - THETA;
SUMLOGX = SUMLOGX + LOG(COLI);
SUM1 = SUM1 + ((COLI/SIG)**C);
END;
LOGF = SUM1 - SS*LOG(C) + SS*C*LOG(SIG) - (C-1)*SUMLOGX;
RUN;
DATA VALUES;

```

```
SET VALUES;
IF _TYPE_="PARMS" THEN OUTPUT; ELSE DELETE;
KEEP SIG C THETA;
CALL SYMPUT('SIG',LEFT(SIG));
CALL SYMPUT('C',LEFT(C));
CALL SYMPUT('THETA',LEFT(THETA));
RUN;
OPTIONS NODATE;
PROCPRINT DATA=VALUES NOOBS; RUN;
PROCCAPABILITY DATA=WIRE NOPRINT GRAPHICS;
VAR DAP;
HISTOGRAM / WEIBULL(C=&C SIGMA=&SIG THETA=&THETA
COLOR=BLACK)
CFRAME = WHITE
CFILL = GRAY
CBARLINE = BLACK;
INSET N MEAN = 'MEDIA' (5.3) STD = 'S' (5.3) SKEWNESS = 'ASSIMETRIA' (5.3)
KURTOSIS = 'CURTOSE' (5.3)/ HEADER = 'RESUMO ESTATISTICO'
POS = NE
CFILL = WHITE
CTEXT = BLACK;
LEGEND1 CFRAME=WHITE CBORDER=BLACK;
RUN;
QUIT;
GOPTIONS RESET=ALL;
```

Anexo C– Lista de equações

Número	Equações
1	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (1/t)$
2	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot \ln t + b_2 \cdot \ln^2 t$
3	$\ln y = b_1 \cdot \ln t + b_2 \cdot \ln^2 t$
4	$\ln y = t^2 / (b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2)$
5	$y = b_0 \cdot (1 - e^{(-b_1 \cdot t)})$
6	$P = \{1 + \exp(b'x)\}^{-1}$
6a	$PM = \{1 + \exp(b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i)\}^{-1}$
7	$\ln(N) = a_1 - b_1 \ln(d)$
8	$\ln(N) = a_1 - b_1 \ln(d) - c_1 \ln^2(d)$
9	$\ln(N) = \alpha - \beta \ln(d) + \chi h \ln(d)$
10	$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[(d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right]$
11	$\delta = (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma}$
12	$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[(d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \right]$
13	$G = a \cdot d^b$
14	$DR = G(d^b)$
15	$\ln \bar{v} = b_o + b_1 \cdot \ln N^{b_2}$
16	$\ln \bar{v} = b_o + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln d$
17	$\ln \bar{v} = b_o + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G$
18	$\bar{v} = b_o + b_1 \cdot (d \cdot h)^{b_2}$
19	$\ln \bar{v} = b_o + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln h$

$$\bar{v} = \frac{1}{(b_0 \cdot h_{100}^{b_1} + b_2 \cdot N \cdot h_{100}^{b_3})}$$

$$\bar{G} = \frac{\pi \bar{d}^2}{4} \cdot N$$

$$V = N \cdot \bar{v}$$

$$f(x) = \frac{h \cdot 100}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

$$f(x) = \frac{h \cdot 100}{\sigma_{(x-a)} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x-a)-\mu}{\sigma^2} \right)^2}$$

$$f(x) = \frac{\beta h \cdot 100}{\sigma} \left(\frac{x-\alpha}{\sigma} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x-\alpha}{\sigma} \right)^\beta \right]$$

$$f(x) = \frac{h \cdot 100}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{x}{\beta} \right) \right)$$

$$KS_i = \max \{ \max_{1 \leq i \leq n_i} [j/n_i] - u_j \}$$

$$AD_i = -n_i - \sum_{j=1}^{n_j} (2j-1) [\ln(u_j) + (1-u_{n-j+1})/n_i]$$

$$W^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [F(x) - F^*(x)]^2 dF(x)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left[\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \right]$$

$$f(x) = \left(\frac{c}{b} \right) \left(\frac{x}{b} \right)^{c-1} \exp \left(\frac{x}{b} \right)^c$$

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

$$y = \exp \{ b_1 + b_3 \cdot \ln(N) + b_4 \cdot \ln(h_{100}) + b_5 \cdot t^{-1} \}$$

$$b = \exp \{ b_1 + b_2 \cdot \ln(N) + b_3 \cdot \ln(h_{100}) + b_4 \cdot t^{-1} \}$$

$$35 \quad c = \exp\{c_1 + c_2 \cdot \ln(N) + c_3 \cdot \ln(h_{100}) + c_4 \cdot t^{-1}\}$$

$$36 \quad N = (c/b) \cdot ((x/b)^{(c-1)}) \cdot \exp(-(x/b)^c)$$

$$37 \quad \sum_{i=1}^p \ln(L_i) / n_i$$

$$38 \quad \ln(L_i) = \sum_{j=1}^{n_i} \left[\ln(c) - \ln(b) + (c-1) \ln\left(\frac{x_{ij} - a}{b}\right) - \left(\frac{x_{ij} - a}{b}\right)^c \right]$$

$$39 \quad n_i = N \left\{ \exp^{-[(d_i - w/2) - x_{\min}]/b]^c} - \exp^{[(d_i + (w/2) - x_{\min})/b]^c} \right\}$$

$$40 \quad \frac{d_i^2}{d^2} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2 \left(\frac{h_i^2}{h^2}\right)$$

$$41 \quad \ln\left(\frac{d_i}{d}\right) = b_0 + b_1 \ln\left(\frac{h - h_i}{h}\right)$$

$$42 \quad \frac{d_i^2}{d^2} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h-1,3}\right) + b_2 \left(\frac{h_i^2}{(h-1,3)^2}\right)$$

$$43 \quad \frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h-1,30}\right)$$

$$44 \quad \ln\left(\frac{d_i}{d}\right) = b_0 + b_1 \ln\left(\frac{h - h_i}{h}\right) + b_2 \ln^2\left(\frac{h - h_i}{h}\right)$$

$$45 \quad \frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + b_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3$$

$$46 \quad \frac{d_i}{d} = b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + b_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + b_4 \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + b_5 \left(\frac{h_i}{h}\right)^5$$

$$47 \quad \left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = 10^{2b_1} d^{2b_2-2} h^{2b_3} (h - h_i)^{2b_4}$$

$$48 \quad \left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = \{b_1 \{1 + b_2 \ln [1 - b_3 (h_i / h)^{b_4}]\}\}$$

$$49 \quad \left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = \left\{b_1 + b_2 \ln \left[1 - (h_i/h)^{1/3} (1 - e^{-b_1/b_2})\right]\right\}^2$$

$$50 \quad Y = b_0 + b_1.X + b_2.X^2 + b_3.X^3 + b_4.X^4 + b_5.X^5$$

$$51 \quad \frac{d_i}{d} = b_0 + b_1\left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2\left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + b_3\left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + b_4\left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + b_5\left(\frac{h_i}{h}\right)^5$$

$$52 \quad d_i = b_0.d + b_1.d\left(\frac{h_i}{h}\right) + b_2.d\left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + b_3.d\left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + b_4.d\left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + b_5.d\left(\frac{h_i}{h}\right)^5$$

$$53 \quad d_i = b_0.d + \frac{(b_1.d.h_i)}{h} + \frac{(b_2.d.h_i^2)}{h^2} + \frac{(b_3.d.h_i^3)}{h^3} + \frac{(b_4.d.h_i^4)}{h^4} + \frac{(b_5.d.h_i^5)}{h^5}$$

$$54 \quad d_i = a_0 + a_1.h_i + a_2.h_i^2 + a_3.h_i^3 + a_4.h_i^4 + a_5.h_i^5$$

$$55 \quad v = K \cdot \int_0^{h_i} Y^2 \cdot d_{h_i}$$

$$56 \quad v = K \cdot \int_0^{h_i} (a_0 + a_1.h_i + a_2.h_i^2 + a_3.h_i^3 + a_4.h_i^4 + a_5.h_i^5)^2 \cdot d_{h_i}$$

$$57 \quad V = K \cdot \left[\begin{aligned} & a_0^2.h_i + \frac{a_1^2.h_i^3}{3} + \frac{a_2^2.h_i^5}{5} + \frac{a_3^2.h_i^7}{7} + \frac{a_4^2.h_i^9}{9} + \frac{a_5^2.h_i^{11}}{11} + a_0.a_1.h_i^2 \\ & + \frac{2.a_0.a_2.h_i^3}{3} + \frac{a_0.a_3.h_i^4}{2} + \frac{2.a_0.a_4.h_i^5}{5} + \frac{a_0.a_5.h_i^6}{3} + \\ & + \frac{a_1.a_2.h_i^4}{2} + \frac{2.a_1.a_3.h_i^5}{5} + \frac{a_1.a_4.h_i^6}{3} + \frac{2.a_1.a_5.h_i^7}{7} + \frac{a_2.a_3.h_i^6}{3} + \\ & + \frac{2.a_2.a_4.h_i^7}{7} + \frac{a_2.a_5.h_i^8}{4} + \frac{a_3.a_4.h_i^8}{4} + \frac{2.a_3.a_5.h_i^9}{9} + \frac{a_4.a_5.h_i^{10}}{5} \end{aligned} \right]_0^{h_i}$$

$$58 \quad v_t = K \cdot \left(\int_0^{x_2} Y^2 \cdot d_{x_2} - \int_0^{x_1} Y^2 \cdot d_{x_1} \right)$$

$$59 \quad IF = \left\{ anti \log \left[\frac{\sum (\log(y'))^{-1}}{n} \right] \right\} \cdot Syx$$

$$60 \quad IF = \left\{ anti \log \left[\frac{\sum (\log(y'))^{-1}}{n} \right] \right\} \cdot Syx. \exp[(n-p)/2n]$$

$$61 \quad BIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

$$62 \quad E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right]$$

$$63 \quad S\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}$$

$$64 \quad D\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \cdot 100$$

$$65 \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i}$$

$$66 \quad VPL = \frac{Rr + \sum Dj \cdot (1+i)^{r-j} - C \cdot (1+i)^r - \frac{a+t}{i} \cdot \{(1+i)^r - 1\}}{(1+i)^r}$$

$$67 \quad \{Rr + \sum Dj \cdot (1+i)^{r-j}\} = \left\{ C \cdot (1+i)^r + \frac{(a+t)}{i} \cdot [(1+i)^r - 1] \right\} = 0$$

$$68 \quad VAE = \frac{\sum_{j=1}^m \{VPL_j \cdot i \cdot (1+i)^n\}}{(1+i)^n - 1}$$

$$69 \quad CMP = P + T + C$$

$$70 \quad PMP = CMP - T - C$$

$$71 \quad PM = \{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i)\}^{-1}$$

$$72 \quad \ln(h) = b_0 \cdot \ln(d) + b_2 \cdot \ln^2 d$$

$$73 \quad FC = d^2 / [\exp(b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2)]$$

$$74 \quad h = d^2 / (b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot \ln^2(h_{100}))$$

$$75 \quad d = \exp(b_1 \cdot \ln(h_{100}) + b_2 \cdot \ln^2(h_{100}))$$

$$76 \quad h_{100} = \exp(b_1 \cdot \ln(t) + b_2 \cdot \ln^2(t))$$