

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

**AUTODESBASTE E DIAGRAMA DE MANEJO DA  
DENSIDADE EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Paulo Sérgio Pigatto Schneider**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**AUTODESBASTE E DIAGRAMA DE MANEJO DA  
DENSIDADE EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.**

**por**

**Paulo Sérgio Pigatto Schneider**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal.**

**Orientador: Prof. Dr. Frederico Dimas Fleig**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2008**

Schneider, Paulo Sérgio Pigatto, 2008-

G626g

Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade em povoamentos de *Pinus taeda* L./ por Paulo Sérgio Pigatto Schneider; orientador Frederico Dimas Fleig. – Santa Maria, 2008.

96 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2008.

1. Engenharia florestal 2. Manejo florestal 3. Autodesbaste 4. Índice de Densidade 5. Diagrama de Manejo da Densidade I. Fleig, Frederico Dimas, orient. II. Título

CDU: 630.232

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

---

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Paulo Sérgio Pigatto Schneider. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Alameda Sibipiruna, n. 420, Bairro Cerrito, Santa Maria, RS, 97.095-660

Fone: (055)3221.8963.

---

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**AUTODESBASTE E DIAGRAMA DE MANEJO DA DENSIDADE EM  
POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.**

elaborada por  
**Paulo Sérgio Pigatto Schneider**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Florestal**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Frederico Dimas Fleig, Prof. Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Ivanor Müller, Dr. - UFSM**

**Luciano Weber Scheeren, Dr. – Ministério Público, RS**

Santa Maria, 12 de agosto de 2008.

**Dedico...**

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

## **AGRADECIMENTOS**

O presente estudo é oferecido a todos os que acreditam nas forças da natureza e na Engenharia Florestal, assim todos estão capacitados a entenderem o reflexo da presente vitória. Em especial, gostaria de externar meus agradecimentos:

- à Instituição CAPES, pela generosidade da concessão de bolsa de mestrado, o que permitiu a realização desta Dissertação de conclusão do Mestrado em Engenharia Florestal;

- ao Prof. Dr. Frederico Dimas Fleig, meu orientador, pela rara amizade e pela compreensão nas considerações finais do estudo;

- ao Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, pelas dicas e por sua intensa e calorosa amizade;

- ao Prof. Dr. Paulo Renato Schneider, pela eterna concretização de importantes descobertas pessoais, pelo amigo que é e grande amizade;

- à minha família querida, que tanto me ajudou nesse período de Mestrado ao desenvolver a pesquisa florestal e arauto de desenvolvimento nos assuntos tematizados e pela capacidade de revolucionar e dinamitar problemas sem armas, mas com muita paz;

- aos demais professores da Engenharia Florestal, pelas importantes observações de cunho temático, técnico e realizações pessoais como estudante do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Rurais, na UFSM, quero externar meus eternos e sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **AUTODESBASTE E DIAGRAMA DE MANEJO DA DENSIDADE EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.**

AUTOR: Paulo Sérgio Pigatto Schneider

ORIENTADOR: Dr. Frederico Dimas Fleig

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 12 de agosto de 2008

A presente dissertação foi desenvolvida 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 isto, foram testados os modelos de Reineke, Yoda, Zeide e Tang, através de dados originados de 50 parcelas permanentes, medidas anualmente até os 18 anos, alocados em povoamentos implantadas 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, 2,5x3,0 m, e mantidas em densidade completa. Os resultados indicaram que todos os modelos de densidade e diâmetro apresentaram boa precisão estatística, porém o modelo não linear de Tang foi mais eficiente que os demais, tendo apresentado ótimo coeficiente de determinação, igual a 0,99, baixo erro padrão da estimativa igual a 0,0948, baixo coeficiente de variação, igual a 1,17 %, mínima tendência, com valor igual a 0,0086, e elevada eficiência, com valor igual a 0,8976. Na estimativa dos valores de densidade de árvores por hectare por diâmetro médio, e a menor soma de escores dos critérios estatísticos, foi igual a 6 pontos, com boa distribuição dos resíduos do número de árvores por hectare. O autodesbaste ocorre numa dimensão de diâmetro médio diretamente proporcional a densidade de árvores por hectare de plantio. Quanto maior o espaçamento inicial maior é o diâmetro médio no momento do início do autodesbaste da população. O coeficiente angular da equação de densidade e diâmetro variou por espaçamento de plantio, não permitindo comprovar a universalidade da lei do autodesbaste, cujo valor do coeficiente angular é estipulado em  $-3/2$ . Com o modelo de densidade e diâmetro foram gerados 5 Índices de Densidade do Povoamento - IDP, que variaram de um valor máximo de 1400 até o mínimo de 600, com intervalo de classe de IDP de 200, tendo com referência o diâmetro padrão de 25 cm. Os Diagramas de Manejo da Densidade - DMD da população, elaborados para as variáveis dendrométricas: diâmetro médio, área basal e volume por hectare, por IDP, apresentaram uma boa eficiência com baixo erro na estimativa dos valores destas variáveis. Os volumes reais por hectare e os estimados no DMD apresentaram uma diferença absoluta de apenas  $-7,39 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  e relativa de  $-1,79 \%$ , demonstrando elevada precisão do modelo de DMD. As estimativas volumétricas por hectare do DMD em relação aos valores reais, apresentaram valor de eficiência igual a 0,99, o que indica uma alta precisão, e um valor de  $\chi^2$  igual a 0,00034, não significativo a 0,01 % de probabilidade, demonstrando que os valores reais e os estimados não diferem estatisticamente entre si.

**Palavras-chave:** autodesbaste, espaçamento, densidade, *Pinus taeda*.

## ABSTRACT

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### SELF-THINNING AND DENSITY MANAGEMENT DIAGRAM IN *Pinus taeda* L. STANDS

AUTHOR: Paulo Sergio Pigatto Schneider

ADVISOR: DR. Frederico Dimas Fleig

Date and Place of Defense: Santa Maria, August, 12<sup>th</sup>, 2008.

This thesis aims at studying the efficiency of models which express the size-density relationship in even-aged stands of *Pinus taeda* L., handled in complete and full stock densities. For that, Reineke, Yoda, Zeide and Tang models were tested using data obtained from 50 permanent sample plots placed in stands implanted in spacing of 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, 2.5x3.0 m, measured every year until the age of 18 and maintained in full stocks. Results indicated that all of the size-density relationship models presented good statistical precision. However, the no-linear model of Tang was more efficient than the others, presenting excellent coefficient of determination (0.99), low standard error of estimate (0.0948), low coefficient of variation (1.17%), low bias (0.0086) and high efficiency (0,8976), in the estimate of the values of density of trees per hectare for average diameter, and the smallest considered value of the scores of the statistical criteria, equal to 6 points, with good distribution of residues of the number of trees per hectare. The self-thinning occurs in a dimension of average diameter directly proportional to the density of trees per hectare of planting. As bigger is the initial spacing, bigger is the average diameter in the moment of the beginning in the stand the self-thinning. The slope of the size-density and diameter equation varied per planting spacing, not allowing proving the universality of the self-thinning law, with value of this slope is equal  $-3/2$ . With help of the size-density model, 5 Indexes of Density of the Stand (IDS) were generated, with variation from the maximum 1400 to the minimum 600, with interval of class of IDS equal to 200, having as reference the standard diameter of 25 cm. The stand's Density Management Diagram (DMD), elaborated for the dendrometric variables – average diameter, basal area and volume for hectare by IDS presented good efficiency with low mistake in the estimate of the values of these variables. Real volume and estimate volume per hectare in DMD presented an absolute difference of just  $-7.39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  and a relative difference of  $-1.79 \%$ , showing a great precision of the DMD model. The estimates volume of DMD per hectare, in relation to the real values, presented a value of efficiency equal to 0.99, what indicates a high precision, and a  $\chi^2$  value equal to 0.00034, not significant to 0.01% of probability, demonstrating that the real and the estimate values don't differ statistical amongst themselves.

**Key words:** self-thinning, spacing, density, *Pinus taeda*.



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Resumo dos dados utilizados no presente trabalho.....  | 54 |
| Tabela 2 - Resultados estatísticos dos modelos de densidade e diâmetro e de autodesbaste ajustados.....   | 56 |
| Tabela 3 - Estatística para validação e seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio.....                                    | 60 |
| Tabela 4 – Valores estimados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade por diâmetro médio...62              |    |
| Tabela 5 - Resultados estatísticos do modelo de densidade e diâmetro de Tang, ajustado por espaçamento.....   | 66 |
| Tabela 6 – Densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade e diâmetro de Tang, com variação do espaçamento.....      | 68 |
| Tabela 7 – Densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em unidade logarítmica, e por Índices de Densidade do Povoamento.....                              | 72 |
| Tabela 8 – Densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, expressos por Índices de Densidade do Povoamento.....  | 75 |
| Tabela 9 – Parâmetros estatísticos das equações de volume testadas.....   | 78 |
| Tabela 10 – Área basal ( $m^2ha^{-1}$ ) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.....   | 81 |
| Tabela 11 – Volume ( $m^3ha^{-1}$ ) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.....   | 83 |
| Tabela 12 – Prognose dos parâmetros dendrométricos de uma população com IDP igual a 600.....  | 87 |
| Tabela 13 – Diferenças dos volumes por hectare reais e estimados no Diagrama de Manejo da Densidade, para um povoamento implantado em espaçamento de 2,0x2,0 m..... | 88 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama de Manejo da Densidade (DMD): A – Linha de máxima densidade e diâmetro, B – início da mortalidade, C – máxima produtividade do povoamento, D – ocupação das copas, C-B - Faixa escura, zona de manejo com estoque completo almejado. Fonte: Saunders e Puettmann (2000)..... | 36 |
| Figura 2 – Trajetória padrão para dois povoamentos não manejados (linhas pontilhadas I e II) e dois manejados (linhas tracejadas III e IV), com diferentes densidades iniciais. Fonte: Saunders e Puettmann(2000).....   | 38 |
| Figura 3 – Incremento diamétrico em diferentes regimes de manejo de <i>Acacia melanoxylon</i> na Nova Zelândia, originados em diferentes zonas de competição. Fonte: Reid (2004).....  | 40 |
| Figura 4 - Mapa das sub-regiões agroecológicas de Santa Catarina. Fonte: Embrapa (1999).....   | 47 |
| Figura 5 – Densidade de árvores por hectare observado (LN) em função do diâmetro médio (LD), em escala logarítmica, de um povoamento altamente estocado de <i>Pinus taeda</i> L.....   | 55 |
| Figura 6 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro obtido de Reineke (1933), equação 54.....  | 57 |
| Figura 7 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro obtidos no modelo de Yoda et al. (1963), equação 57.....   | 58 |
| Figura 8 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare por logaritmo do diâmetro obtidos no modelo de Zeide (1995), equação 56.....  | 58 |
| Figura 9 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro obtidos no modelo proposto por Tang et al. (1994), equação 57.....   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 10 – Valores estimados e observados da densidade de árvores por hectare, em unidade logarítmica, obtidas através do modelo de Tang, equação 57.....   | 60 |
| Figura 11 – Valores estimados de densidade de árvore por hectare em função do diâmetro médio, para povoamentos de <i>Pinus taeda</i> , nos modelos de densidade e diâmetro ajustados.....  | 63 |
| Figura 12 – Valores estimados de densidade de árvores por hectare função do diâmetro médio do povoamento de <i>Pinus taeda</i> (Brasil), <i>Pinus sylvestris</i> (Espanha) e <i>Mountain ash</i> (Japão), através do modelo de autodesbaste proposto por Tang et al. (1994).....   | 64 |
| Figura 13 – Tendência da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em diferentes espaçamentos de implantação do povoamento.....  | 67 |
| Figura 14 – Tendências médias do autodesbaste, definido pela densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, obtidas através do modelo proposto por Tang et al. (1964).....  | 69 |
| Figura 15 – Limites das fases de concorrência entre indivíduos, em densidade de árvores pelo diâmetro médio, em unidade logarítmica: 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..... | 70 |
| Figura 16 – Limites das fases de concorrência entre indivíduos, em densidade de árvores pelo 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.....  | 71 |
| Figura 17 – Linha de máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, expresso em unidade logarítmica.....   | 74 |
| Figura 18 – Índice de Densidade do Povoamento, com representação da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em unidade logarítmica.....  | 74 |
| Figura 19 – Índice de Densidade do Povoamento, com representação da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em unidade aritmética.....   | 76 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20 – Diâmetro médio pela densidade de árvores em unidade aritmética:<br>Linha A – diâmetro máximo pela densidade, Linha B – início da mortalidade,<br>Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-D -<br>manejo com estoque completo..... | 77 |
| Figura 21 – Distribuição dos valores residuais pelo volume observado.....   | 79 |
| Figura 22 – Volume médio em relação a densidade de árvores por hectare:<br>Linha A – diâmetro máximo pela densidade, Linha B – início da mortalidade,<br>Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B -<br>manejo com estoque completo.....     | 80 |
| Figura 23 – Área basal por hectare em função do diâmetro médio e por índice<br>de Densidade do Povoamento.....  | 82 |
| Figura 24 – Volume por hectare em função do diâmetro médio e por Índice de<br>Densidade do Povoamento.....  | 84 |
| Figura 25 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do<br>Povoamento, considerando a inter-relação do número de árvores e área basal<br>por hectare com o diâmetro médio.....   | 85 |
| Figura 26 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do<br>Povoamento, considerando a inter-relação do número de árvores e volume por<br>hectare com o diâmetro médio.....   | 86 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2.1 Objetivo geral .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.2 Objetivos específicos .....</b>                                    | <b>16</b> |
| <b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                                      | <b>17</b> |
| <b>3.1 Crescimento e produção .....</b>                                   | <b>17</b> |
| <b>3.2 Modelos de densidade e tamanho.....</b>                            | <b>22</b> |
| <b>3.3 Autodesbaste.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>3.4 Diagrama de Manejo da Densidade.....</b>                           | <b>33</b> |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>46</b> |
| <b>4.1 Localização da área.....</b>                                       | <b>46</b> |
| <b>4.2 Caracterização da área.....</b>                                    | <b>46</b> |
| <b>4.3 Origem dos dados.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.4 Metodologia empregada.....</b>                                     | <b>48</b> |
| 4.4.1 Seleção dos modelos de densidade e diâmetro.....                    | 48        |
| 4.4.2 Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento.....            | 51        |
| 4.4.3 Formulação do Diagrama de Manejo da Densidade.....                  | 52        |
| 4.4.4 Processamento dos dados.....  | 53        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                      | <b>54</b> |
| <b>5.1 Seleção do modelo de densidade de árvores.....</b>                 | <b>54</b> |
| <b>5.2 Validação dos modelos de densidade de árvores.....</b>             | <b>60</b> |
| <b>5.3 Análise comparada das estimativas de densidade de árvores.....</b> | <b>61</b> |
| <b>5.4 Determinação do autodesbaste.....</b>                              | <b>63</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5.5 Índices de Densidade do Povoamento.....</b>                  | <b>72</b> |
| <b>5.6 Diagrama de Manejo da Densidade.....</b>                     | <b>76</b> |
| 5.6.1 Relações de variáveis dendrométricas com a densidade.....     | 76        |
| 5.6.2 Relação da produção com o Índice de Densidade do Povoamento.. | 80        |
| 5.6.3 Elaboração dos Diagramas de Manejo da Densidade.....          | 84        |
| 5.6.4 Validação dos Diagramas de Manejo da Densidade.....           | 86        |
| <br>  |           |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>   | <b>89</b> |
| <br>  |           |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                           | <b>91</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Entre as medições diretas de densidade encontra-se o número de árvores, cujo valor pode ser obtido facilmente e objetivamente, mas se relaciona com a idade e sítio, bem como ao grau de utilização da área. Isso porque, o número de árvores pode variar sem afetar a densidade de uso do solo, o que depende do grau de ocupação do espaço físico pela área das copas e pelo sistema radicular, respectivo, das árvores.

A densidade que induz a mortalidade ou autodesbaste é o resultado da competição por água, luz e nutrientes entre os indivíduos da população. Por isto, como regra geral, o autodesbaste promove uma perturbância na população, decréscimo exponencial da densidade, e promove o incremento do tamanho dos indivíduos.

No manejo 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. Pois, 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 uma intensidade adequada, dependendo da capacidade produtiva do sítio e da velocidade de crescimento da espécie.

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

Por outro lado, a produção qualitativa e quantitativa de madeira dos povoamentos florestais está, em sua maioria, relacionada ao sítio, tratos silviculturais e, principalmente, com a densidade da população e outros fatores

ambientais. Sobre esse aspecto, deve-se considerar que à medida que aumenta o número de árvores, aumenta a área basal significativamente, 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.

Uma das atividades fundamentais para alcançar um adequado manejo florestal é a predição das condições futuras de um povoamento. Nos últimos decênios, houve uma evolução de modelos matemáticos que incorporam conceitos ecológicos, como a competição intra-específica, que se baseia em alguma das numerosas relações de densidade e tamanho. Essas relações referem-se as variáveis dendrométricas do povoamento, expressas numa idéia de tamanho, como o número de árvores, área basal e volume por hectare.

Mediante o emprego destas relações dendrométricas é possível construir os Diagramas de Manejo da Densidade, que em geral são modelos paramétricos simples, porém existem outros mais complexos que utilizam um maior número de variáveis, melhorando sua utilização na predição das estimativas da variável dependente.

Através destes modelos de Diagrama de Manejo da Densidade, o silvicultor pode prever rendimentos futuros para várias condições de manejo da densidade, e, também, determinar as intensidades de corte para alcançar os objetivos de produção.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desse trabalho é estudar a densidade de árvores por hectare em relação ao diâmetro médio para determinação do autodesbaste e elaborar os Diagramas de Manejo da Densidade que servirão de modelos auxiliares no manejo de povoamentos de *Pinus taeda* L.

### **2.2 Objetivos específicos**

Entre os objetivos específicos perseguidos na realização desse trabalho podem ser destacados os seguintes:

- a) Estudar o comportamento dos modelos de densidade e diâmetro em relação ao diâmetro médio em povoamentos equiâneos de *Pinus taeda*;
- b) Analisar o momento de ocorrência do autodesbaste em povoamentos homogêneos de *Pinus taeda*, implantados em diferentes espaçamentos;
- c) Continuar os Diagramas de Manejo da Densidade de povoamentos equiâneos de *Pinus taeda*.

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 Crescimento e produção

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

Segundo Andrae (1978), a necessidade das plantas por: luz, água, nutriente, CO<sub>2</sub> e espaço vital, faz com que 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 área de copa e sistema radicular do que outras. A competição conduz a 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 árvores dominantes sofrem menos que as suprimidas, que no final são eliminadas devido a competição como consequência da diminuição de seu crescimento e vigor.

Sobre isto, Reinstorf (1970), constatou para *Pinus elliottii* que o diâmetro é diretamente afetado pela densidade e, por consequência, sofre influência direta da intensidade dos desbastes. Assim, após o desbaste, as árvores de uma mesma classe diamétrica inicial 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 mais espaço, para permitir que a copa expanda-se individualmente, para alimentar o fuste, que é cada vez mais longo e grosso. A taxa de crescimento diametral será determinada pelo espaço de crescimento de que dispõe cada árvore, que competem por espaço tanto para as raízes, quanto para a

copa, necessitando que esteja espaçado uniformemente sobre a superfície, cujo resultado é uma maior uniformidade da competição entre os indivíduos do povoamento”.

A produção de um povoamento depende da espécie, da idade, do sítio e da densidade do povoamento no final da rotação. Nesse conjunto de fatores, a densidade do povoamento merece destaque por ser uma grandeza importante para a condução do crescimento diamétrico. A regulação da densidade de um povoamento pode ocorrer de maneira natural (autodesbaste ou self-thinning) ou por intervenções humanas (desbastes) (ASSMANN, 1970; SPIECKER, 1983).

Por meio de desbastes, busca-se, em geral, uma aceleração do crescimento do diâmetro das árvores remanescentes no povoamento. O objetivo não é só o aumento do crescimento em diâmetro, mas também uma concentração desse crescimento em um menor número de árvores. 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 aumento no crescimento em volume. Esse processo é chamado de "efeito de aceleração de crescimento", que provoca a antecipação do culmínio do incremento corrente em volume. 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).

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 Mason (apud SCHNEIDER, 1993).

Nesse contexto, Assmann (1970) introduziu o conceito da área basal crítica, abaixo da qual podem ser esperadas perdas no crescimento em volume. Além disso, Abetz (1975) definiu curvas-guias, orientadas no número de árvores, para conduzir povoamentos puros equiâneos.

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 máximo. 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 quantitativa e qualitativa de um povoamento é influenciada tanto pelo sítio como pelo tratamento silvicultural (especialmente o desbaste). 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 apropriados de desbaste eleva a diâmetros maiores e à melhoria da qualidade de madeira sem perdas significativas de volume (ASSMANN, 1970). Em geral, o primeiro e segundo desbastes 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., onde percentagens da área basal foram utilizadas como indicadores de peso de desbaste, constatando 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.

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

Os melhores resultados obtidos para o manejo do eucalipto destinado à serraria, visando maior produção volumétrica e madeira de melhor qualidade, devem-se à utilização da rotação de média duração, entre 14 e 25 anos. Isso porque idades menores não exploram todo o potencial produtivo da floresta, além de produzir madeira de qualidade não satisfatória, enquanto que, em idades superiores a 30 anos, surgem sérios problemas que prejudicam a qualidade da madeira, como defeitos e tensões internas. Acrescenta-se ainda a perda de lucratividade devido ao demorado tempo de ocupação da terra. Nesse período de rotação, entre 14 e 25 anos, são realizados de 4 a 6 desbastes, partindo-se de 1.370 árvores/ha e retirando-se, sucessivamente, 45%, 18%, 14% e 10% da população original, respectivamente, nas idades médias de 3 a 5, 7 a 9, 11 a 13, e 16 a 19 anos. Há variações, de acordo com

o método empregado em cada sítio, região ou situação, sendo que as bases para esse manejo foram utilizadas por Hiley (1959).

A orientação geral do Serviço Florestal do Canadá, para o desenvolvimento de regimes de manejo da densidade dos povoamentos para a produção, estabelece que, em muitos casos, os impactos dos desbastes pré-comerciais e comerciais podem ser modificados por fertilização nitrogenada. As interações naturais entre espaçamento e nutrição, e as respostas das árvores ao nível biológico do povoamento podem ser sumarizadas em cinco tipos (MINISTRY OF FORESTRY, 1999):

a) O desbaste reduz a competição no povoamento, cobertura da copa, e volume da folhagem, assim aumenta a disponibilidade de luz solar sobre as árvores residuais;

b) A fertilização nitrogenada eleva a concentração de nitrogênio na folhagem das árvores residuais, assim aumenta a eficiência fotossintética na área;

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 residuais;

d) A taxa de melhoria sobre o resultado da produção das árvores com a expansão da copa e volume da folhagem, aumenta a interceptação de luz solar na folhagem;

e) O aumento da interceptação da luz solar pelas árvores residuais aumenta a taxa fotossintética, assim aumenta o incremento e volume do povoamento.

No trabalho desenvolvido por Van Laar (1969), 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.

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 da posição sociológica em que cada árvore desenvolve-

se. Também, varia com a idade, quer como um fenômeno evolutivo natural ou como resultado das várias fases de concorrência relativa com as árvores vizinhas (LARSON, 1964).

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, 1993).

Coetzee (1991), comparando o efeito da população de plantas entre um sítio de melhor qualidade e outro de pior qualidade, encontrou, dentro dos limites de densidade avaliados de 830 a 2.222 árvores por hectare, uma relação linear crescente entre a área basal e volume com a densidade do povoamento no sítio de pior qualidade. Porém, no melhor sítio, os resultados mostraram que, dois anos após o plantio, a relação linear mudou para curvilínea.

A mortalidade de indivíduos numa população pode ser uma ocorrência regular ou irregular. A mortalidade regular provavelmente está ligada a fatores exógenos e danos causados pelo homem (LEE, 1971). A mortalidade 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).

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

Segundo Hamilton (1986), a mortalidade constitui-se num 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), insetos, e doenças. Outro fator é a competição ambiental que surge das árvores vizinhas, como também das características das árvores e do local (BUCHMAN et al., 1983).

A mortalidade poderia ser considerada menos estocástica se as variáveis ambientais pertinentes fossem normalmente medidas em parcelas permanentes e se pudessem caracterizar as condições genéticas das árvores. Devido a isto, Hamilton (1974) informa que a mortalidade de árvores é um evento discreto, porque os dados podem ser tão somente identificados com valor 0 (vivas) e 1 (mortas), podendo sua probabilidade de ocorrência ser ajustada pela equação logística, definida por:

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

Sendo que, P é a probabilidade de mortalidade, e b'x a combinação de variáveis e parâmetros b; x = variável independente.

Considerando todos os efeitos, a hipótese do modelo de mortalidade tem uma forma geral, para qualquer espécie, definida por Monserud e Sterba (1998), como sendo:

$$P = \{1 + \exp(b_0 + b_1/d + b_2CR + b_3G + b_4d + b_5d^2)\}^{-1} \quad (2)$$

Sendo que, P é a probabilidade de mortalidade, d o diâmetro à altura do peito (cm), CR a proporção de copa, G a área basal ( $m^2ha^{-1}$ ), e  $b_0$  a  $b_5$  = parâmetros.

### 3.2 Modelos de densidade e tamanho

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

Alguns pesquisadores, como Westoby (1981) e Zeide (1987), afirmam que a relação entre o tamanho das árvores ou outras plantas e o seu número, constituem-se por si só num grande problema bio-ecológico. Essa relação do tamanho sobre o número de árvores é de grande interesse para o manejo florestal, por ser fundamental para estimar a densidade do povoamento,

estoque de madeira, determinação da intensidade ótima de desbaste, grau de disturbância, taxa de autodesbaste, e outros processos florestais.

Existem muitos estudos sobre a relação do tamanho e o número de árvores de povoamentos, como: a regra do D-máximo de Mitchell (1943); o método da percentagem da altura de Wilson (1946), embora pouco usado; a lei do  $-3/2$  de autodesbaste de Yoda et al. (1963); e, o índice de densidade de Reineke (1933), que tem sido muito estudado ao longo do tempo, para várias espécies.

De acordo com Reineke (1933), em povoamento com densidade completa a relação entre o diâmetro médio quadrático das árvores,  $D$ , e o seu número de árvores por hectare é linear numa escala logarítmica, sendo expresso pela função:

$$\ln N = \alpha - \beta \ln d \quad (3)$$

Sendo que,  $N$  é o número de árvores por hectare, e  $d$  o diâmetro médio do povoamento (cm).

Reineke (1933) considera que os parâmetros da equação são independentes da idade e qualidade do sítio, por isto, usa esta equação para estimar a densidade populacional como uma função do diâmetro médio. Postulou que, a relação entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio quadrático em povoamento sem tratamento é uma linha reta, numa escala logarítmica, com um valor constante do coeficiente angular a  $-1,605$ , para todas as espécies.

Uma vez conhecido o coeficiente angular da equação de Reineke é possível determinar os Índices de Densidade do Povoamento - IDP, através da expressão:

$$IDP = N(t) \left[ \frac{dg(t)}{d_o} \right]^\beta \quad (4)$$

Sendo que,  $d_o$  é o diâmetro padrão básico, normalmente definido como sendo igual a 25 cm,  $d_g$  o diâmetro quadrático médio no tempo  $t$ ,  $N$  o número



de árvores por hectare no tempo  $t$ , e  $\beta$  o coeficiente angular obtido na equação de Reineke.

Esse Índice de Densidade do Povoamento de Reineke (1933) corresponde à relação entre o número de árvores observadas no povoamento com a de um povoamento normal, porém, ambos com igual diâmetro médio. Em outras palavras, este é o número de árvores por unidade de área que um povoamento pode suportar para alcançar um diâmetro médio fixado convencionalmente como objetivo. Porém, povoamentos da mesma espécie em habitat diferente tendem a limites de densidade diferentes, mas a tendência será sempre semelhante. Devido a isso, são gerados índices de densidade do povoamento, com limites paralelos e proporcionais, para diferentes níveis de densidade de árvores por unidade de área.

Vários pesquisadores utilizaram este Índice de Densidade do Povoamento de Reineke (1933) para elaborar curvas-guias de manejo, como Zepeda (1984 apud PRODAN, 1997).

Curtis (1982) demonstrou que o modelo de Reineke pode ser trasladado para a relação entre a área basal ( $G$ ) e o diâmetro médio quadrático ( $d_g$ ):

$$G = a_1 \cdot d_g^b$$

Esse autor encontrou para povoamentos naturais de *Pseudosuga mensiensii* uma constante  $b$  entre os limites de 0,45 a 0,5, com arredondamento passa a ser igual a 0,5. 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 para serraria*. Assim, através desta equação de Reineke a densidade relativa (DR) passa a ser obtida por:

$$DR = G / (d_g^{0,5})$$

Monserud et al. (2005) basearam-se nas teorias de Kira et al. (1953), Yoda et al. (1963), Ando (1968), Ando et al. (1968) e Reineke (1933) para desenvolver a Regra da Densidade de Competição – RDC para povoamentos

equiâneos. Para isso, consideraram povoamentos de mesmo sítio e idade, porém com diferentes densidades, para descrever a relação entre o número de árvores e o diâmetro quadrático médio numa função hiperbólica, expressa por:

$$d_g = 1/(A.N + B) \quad (5)$$

Sendo que,  $d_g$  é o diâmetro quadrático médio, N o número de árvores por hectare, e A e B os parâmetros.

Essa expressão é similar a função hiperbólica usada por Kira et al. (1953), correspondente da área basal por hectare do povoamento (G):

$$G = N.d_g^2 \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{N.\pi}{4(A.N + B)^2} \quad (6)$$

O número de árvores que produz a área basal máxima ( $N_{G_{max}}$ ) é obtida fixando a derivativa em relação a N, e igualando a zero, tem-se que:

$$\frac{d_G}{d_N} = \frac{\pi.(B - A.N)}{4.(A.N + B)^3} = 0 \quad (7)$$

Solucionado esta equação, obtém-se o N máximo na linha de densidade, através da expressão:

$$N_{C_{max}} = B / A \quad (8)$$

E, o diâmetro médio quadrático máximo correspondente é então obtido por:

$$d_{g_{G_{max}}} = 1/(2.B) \quad (9)$$

Para uma altura dominante constante este valor de N máximo correspondente ao diâmetro médio quadrático descreve a densidade assintótica definida por Yoda et al. (1963).

Ando (1968) e Ando et al. (1968) apontam na direção de que os parâmetros A e B devem ser obtidos por uma função de altura dominante ( $h_0$ ). Assim, a Regra da Densidade-Competição que descreve o diâmetro quadrático médio é uma função da altura dominante ( $h_0$ ) e do número de árvores (N):

$$d_g = \frac{1}{a_0 h_0^{a_1} \cdot N + b_0 h_0^{b_1}} \quad (10)$$

A correspondente densidade máxima e o diâmetro médio quadrático são então obtidos por:

$$N_{G_{\max}} = \frac{b_0}{a_0} h_0^{b_1 - a_1} \quad (11)$$

e

$$d_g = \frac{1}{2 \cdot b_0} \cdot h_0^{b_1} \quad (12)$$

A altura dominante é expressa como uma função do diâmetro médio na produção com a máxima densidade de árvores por hectare:

$$h_0 = (2 \cdot b_0 \cdot d_{g_{G_{\max}}})^{-1/b_1} \quad (13)$$

Substituindo  $h_0$  na equação 11 pela equação 13 tem-se a expressão:

$$N_{G_{\max}} = \frac{b_0}{a_0} (2 \cdot b_0 \cdot d_{g_{G_{\max}}})^{a_1/b_1 - 1} \quad (14)$$

Assim, o coeficiente angular de Reineke “q” e o intercepto “k” da linha de máxima densidade são obtidos por:

$$q = \frac{a_1}{b_1} - 1 \quad (15)$$

e

$$k = \frac{b_0}{a_0} \cdot (2 \cdot b_0)^q \quad (16)$$

Então, o Índice de Densidade do Povoamento - IDP e a Máxima Densidade de árvores -  $N_{G_{\max}}$ , para um diâmetro padrão de 25 cm, são obtidos por:

$$IDP = k \cdot 25^q = N_{G_{\max}} = \frac{b_0}{a_0} (2 \cdot b_0 \cdot 25)^{a_1/b_1 - 1} \quad (17)$$

As pesquisas subseqüentes, 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 é uma conseqüência 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, esse mecanismo assume muitos resultados e diminui com a tolerância à sombra das árvores.

A variação da densidade afeta a relação entre o número de árvores e o diâmetro de copa, mas muito antes o diâmetro. 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 numa escala logarítmica:

$$\ln N = a_2 - b_2 \ln d_c \quad (18)$$

Sendo que,  $d_c$  é o diâmetro de copa, e N a densidade de árvores por hectare.

Como o diâmetro da base da copa é relacionado com o diâmetro à altura do peito e distância entre a base da copa e da altura do peito, sendo essa distância proporcional a altura total, o que levou Laasasenaho e Koivuniemi (1990) a definir que:

$$d_c = d^{1-mS} \quad (19)$$

Sendo que,  $d_c$  é o diâmetro da base da copa,  $d$  o diâmetro à altura do peito,  $S$  a distância entre  $d_c$ , e a altura do peito, e  $m$  um parâmetro a ser definido.

Considerando que, é difícil a obtenção do diâmetro de copa, então esse parâmetro passa a ser substituído pela altura, que é obtido normalmente no inventário do povoamento. Assim, pode-se estabelecer uma nova relação entre o número de árvores, diâmetro e altura, o que levou Zeide (1995) a definir a seguinte expressão:

$$\ln(N) = \alpha - \beta \ln(d_g) + \chi h \ln(d_g) \quad (20)$$

Sendo que,  $h$  é a altura total média,  $d_g$  o diâmetro médio quadrático, e  $\chi$  um parâmetro que representa a variação do coeficiente angular.

Tang et al. (1994), estenderam a teoria do autodesbaste para povoamentos em densidade completa e subestocados, tendo constado que o autodesbaste começa antes de atingir a máxima densidade, e que a taxa de autodesbaste incrementa com a densidade, atingindo o máximo na densidade do povoamento. Esse modelo de densidade é expresso por:

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right] \quad (21)$$

Sendo que,  $t$  é a idade do povoamento,  $\beta$  parâmetro da taxa máxima de autodesbaste de densidade completa,  $N(t)$  a densidade no tempo  $t$  (número de árvores por hectare),  $d(t)$  o diâmetro médio das árvores no tempo  $t$  (cm),  $S_f$  índice mínimo de densidade do povoamento,  $\gamma$  o índice de autodesbaste, e  $d_o$  o diâmetro básico padrão (25 cm).

### 3.3 Autodesbaste

Existem muitos estudos sobre a relação do tamanho e o número de árvores de povoamentos, como: a regra do D-máximo de Mitchell (1943); o método da percentagem da altura de Wilson (1946), embora pouco usado; a lei do autodesbaste, com valor de  $-3/2$ , com relação direta a coeficiente angular igual a -1,5 de Yoda et al. (1963); e, o índice de densidade de Reineke (1933), do coeficiente angular -1,605, que tem sido muito utilizada ao longo do tempo para várias espécies.

De acordo com Reineke (1933), em povoamento com densidade completa a relação entre o diâmetro médio quadrático das árvores e o seu número de árvores por hectare é linear numa escala de duplo logaritmo. Considera que os parâmetros da equação são independentes da idade e qualidade do sítio, por isso, usa esta equação para estimar a densidade populacional como uma função do diâmetro médio. Postulou que, numa escala logarítmica a relação entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio quadrático em povoamento sem tratamento é uma linha reta, com um valor constante do coeficiente angular de -1,605, para todas as espécies.

Porém, em estudo realizado recentemente por Del Rio et al. (2001), sobre o coeficiente angular ou taxa de autodesbaste, constataram uma variação do coeficiente angular com a espécie e muitas vezes com a idade, com valores entre -2,33 e -1,54.

Hibbs (1987) aplicou a lei do autodesbaste para desenvolver linhas guias para 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. E os valores de densidade relativa para o fechamento da copa, mortalidade e limite de desbaste corresponderam aos definidos para outras espécies.

Del Rio et al. (2001) analisaram a relação densidade populacional e diâmetro médio, e o autodesbaste em povoamento equiâneo não desbastado de *Pinus silvestris* L., na Espanha. A expressão densidade e diâmetro ajustada pela equação de Reineke (1933) foi comparada com a expressão de Zeide

(1995) e o modelo de autodesbaste de Tang et al. (1994). Os resultados indicaram que o autodesbaste segue uma linha côncava com incremento do coeficiente angular e da densidade do povoamento, assumindo a assíntota diretamente na linha de densidade máxima. O coeficiente angular obtido nessa linha para povoamentos de *Pinus silvestris* foi igual a -1,75.

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 (1985, 1987 e 1991); Sterba e Monserud (1993); Tang et al. (1993); Osawa e Allen (1993); Tang et al. (1995); Smith e Hann (1986); Del Rio et al. (2001), entre outros.

Essa lei do autodesbaste, desenvolvida por pesquisadores japoneses (Tang et al., 1994), determina qual é o peso médio de árvores sobre o número de árvores sobreviventes por diâmetro médio, sendo ambas variáveis determinadas em unidade logarítmica, que resulta numa relação linear, com descendente comum de potência  $-3/2$ . Assim, quando ocorre o autodesbaste tem-se então a expressão:

$$W = k.N^{-3/2} \quad (22)$$

Ou seja,

$$\ln(W) = k - 1,5.\ln(N) \quad (23)$$

Sendo que,  $W$  é o tamanho médio das árvores, podendo ser expressa em massa, volume, altura, área basal, diâmetro, etc.,  $N$  a densidade populacional expressa em número de árvores por hectare; e  $k$  uma constante considerada como uma medida de taxa requerida para sustentar a área de copa estabelecida, que varia com as condições do dossel (YODA et al., 1963).

Segundo Osawa e Allen (1993) a lei do autodesbaste descreve uma relação constante para a média da densidade de plantas, com aproximadamente  $-3/2$  da densidade de plantas em povoamentos monoculturais. Embora essa lei do autodesbaste é bem descrita para várias espécies, mecanismos deste procedimento não tem uma relação certa para povoamentos subestocados. O limite do autodesbaste para *Nothofagus*

*solandri* mostrou um expoente de -1,13, com intervalo de -1,25 a -1,02, para uma probabilidade de 95 % de confiabilidade. Esse coeficiente é diferente ao valor convencional do expoente -3/2. Em contraste, para *Pinus densiflora* o coeficiente indicado para expoente de desbaste não foi diferente ao valor proposto de -3/2.

Porém, segundo Prodan et al. (1997), a medida que o tamanho médio das árvores aproxima-se do tamanho máximo da espécie, a relação deixa de valer, então a lei de autodesbaste somente pode ser usada para preceder densidades máximas para um determinado tamanho dado. Por isso, a lei tem sido contestada por muitos pesquisadores, que chegaram a resultados diferentes aos mencionados originalmente. Embora essa polêmica tenha persistido, é significativo o número de estudos que chegaram ao mesmo resultado, como o realizado por Smith e Hann (1986), que comprovaram a validade dessa lei do autodesbaste para estimar o número de árvores e a biomassa por hectare, mas rechaçaram para o volume por hectare.

A relação de máxima densidade para uma espécie num habitat é possível ser definida com base na relação do número real de árvores por hectare pelo número máximo de árvores por hectare, o que resulta no Índice de Densidade Relativa - IDR, que é obtido através da expressão:

$$IDR = \frac{N_r}{N_m} \cdot 100 \quad (24)$$

Sendo que,  $N_r$  é o número real de árvores por hectare, e  $N_m$  é o número máximo de árvores por hectare.

Tang et al. (1994), estenderam a lei do autodesbaste para povoamentos em densidade completa e subestocados. Constataram que o autodesbaste começa antes de atingir a máxima densidade, e que a taxa de autodesbaste incrementa com a densidade, atingindo o máximo na densidade máxima do povoamento. No modelo, a lei do autodesbaste pode ser considerada um caso especial, pois permite obter para um diâmetro a densidade de árvores e a produção. Esse modelo de autodesbaste é expresso por:



$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right] \quad (25)$$

Sendo que,  $t$  é a idade do povoamento,  $\beta$  a taxa máxima de autodesbaste do povoamento de densidade completa,  $N(t)$  a densidade de árvores por hectare no tempo  $t$ ,  $d(t)$  o diâmetro médio das árvores no tempo  $t$  (cm),  $S_f$  o índice mínimo de densidade,  $\gamma$  o índice de autodesbaste, e  $d_o$  o diâmetro básico padrão (25 cm).

O  $\delta$  é uma constante que dependente da integração dos valores iniciais de densidade do povoamento ( $N_1$ ) e do diâmetro médio inicial ( $d_1$ ). O valor desta constante é obtido através da seguinte relação:

$$\delta = (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \quad (26)$$

Alternativamente, pode-se considerar que o parâmetro  $\delta$  de um povoamento específico descreve a diferença entre a densidade inicial e a máxima obtida do povoamento. Se  $S_1$  representa o índice de densidade inicial do povoamento, tem-se que:

$$\delta = \left( \frac{1}{N_1} \right)^\gamma (S_f^\gamma - S_1^\gamma) \quad (27)$$

Então, pode-se definir  $\delta$  como o coeficiente de deficiência do estoque do povoamento. Quando  $\delta = 0$ , na equação, tem-se a forma familiar do  $-3/2$  da lei do autodesbaste. Assim, por conveniência, para estimar a densidade dos povoamentos, a equação passa a ser escrita como sendo:

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \right] \quad (28)$$

A primeira observação da densidade do povoamento ( $N_1$ ) e diâmetro médio inicial ( $d_1$ ) são usados para obter o  $\delta$  na equação. Todos os dados são 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  $\beta$  através de regressão não linear, cujo procedimento de cálculo é descrito em Tang et al. (1994).

Barrreto (1994) estudou a clarificação do autodesbaste e desbaste, utilizando modelos derivados da teoria unificada que estabelecem para povoamento puro autodesbastado e regulares, o processo de autodesbaste e os efeitos dos desbastes no crescimento e estrutura do povoamento. O autor sustenta que: o autodesbaste atua como um desbaste neutro; a árvore média do autodesbaste é igual à árvore média do povoamento, quando esse ocorre; e, que os povoamentos puros e autodesbastados são fractais.

### **3.4 Diagrama de Manejo da Densidade**

O Diagrama de Manejo da Densidade – DMD é baseado na teoria da lei da potência do  $-3/2$  de autodesbaste, desenvolvida por cientistas japoneses para colheitas agrícolas entre os anos de 1960 e 1970 (YODA et al. 1963). Esta lei declara que "...para qualquer densidade determinada há um máximo de biomassa comum que uma planta individual pode atingir, porém só pode ser alcançado esse aumento adicional de biomassa da planta a uma densidade populacional mais baixa, para o que, algumas plantas individuais têm que morrer...".

Esta lei foi estendida para aplicação em colheitas florestais na América do Norte, primeiramente por Drew e Flewelling (1979), quando sugeriram que há uma relação altamente previsível entre o tamanho e o máximo número de árvores do povoamento que podem ser sustentadas em qualquer local para determinadas espécies.

O Diagrama de Manejo da Densidade – DMD é uma técnica prática baseada na teoria do autodesbaste das árvores de um povoamento. Estes diagramas permitem visualizar a mudança do diâmetro médio, altura, densidade e volume dos povoamentos equiâneos puros. As pesquisas de manejo podem avaliar alternativas de regime de densidade a partir da densidade inicial de plantio e intensidade de desbaste, considerando um objetivo de manejo (LONG e SMITH, 1985).

Os Diagramas de Manejo da Densidade dos povoamentos apresentam limitações de uso que são baseadas em condições de: uma única espécie, única camada do dossel; povoamento equiâneo; e, da previsão de valores médios do povoamento e de uso de tabelas de produção (MINISTRY OF FORESTRY, 1999).

Para o estudo da densidade populacional, Drew e Flewelling (1977 e 1979), introduziram na América do Norte, em meados de 1970, o Diâmetro Médio Quadrático (DMQ) para auxiliar ao manejo da máxima produção de madeira, sendo utilizado em trabalhos realizados por Wilson (1946), Smith e Long (1985), Dean e Jokela (1992), Smith e Woods (1997), entre outros.

Yoda et al. (1963) propuseram uma dimensão geométrica da lei do autodesbaste, baseada na suposição de que: o autodesbaste ocorre quando a cobertura do povoamento excede a 100 % as plantas de muitas espécies são sempre similares geometricamente em amoldar-se sem consideração ao estágio de crescimento ou condições do habitat. Consequentemente, esta concepção implica que a biomassa média das plantas ( $\bar{v}$ ) é diretamente proporcional ao cúbico de muitas dimensões lineares específicas (l):

$$\bar{v} \propto l^3 \quad (29)$$

Sendo a área média ocupada (s) por uma planta diretamente proporcional ao quadrado desta dimensão linear:

$$s \propto l^2 \quad (30)$$

E inversamente proporcional a densidade de plantas:

$$s \propto N^{-1} \quad (31)$$

Considerando estas relações:  $s \propto l^2 \propto (l^3)^{2/3} \propto \bar{v}^{-2/3} \propto N^{-1}$ , então se tem que  $\bar{v} \propto N^{-3/2}$ , e incorporando uma constante de proporção ( $b_0$ ), resulta na derivada geométrica da lei do autodesbaste:

$$\bar{v} = b_0 N^{-3/2} \quad (32)$$

Shimano (2000) estudando a estrutura e regeneração de florestas primárias e climas naturais estabeleceu que a densidade de árvores é proporcional ao tamanho das árvores, assumindo que:

$$N = a_0 / s \quad (33)$$

Sendo que, “N” é a densidade de árvores, “s” o espaço ocupado pelas árvores, e “a<sub>0</sub>” uma constante de proporção.

Se a ocupação horizontal do espaço “s” é proporcional ao quadrado do diâmetro, a fórmula anterior passa a ser expressa por:

$$N = a / d^2 \quad (34)$$

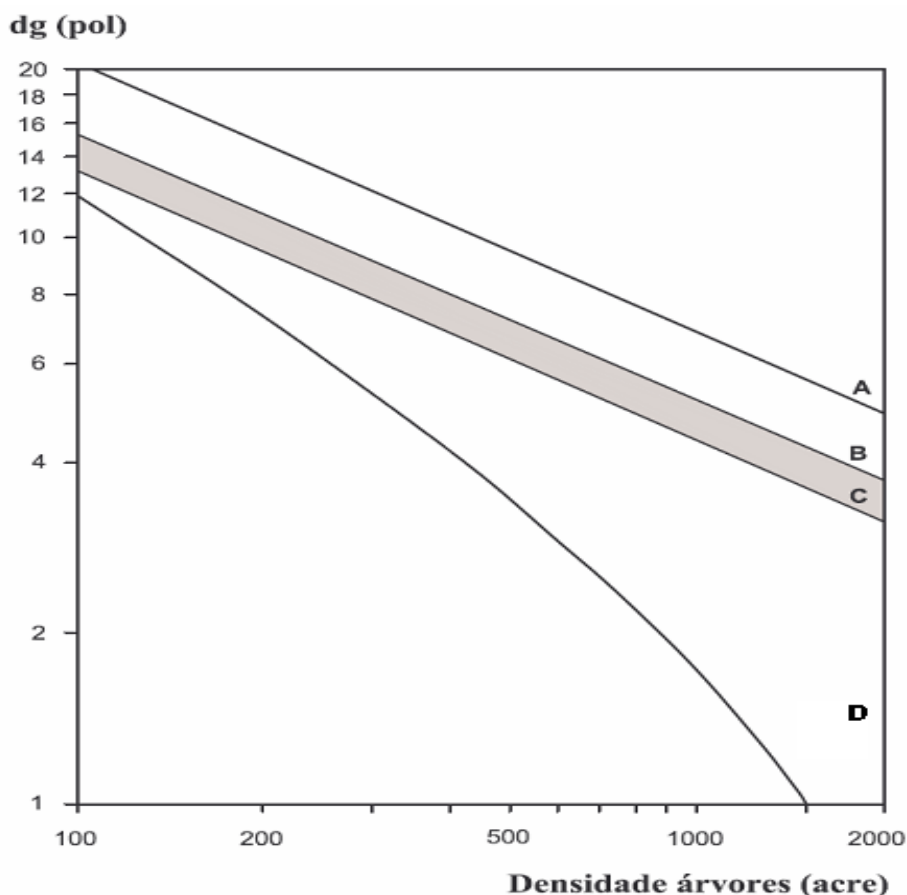
ou

$$\ln N = \ln a - 2 \ln d \quad (35)$$

Sendo que, “a” é uma constante proporcional, “N” a densidade de árvores por hectare, e “d” o diâmetro médio.

Então, nesta relação de potência o valor do coeficiente angular é -2 que numa escala de duplo logaritmo representam a média de competição por luz solar entre as árvores. Esse conceito descrito é essencial para muitos modelos de divisão de espécies em populações mistas que individualmente obedecem a lei de potência -3/2, definida por Yoda et al. (1963).

Saunders e Puettmann (2000) encontraram para *Picea glauca*, através do uso da lei do autodesbaste do coeficiente angular de valor igual a -3/2 uma relação linear da densidade de árvores pelo diâmetro médio quadrático, em unidade logarítmica, representada na linha A da Figura 1. Esta linha A marca o limite máximo da combinação entre a relação da densidade e diâmetro, que é dependente da mortalidade de indivíduos do povoamento.



**Figura 1 – Diagrama de Manejo da Densidade (DMD): A – Linha de máxima densidade e diâmetro, B – início da mortalidade, C – máxima produtividade do povoamento, D – ocupação das copas, C-B - Faixa escura, zona de manejo com estoque completo almejado. Fonte: Saunders e Puettmann (2000).**

Essa Figura 1 mostra o Diagrama de Manejo da Densidade (DMD), onde a linha A representa a máxima densidade com coeficiente angular de  $-3/2$  que é suportada pela população, que define o máximo volume médio das árvores obtido na densidade. Próximo da linha A, o volume médio das árvores é grande em baixa densidade e pequeno em alta densidade do povoamento.

A linha B define a área chamada de Zona de Iminente Competição e Mortalidade de indivíduos, é onde inicia a ocorrer mortalidade de árvores devido ao aumento da competição. Quando o povoamento cresce acima desta linha, inicia o autodesbaste. Então, a máxima taxa de produção do povoamento ocorre justamente abaixo desta linha B. A linha C indica o início da máxima produção de madeira, e a D representa a tendência do fechamento de copa.

Na zona entre as linhas C-B, em escuro, estaria a condição ótima de manejo em que se consegue o estoque completo.

Entre a linha B-A tem-se uma condição de povoamento superestocado, e abaixo da linha C uma condição de povoamento subestocado, onde não se tem o máximo aproveitamento do solo. A linha D representa a máxima ocupação da copa das árvores.

Para obtenção de Diagrama de Manejo da Densidade – DMD, o primeiro passo é obter a linha de diâmetro médio quadrático. Para isto, em cada classe de densidade são usadas as parcelas com o máximo diâmetro médio quadrático para ajuste do um modelo de densidade e diâmetro, anteriormente citado.

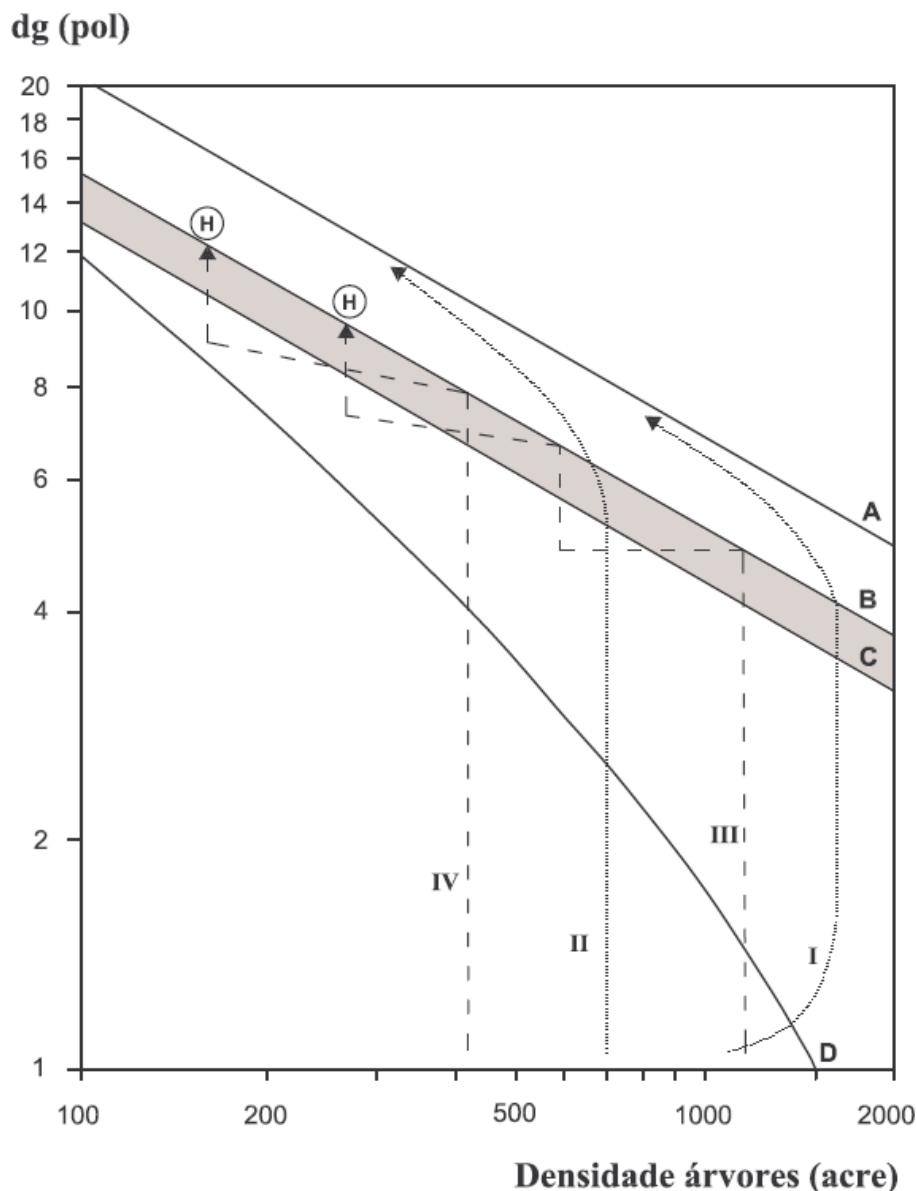
O resultado do ajuste do modelo de densidade e diâmetro produz uma linha média de Máxima Densidade e diâmetro – MDD (linha A), através dos dados individuais distribuídos abaixo e acima dessa linha média, representada na Figura 1.

O segundo passo para obtenção do Diagrama de Manejo da Densidade é determinar o início da mortalidade (linha B), e o início da produção máxima do povoamento (linha C).

Essas linhas, segundo Saunders e Puettmann (2000), são determinadas algebricamente a partir da linha A média máxima de densidade e diâmetro, através das 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. A linha D representa o fechamento da copa das árvores com um determinado diâmetro, como pode ser observado na Figura 2.

A trajetória de povoamentos não manejados pode ser observada na Figura 2, conforme Saunders e Puettmann (2000). Nesta Figura 2, as condições I e II representam povoamentos com densidade iniciais diferentes, sem desbaste. Geralmente, em plantações sem desbaste a trajetória do povoamento é dependente do Diagrama de Manejo da Densidade - DMD. Quando o tamanho é mínimo (diâmetro mínimo) o DMD é usado nos cálculos do povoamento, acontecendo o incremento. No caso, plantações com Máxima Densidade e diâmetro – MDD (linha I), o povoamento atinge a mortalidade (linha B) e move-se até aproximar-se da MDD (linha A). E, no segundo caso

(linha II), com densidade de plantio menor, a mortalidade ocorre mais tarde (linha B) e a MDD é atingida com um maior valor (linha A).



**Figura 2 – Trajetória padrão para dois povoamentos não manejados (linhas pontilhadas I e II) e dois manejados (linhas tracejadas III e IV), com diferentes densidades iniciais. Fonte: Saunders e Puettmann (2000).**

Nas situações de povoamentos manejados com desbaste (linhas III e IV) a produção da colheita ocorre no ponto H do diagrama, sobre a linha de início da mortalidade (linha B). Essas duas situações de manejo correspondem a plantações com densidade inicial diferente, onde o padrão de manejo com maior densidade de plantio, duas intervenções de desbaste, com trajetória

descrita pela linha tracejada (linha III), atinge a idade de colheita com menor densidade no ponto H (linha B). E, em outro padrão de manejo com densidade de plantio menor, com um desbaste (linha IV), a colheita ocorre com uma MDD maior, sendo obtido mais tarde.

Numa condição de manejo sem disturbância, portanto, sem desbaste, o crescimento em diâmetro e a taxa de autodesbaste estão relacionados ao crescimento da área basal do povoamento.

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. O povoamento começa a sofrer autodesbaste entre os valores de 50 e 55 % do IDP, com mortalidade de árvores devido a competição entre os indivíduos. A zona considerada ótima de manejo da densidade dos povoamentos para obtenção do estoque completo, ausência de autodesbaste, com bastante recuperação do volume, as operações de desbaste devem situar-se entre os limites acima e abaixo de 30% e 45% do SDI.

Por outro lado, Archibald e Bowling (1995) estabeleceram para *Pinus banksiana* que a posição da linha B, correspondente a zona de iminente competição e mortalidade, localiza-se a 0,55 (55 %), e a linha D, que define o ponto de fechamento das copas, localiza-se a 0,15 (15 %) do máximo volume da árvore média numa determinada densidade, respectivamente.

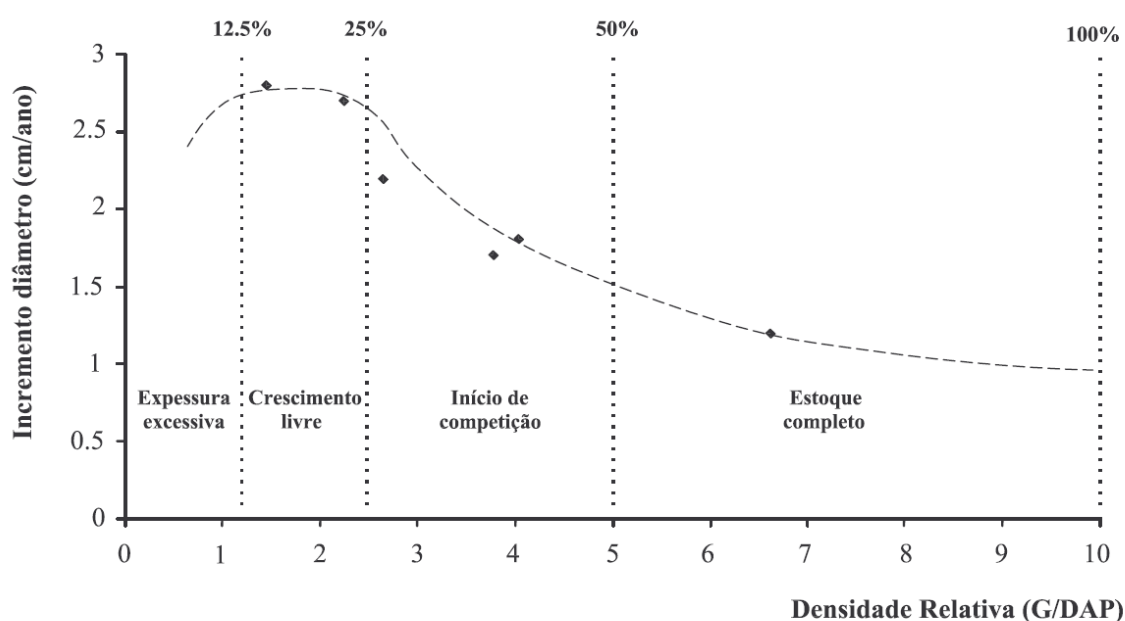
Drew e Flewelling (1979) confirmam que o ponto de fechamento de copa encontra-se a cerca de uma Densidade Relativa igual a 15 % e que abaixo desse ponto o crescimento por hectare é proporcional a densidade.

Devido a que, o índice de densidade do povoamento é uma função da densidade e do diâmetro médio. Essa relação torna-se muito complexa, o que dificultada a modelagem de uma equação (TANG et al., 1994).

Segundo Reid (2004) um Diagrama de Densidade do Povoamento define o grau de competição entre os indivíduos em florestas equiâneas, através de uma série de linhas paralelas determinadas a partir da linha de autodesbaste, como mostra a Figura 3. Disso, teoricamente, podem ser definidas zonas de competição para plantações: **Zona de Densidade Excessiva**, onde ocorre um crescimento restringido; **Zona de Iminente Mortalidade**, a qual se presume que não deve ser obtido; **Zona de Crescimento Livre**, onde o incremento em



diâmetro individual das árvores é máximo; **Zona de Estoque Completo**, onde a produtividade é maximizada. Uma vez a floresta passando da zona de estoque completo, o incremento em volume é simplesmente 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.



**Figura 3 – Incremento diamétrico em diferentes regimes de manejo de *Acacia melanoxylon* na Nova Zelândia, originados em diferentes zonas de competição. Fonte: Reid (2004).**

Como a densidade inicial afeta no tempo a relação do número de árvores com o diâmetro de copa, mas bem antes o diâmetro, Laasasenaho e Koivuniemi (1990) estabeleceram a seguinte relação:

$$\ln N = b_0 + b_1 \ln d_c \quad (36)$$

Sendo que,  $d_c$  é o diâmetro da copa, e  $N$  o número de árvores por hectare.

Dependendo da condição de competição do povoamento a relação pode ser obtida por uma equação linear do diâmetro de copa em função do diâmetro

médio, utilizada por Saunders e Puettmann (2000) e Márquez-Linares e Alvarez-Zagoya (1995), sendo expresso por:

$$d_c = b_0 + b_1 d \quad (37)$$

Sendo que,  $d_c$  é o diâmetro da copa, e  $d$  o diâmetro da árvore correspondente.

Essa mesma equação foi utilizada por Márquez-Linares e Alvarez-Zagoya (1995) para estimar a área de copa de *Pinus cooperi* var. *ornelasi*, no México:

$$A_c = \pi.(D_c / 2)^2 \quad (38)$$

Sendo que,  $A_c$  é a área de copa de uma árvore ( $m^2$ ), e  $D_c$  o diâmetro de copa das árvores.

Assim, fazendo uso dessa equação obtém-se o número máximo de árvores de competição por hectare de um diâmetro dado considerado um espaçamento triangular entre os indivíduos, através da seguinte expressão:

$$N_m = A_a / A_c \quad (39)$$

Sendo que,  $N_m$  é o número de árvores por hectare,  $A_a$  a área disponível às árvores, considerando um espaçamento triangular, e  $A_c$  a soma das áreas de copa das árvores que ocupam a superfície do solo do povoamento.

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 do povoamento, enquanto que, o diâmetro médio quadrático é obtido pela média da área basal do povoamento, sendo calculado através da seguinte fórmula:

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot \bar{G} / N}{\pi}} \cdot 100 \quad (40)$$

Sendo que,  $\bar{G}$  é a área basal média por hectare do povoamento, e N a densidade de árvores por hectare do povoamento.

De outra maneira, o diâmetro médio quadrático pode ser obtido a partir dos diâmetros aritméticos medidos numa amostragem do povoamento, usando a fórmula:

$$d_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (41)$$

Sendo que, d é o diâmetro medido à altura do peito, e n o número de árvores medidas.

O diâmetro médio quadrático não é influenciado grandemente por “outliers”, especialmente por extremos de pequenas e grandes densidades de árvores na parcela. Em termos práticos, para plantações o diâmetro médio quadrático é um pouco maior que o diâmetro médio aritmético, cerca de 0,25 a 1,27 cm, e o diâmetro médio quadrático pode ser substituído pelo diâmetro médio aritmético. Entretanto, se houver uma grande diferença de árvores pequenas e grandes no povoamento, o que normalmente ocorre em povoamentos inequidanos, então esta concepção não fornece precisão e o diâmetro médio quadrático deve então ser calculado e usado.

De acordo com Tang (1991) a área basal do povoamento pode ser definida através do modelo inicial de densidade e tamanho, sendo expresso por:

$$G(S(t), t) = \beta \left\{ 1 - \exp \left[ -b_4 (S(t)/1000)^{b_5} (t - t_0) \right] \right\}^{b_3} \quad (42)$$

Sendo que, S(t) é o índice de densidade do povoamento, que é uma função da idade do povoamento, t a idade do povoamento,  $t_0$  a idade inicial, e  $\beta, b_3, b_4$  e  $b_5$  os parâmetros.

A relação da área basal com o índice de densidade do povoamento pode ser derivada da fórmula:

$$S(t) = \left[ 40000 / \pi \cdot d_0^2 \right]^{(\beta/2)} N(t)^{1-(\beta/2)} G(S(t), t)^{(\beta/2)} \quad (43)$$

Sendo que,  $d_0$  é o diâmetro padrão,  $N(t)$  o número de árvores por hectare na idade  $t$ ,  $G$  a área basal por hectare do índice de densidade do povoamento da idade  $t$ .

Assumindo um povoamento com um diâmetro médio e densidade de árvores por hectare na idade, a área basal inicial é igual a:

$$G_1 = N_1 \cdot \pi \cdot d_1^2 / 40000 \quad (44)$$

Sendo que,  $G_1$  é a área basal no tempo  $t_1$ ,  $N_1$  o número e árvores por hectare inicial no tempo  $t_1$ , e  $d_1$  o diâmetro médio no tempo  $t_1$ .

Então, o índice de densidade do povoamento  $S_1$  pode ser calculado pela equação proposta por Liu (1987):

$$S_1 = N(t) [d(t) / d_0]^\beta \quad (45)$$

Sendo que,  $d_0$  é o diâmetro padrão base, sendo usualmente definido como sendo igual ao valor de 25 cm.

Sabendo-se o índice de densidade do povoamento  $S(t)$  e a área basal  $G(S(t), t)$ , pode-se calcular a densidade do povoamento  $N(t)$  e o diâmetro médio  $d(t)$ , pelas equações:

$$N(t) = \left[ \pi \cdot d_0^2 / 40000 \right]^{[(\beta/(2-\beta))]} G(S(t), t)^{[\beta/(\beta-2)]} S(t)^{[2/(2-\beta)]} \quad (46)$$

$$D(t) = \left\{ 40000 \cdot G(S(t), t) / \left[ \pi \cdot d_0^\beta S(t) \right] \right\}^{[1/(2-\beta)]} \quad (47)$$

Jennings (1991) sugere que a área basal limite de  $45 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  aproxima-se muito da linha de autodesbaste de *Acacia melanoxylon* e proporciona um guia útil de manejo da densidade das populações.

Swift (2003) para estimar o volume médio das árvores do povoamento no Diagrama de Manejo da Densidade, utilizou a seguinte equação:

$$\ln v = b_0 + b_1 \cdot \ln N \quad (48)$$

Sendo que,  $v$  é o volume médio das árvores do povoamento ( $\text{m}^3$ ),  $N$  a densidade de árvores do povoamento ( $\text{ha}^{-1}$ ), e  $b_0$  e  $b_1$  são parâmetros.

Para o mesmo objetivo, Penner et al. (2004), para determinação das isolinhas do volume de um Diagrama de Manejo da Densidade do povoamento, recomenda testar as seguintes equações de volume:

$$\ln v = b_0 + b_1 \cdot \ln N \quad (49)$$

$$\ln v = b_0 + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln N \quad (50)$$

$$v = \frac{1}{b_0 + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln N} \quad (51)$$

$$\ln v = b_0 + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln h_0 \quad (52)$$

Sendo que,  $v$  é o volume das árvores,  $d$  o diâmetro à altura do peito,  $h_0$  a altura dominante,  $N$  o número de árvores por hectare, e  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  os parâmetros.

Kumar et al. (1995) utilizaram a equação de Reineke para determinar um Diagrama de Manejo da Densidade para plantações de *Tectona grandis* na Índia, tendo obtido um coeficiente angular de  $-1,6$ , tendo confirmado o valor indicado inicialmente por Reineke e contrariando a lei do autodesbaste do coeficiente angular de  $-3/2$  de Tang. Para estimar o volume das árvores usaram a seguinte equação:

$$v = b_0 + b_1 \cdot (h \cdot d)^{b_2} \quad (53)$$

Sendo que,  $v$  é o volume das árvores,  $h$  a altura,  $d$  o diâmetro à altura do peito, e  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  os parâmetros.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Localização da área**

Os dados foram levantados em áreas pertencentes à empresa Klabin S.A., localizada no município de Otacílio Costa, região fisiográfica denominada de Planalto Central Catarinense, no Estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 1986).

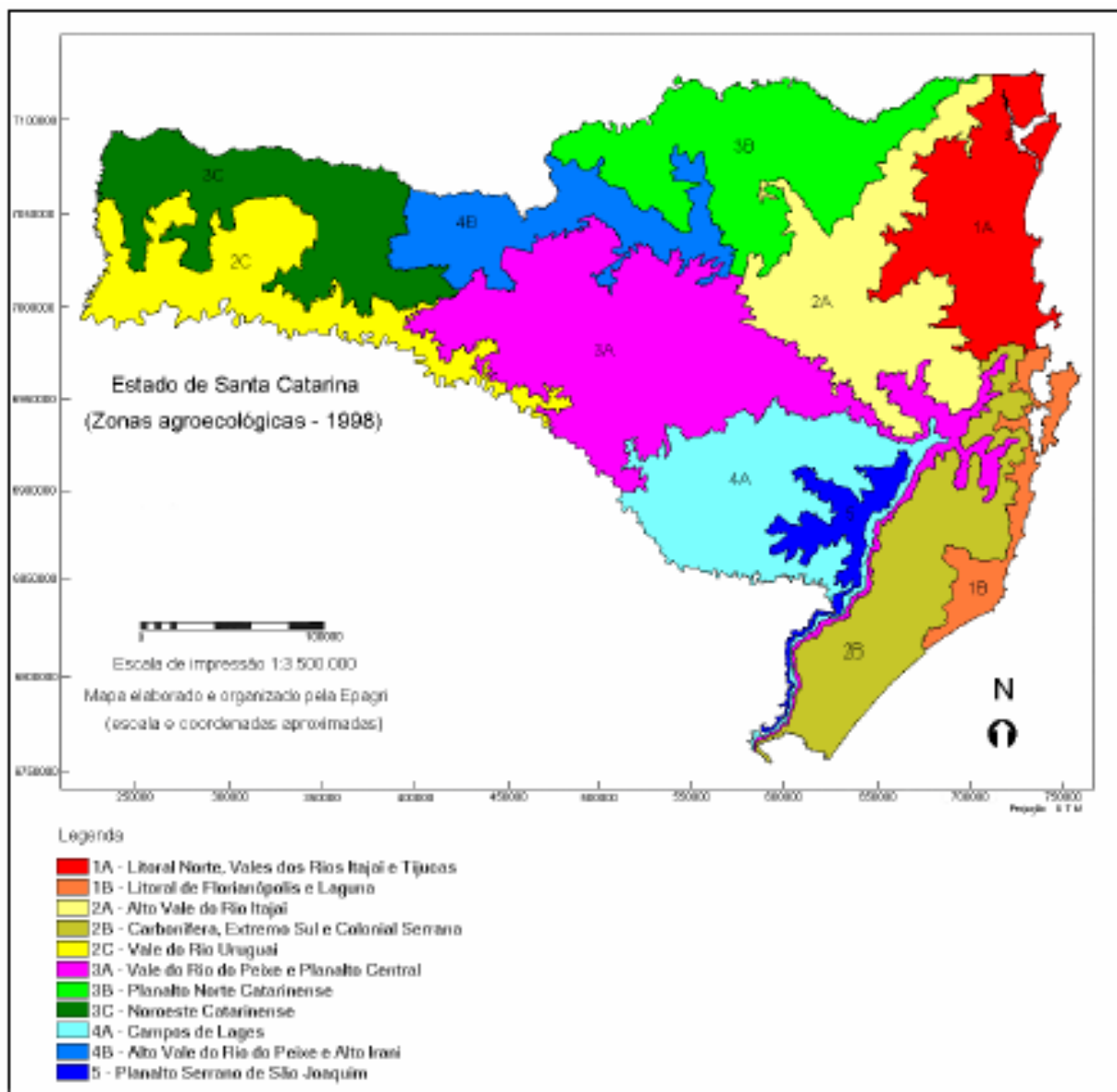
### **4.2 Caracterização da área**

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo "Cfb", mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos, não apresentando estação seca definida. A precipitação média anual é de 1.808 mm, distribuída em 124 dias, temperatura média anual de 17,8°C (MOTTA *et al.*, 1971).

Os dados obtidos em estação meteorológica localizada próxima da área de estudo indicam uma precipitação média anual de 1.808 mm, distribuída em 124 dias, temperatura média anual de 17,8°C, sem período de seca e vento predominante é o nordeste.

Na região, onde se localiza a área do estudo, apresenta tipos de solos: 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).

Segundo a Embrapa (1999), a região tem aptidão climática para *Pinus taeda*, pois se localiza na sub-região agroecológica 3A, denominada de Vale do Rio das Pedras e Planalto Central, considerada, devido às condições climáticas, preferenciais para a espécie, conforme pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4 – Mapa das sub-regiões agroecológicas de Santa Catarina. Fonte: EMBRAPA (1999).**

De acordo com a avaliação da aptidão pedoclimática do *Pinus taeda* para o Estado de Santa Catarina, as áreas de florestas da empresa localizam-se na Classe Preferencial 3A, porém a espécie é também indicada para cultivo predominante nas sub-regiões 2A, 3B, 4A e 4B (EMBRAPA, 1999).

A altitude do local é bastante variável ficando dentro das isométricas 800 e 1200 m acima do nível do mar (MOTTA et al., 1971).

O solo da área do experimento é classificado como latossolo Bruno, aluminico TB, horizonte A húmico, textura argilosa e relevo suavemente ondulado.



### 4.3 Origem dos dados

Os dados utilizados no presente estudo são provenientes de um experimento concebido com base no Modelo Nelder Modificado, instalado em 1988, com idade atual de 20 anos. O delineamento estatístico utilizado foi em blocos ao acaso, com três repetições e nove tratamentos, sendo estes definidos pelo espaçamento inicial de plantio. Destes tratamentos foram utilizados os 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, 2,5x3,0 m.

Na implantação do experimento, a área sofreu preparo de solo, com uma gradagem leve, realizada com trator agrícola. O plantio foi realizado manualmente, tendo sido realizados os tratos culturais comumente utilizados, como: roçadas, coroamentos e combate a formiga.

O experimento foi medido, periodicamente, até os 18 anos de idade, em 2006. No interior de cada unidade amostral foram medidas a circunferência à altura do peito e a altura das árvores.

### 4.4 Metodologia empregada

#### 4.4.1 Seleção dos modelos de densidade e diâmetro

O estudo dos modelos de densidade e diâmetro foi realizado através do número de árvores por hectare em função do diâmetro médio das árvores. Para isto, foram testadas as equações de Reineke (1933), Yoda et al. (1963), Zeide (1995) e Tang et al. (1994). Estes modelos de densidade são expressos por:

a) Modelo da densidade e diâmetro de Reineke (1933):

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \ln(d) \quad (54)$$

b) Modelo da densidade e diâmetro de Yoda et al. (1963):

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \ln(d) - c_1 (\ln(d))^2 \quad (55)$$

c) Modelo da relação densidade e diâmetro de Zeide (1995):

$$\ln(N) = \alpha - \beta \ln(d) + \chi h \ln(d) \quad (56)$$

d) Modelo do autodesbaste de Tang et al. (1994):

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right] \quad (57)$$

Sendo que, “d” é o diâmetro médio quadrático das árvores, “h” a altura total média, “N” o número de árvores por hectare; “t” a idade,  $\beta$  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<sub>f</sub>” índice de máxima densidade do povoamento,  $\gamma$  o índice de autodesbaste, e “d<sub>o</sub>” o diâmetro padrão básico igual a 25 cm.

A constante  $\delta$  foi determinada pela densidade inicial do povoamento (N<sub>1</sub>), o diâmetro médio inicial (d<sub>1</sub>) e d<sub>o</sub> diâmetro padrão de 25 cm, através da seguinte fórmula:

$$\delta = (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \quad (58)$$

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

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma} \right] \quad (59)$$

A primeira observação da densidade do povoamento (N<sub>1</sub>) e diâmetro médio (d<sub>1</sub>) foram usados no cálculo de  $\delta$  na equação 58. 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  $\beta$ , cujo procedimento de cálculo é descrito em Tang et al. (1994).

Esse 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 do levantamento das parcelas.

Os três parâmetros  $S_f$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  foram determinados por regressão não linear, sendo que como valores iniciais, os parâmetros  $S_f$  e  $\beta$  foram estimados na equação de Reineke e o  $\gamma$  foi tomado o valor obtido por Del Rio et al. (2001).

Para verificação da precisão estatística dos modelos de densidade e diâmetro foi determinado o coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa e o coeficiente de variação.

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

a) Tendência (Bias)

$$BIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (60)$$

b) Eficiência (E)

$$E = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \quad (61)$$

c) Desvio padrão residual relativo (S%):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (62)$$

d) Desvio médio relativo (D%):

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \cdot 100 \quad (63)$$

e) Qui-quadrado ( $\chi^2$ )

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad (64)$$

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

A seleção do modelo de densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio do povoamento foi realizada pela somatória dos escores, de 1 a  $n$  modelos testados.

#### 4.4.2 Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento

Para a determinação dos Índices de Densidade do Povoamento – IDP foi utilizado o modelo de Tang et al. (1994), previamente ajustado aos dados de densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio das parcelas permanentes inventariadas.

Com essa 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 - IDPs foi definido um diâmetro padrão de 25 cm, que serviu de base para estratificação proporcional das densidades de árvores por hectare na determinação dos IDPs. Para isso, foi utilizado um intervalo de IDP igual a 200, tomado arbitrariamente no momento em que o valor de diâmetro padrão é igual a 25

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

#### 4.4.3 Formulação do Diagrama de Manejo da Densidade

Para estimar o volume médio das árvores foi ajustada e selecionada uma das equações recomendadas por Penner et al. (2004):

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N \quad (65)$$

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln d \quad (66)$$

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G \quad (67)$$

$$\bar{v} = b_0 + b_1 \cdot (d \cdot h)^{b_2} \quad (68)$$

$$\ln \bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln h \quad (69)$$

Sendo que,  $\bar{v}$  é o volume médio das árvores ( $m^3$ ),  $d$  o diâmetro à altura do peito (cm),  $N$  o número de árvores ( $ha^{-1}$ ),  $G$  a área basal ( $m^2ha^{-1}$ ), e  $b_0$ ,  $b_1$ , e  $b_2$  são parâmetros.

Na formulação dos Diagramas de Manejo da Densidade - DMD foi observada a seguinte seqüência básica:

- A seleção da equação de densidade e tamanho de árvores por hectare pelo diâmetro médio, para o que foi usado o modelo proposto por Tang et al. (1994).
- A determinação dos Índices de Densidade do Povoamento para um intervalo de classe de 200, para o diâmetro padrão de 25 cm.
- As variáveis expressas em tamanho do modelo densidade e tamanho, no Diagrama de Manejo da Densidade, foram definidas pelo: diâmetro médio, volume médio, área basal e volume por hectare.

- A estimativa do volume médio foi obtida por equação previamente ajustada e selecionada.
- Determinação da área basal média por hectare pelo diâmetro médio ( $\bar{d}$ ) e número de árvores por hectare (N), em cada IDPs, foi obtida através da equação:

$$\bar{G} = \frac{\pi \bar{d}^2}{4} \cdot N \quad (70)$$

- O volume por hectare nos IDPs foi estimado pelo volume médio pela área basal por hectare, através da equação:

$$V = N \cdot \bar{v} \quad (71)$$

Sendo que, V é o volume ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ), N o número de árvores (ha), e  $\bar{v}$  o volume da árvore média ( $\text{m}^3$ ).

#### 4.4.4 Processamento dos dados

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

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Seleção do modelo de densidade de árvores

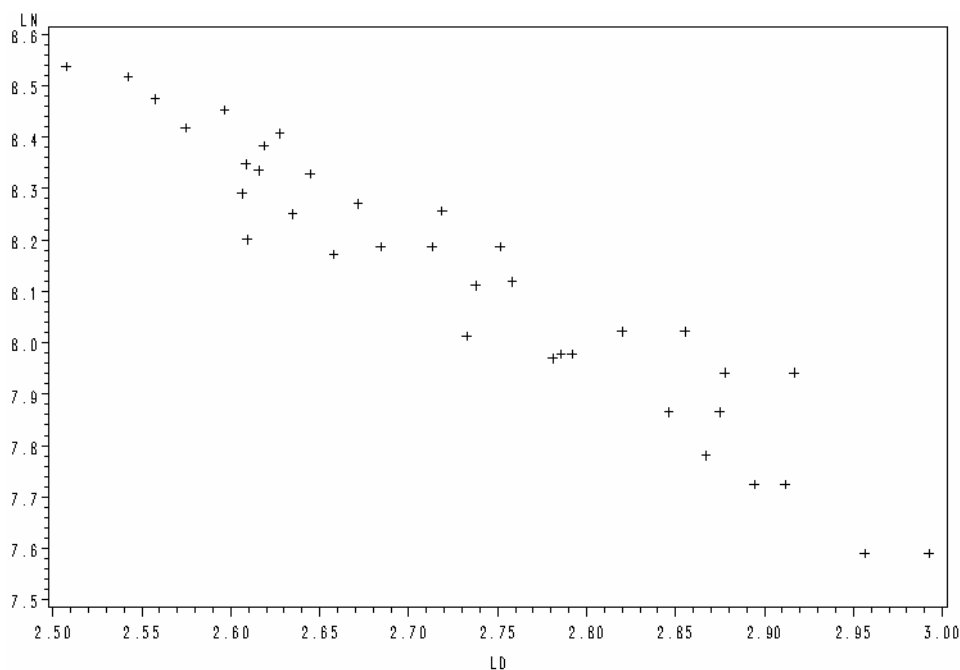
Os dados de número de árvores por hectare e diâmetro médio correspondentes são oriundos de parcelas permanentes, instaladas em povoamentos de densidade completa, implantados em espaçamentos de 1,5x1,0 m e 2,0x1,0 m, medidos até 18 anos, tendo originado 50 observações anuais.

Na Tabela 1 encontram-se os valores de número de árvore por hectare e diâmetro médio, obtidos nestas parcelas permanentes. Observou-se que, do total das observações anuais, o número médio de árvores foi de 3.951 ha<sup>-1</sup>, com um desvio padrão de 1.079, valor máximo de 6.042 ha<sup>-1</sup>, correspondente a densidade de plantio de 1.979 ha<sup>-1</sup> da densidade remanescente, aos 18 anos de idade. Igualmente, o diâmetro médio do total de observações foi de 14,2 cm, com um desvio padrão de 2,7, valor mínimo de 10,1 cm e máximo de 19,94 cm.

**Tabela 1 – Resumo dos dados utilizados no presente trabalho**

| <b>Variável</b>        | <b>N</b> | <b>Média</b> | <b>Desvio padrão</b> | <b>Valor Mínimo</b> | <b>Valor Máximo</b> |
|------------------------|----------|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Número de árvores (ha) | 50       | 3.951        | 1.079                | 1.979               | 6.042               |
| Diâmetro (cm)          | 50       | 14,2         | 2,7                  | 10,1                | 19,94               |

As freqüências observadas do número de árvores por hectare em função do diâmetro médio do povoamento, colocados numa escala logarítmica, encontram-se relacionadas na Figura 5. Nessa Figura 5, observa-se que a tendência do número de árvores por hectare e diâmetro médio representa uma distribuição linear, como foi inicialmente preconizado por Reineke (1933) e, assim, entendido por muitos outros pesquisadores, para várias espécies e tratamentos.



**Figura 5 – Densidade de árvores por hectare observado (LN) em função do diâmetro médio (LD), em escala logarítmica, de um povoamento altamente estocado de *Pinus taeda* L.**

Com os dados de número de árvores por hectare e diâmetro médio observados nas parcelas permanentes do povoamento, foram ajustadas as equações de densidade e diâmetro e de autodesbaste, propostas por: Reineke (1933), Yoda et al. (1963), Zeide (1995) e Tang et al. (1994), equações 54, 55, 56 e 57, respectivamente. Os resultados do processamento dessas equações encontram-se discriminadas na Tabela 2.

Os resultados estatísticos dos modelos de densidade e diâmetro, utilizados para ajustar as freqüências de árvores por hectare em função do diâmetro médio do povoamento, mostraram-se altamente precisas, com um coeficiente de determinação superior a 0,88 e coeficiente de variação inferior a 1,25 %. Entre os modelos estudados, o de autodesbaste proposto por Tang et al. (1994), equação 57, apresentou a melhor performance estatística, com um ótimo ajuste, baixo erro padrão da estimativa e pequeno coeficiente de variação.

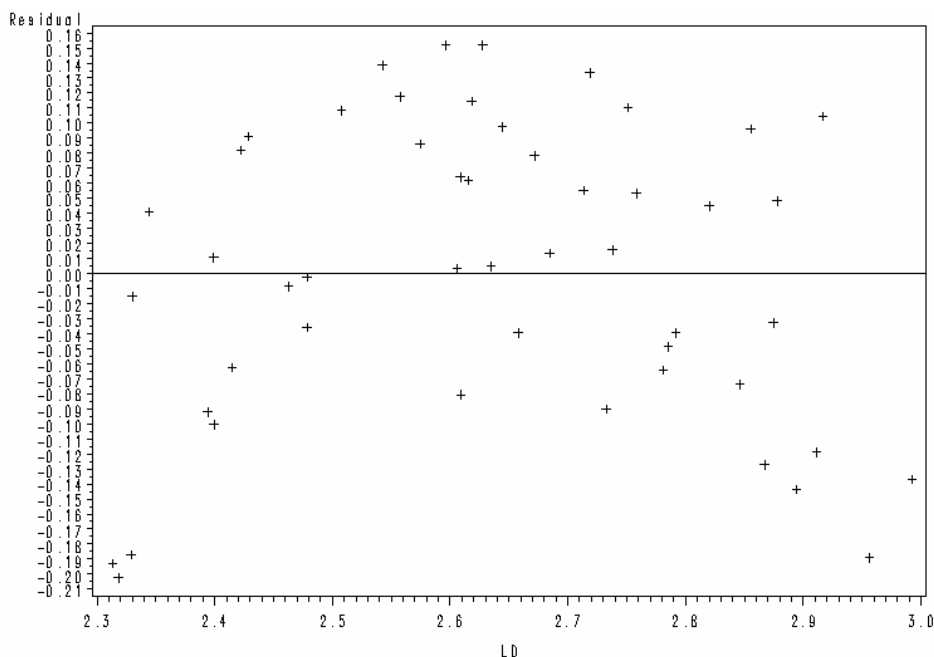


**Tabela 2 - Resultados estatísticos dos modelos de densidade e diâmetro e de autodesbaste ajustados**

| Nº | Modelos  | R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub> | S <sub>yx</sub> | CV%  |
|----|--|-------------------------------|-----------------|------|
| 54 | $\ln(N) = 12,06101 - 1,4482 \cdot \ln(d)$  | 0,88                          | 0,1006          | 1,25 |
| 55 | $\ln(N) = 4,9420 = 3,7641 + 3,7641 \cdot \ln(d) - 0,9228 \ln^2 d$  | 0,92                          | 0,0986          | 1,22 |
| 56 | $\ln(N) = 10,5401 - 0,7775 \cdot \ln d - 0,0018h \cdot \ln(d)$   | 0,89                          | 0,0974          | 1,18 |
| 57 | $\ln N = \ln 1494,5 - \frac{1}{16,56} \ln \left[ \begin{array}{l} (d/25)^{1,6523 \cdot 16,56} \\ + (1494,5/N_1)^{16,56} - (d_1/25)^{1,6523 \cdot 16,56} \end{array} \right]$ | 0,99                          | 0,0948          | 1,17 |

O modelo de densidade e diâmetro proposto por Reineke (1933), equação 54, apresentou o menor coeficiente de determinação entre os modelos ajustados, igual a 0,88, erro padrão da estimativa de 0,1006 e maior coeficiente da variação de 1,25 %. Esse modelo apresentou uma Bias de 0,0097 e uma Eficiência de 0,8850. Embora tenha apresentado uma razoável precisão estatística, a dispersão dos resíduos da variável logarítmica da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro foi muito irregular, com tendências a superestimar um maior número de valores em torno da média dos diâmetros, como pode ser observado na Figura 6.

O coeficiente angular deste modelo de Reineke (1933), da Tabela 2, foi igual a -1,4482, portanto, não corresponde ao que foi inicialmente postulado, que estabeleceu para a relação entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio quadrático em povoamento sem desbaste uma linha reta, com um valor constante do coeficiente angular igual a -1,605, para todas as espécies. Por outro lado, também, não se enquadra nos valores citados por Del Rio et al. (2001), entre -2,33 e -1,54 para *Pinus sylvestris*, na Espanha. Isto indica que o coeficiente angular do modelo de Reineke é diferente para cada espécie e não constante, contrariando o que foi inicialmente formulado por Reineke (1933).



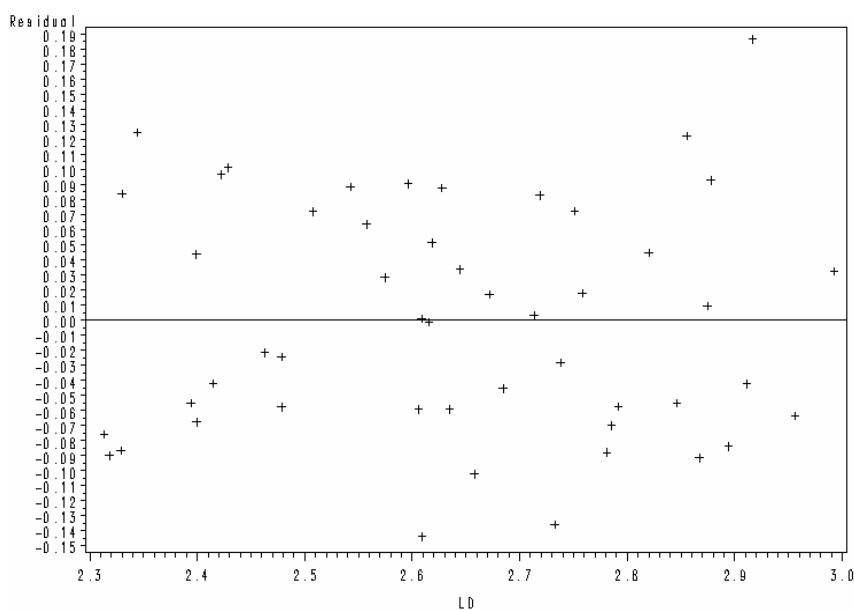
**Figura 6 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro obtido de Reineke (1933), equação 54.**

O modelo de densidade e diâmetro proposto por Yoda et al. (1963), equação 55 da Tabela 2, apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,92, erro padrão da estimativa de 0,0986 e coeficiente de variação igual a 1,22 %.

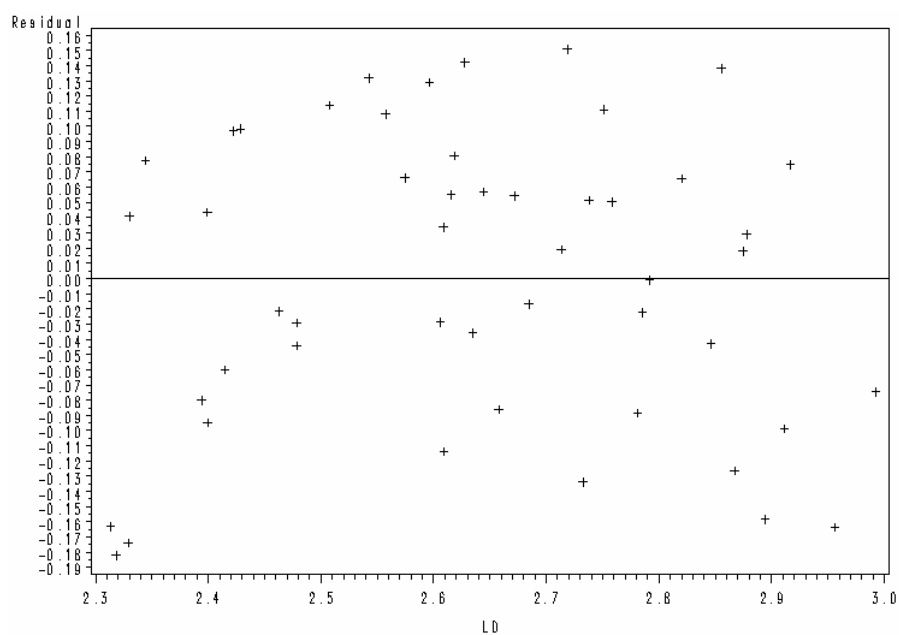
Na Figura 7 pode-se observar a dispersão dos valores residuais do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro médio do povoamento, obtidos através deste modelo.

O modelo de densidade e diâmetro proposto por Zeide (1995), equação 56 da Tabela 2, apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,89, erro padrão da estimativa de 0,0974, coeficiente de variação igual a 1,18 %, uma Bias de 0,0089 e Eficiência de 0,8946.

Na Figura 8 pode-se observar a dispersão dos valores residuais do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo de diâmetro médio do povoamento, que se mostrou muito regular.



**Figura 7 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro obtidos no modelo de Yoda et al. (1963), equação 55.**

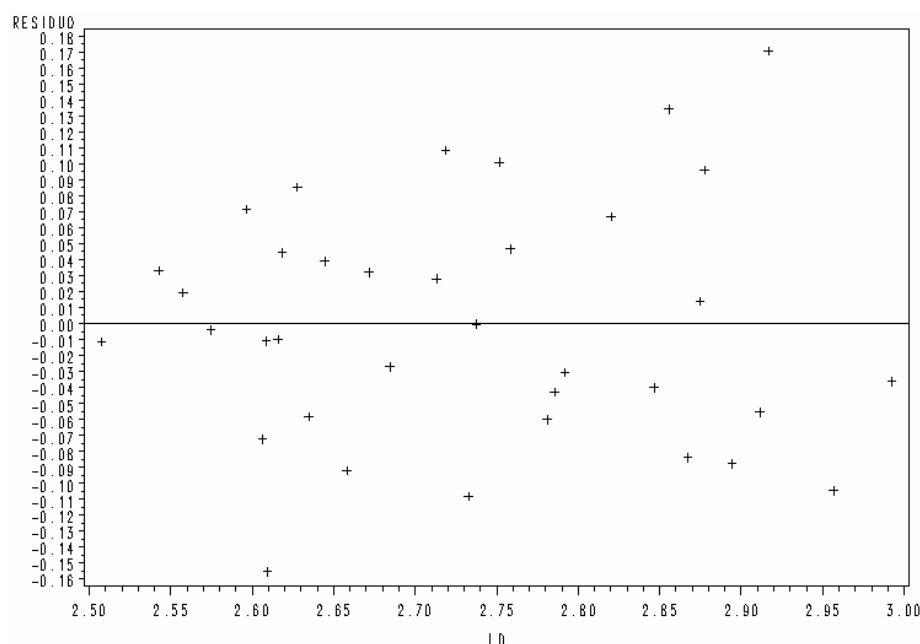


**Figura 8 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare por logaritmo do diâmetro obtidos no modelo de Zeide (1995), equação 56.**

Estatisticamente, o modelo de autodesbaste proposto por Tang et al. (1994), equação 57 da Tabela 2, foi o que apresentou melhor precisão entre os modelos testados. Esse modelo apresentou o maior coeficiente de determinação, igual a 0,99, o menor erro padrão da estimativa igual a 0,0948

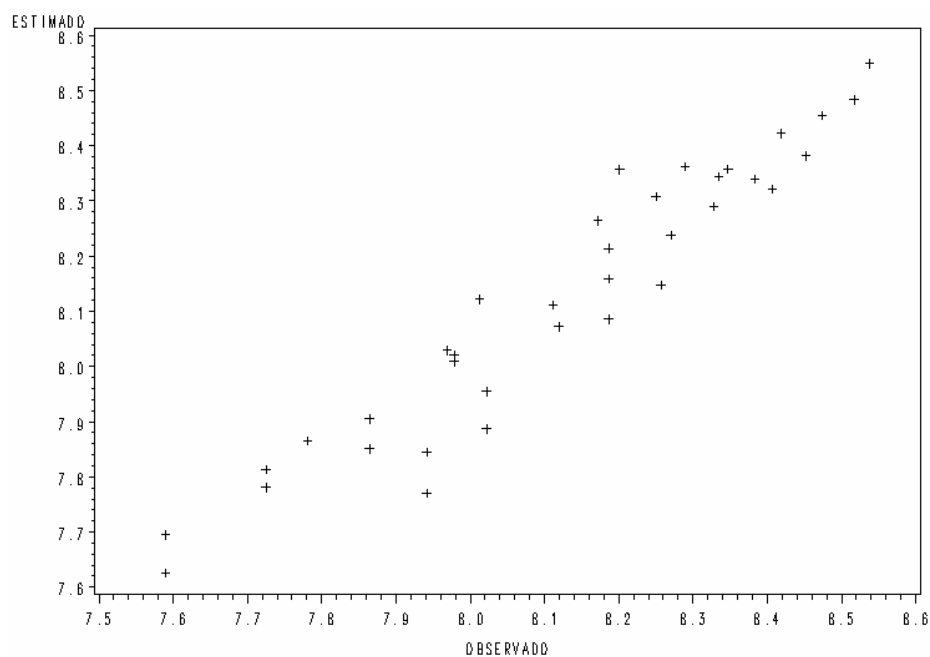
e, também, o menor coeficiente de variação, igual a 1,17 %, a menor Bias de 0,0086 e maior Eficiência de 0,8976.

Na Figura 9 pode-se observar a performance desse modelo, com a dispersão dos valores residuais em unidade logarítmica da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo de diâmetro médio do povoamento. Observa-se uma boa distribuição dos resíduos das frequências de árvores por hectare pelo incremento do logaritmo do diâmetro médio do povoamento, comprovando a boa precisão estatística obtida, além da baixa tendência e elevada eficiência.



**Figura 9 – Dispersão dos resíduos do logaritmo da densidade de árvores por hectare pelo logaritmo do diâmetro obtidos no modelo proposto por Tang et al. (1994), equação 57.**

Na Figura 10 são apresentadas as frequências estimadas em relação as observadas, em unidade logarítmica. Observa-se que as frequências de árvores estimadas no eixo da ordenada encontram-se distribuídas homogeneamente sobre numa faixa diagonal, considerando a variável observada no eixo da abscissa. Isso confirma a eficiência do modelo de autodesbaste de Tang para a estimativa das densidades de árvores por classe de diâmetro médio do povoamento.



**Figura 10 – Valores estimados e observados da densidade de árvores por hectare, em unidade logarítmica, obtidas através do modelo de Tang, equação 57.**

## 5.2 Validação dos modelos de densidade de árvores

Na Tabela 3 são apresentadas às estatísticas de ajuste para validação e seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio do povoamento, testados para o caso de povoamentos de *Pinus taeda* com alta densidade e sem intervenção de desbaste.

**Tabela 3 - Estatística para validação e seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio.**

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

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

O melhor modelo para descrever a densidade de árvores por diâmetro médio em povoamentos altamente estocados e sem desbaste foi o proposto por Tang, expresso pela equação 57 da Tabela 2. Pois, no conjunto, apresentou os melhores indicadores de precisão estatística, com um valor somatório dos escores igual a 6, inferior ao obtido para os demais modelos testados.

Esse modelo apresentou estimativas com pequena Tendência (Bias) igual a 0,0086, uma alta Eficiência, igual a 0,8976, baixo Desvio Padrão Residual Relativo, igual a 4,2282 %, baixo Desvio Médio Relativo, igual a 9,3215 %, e um pequeno valor de Qui-quadrado, igual a -0,0003. Esses resultados de validação do modelo de Tang coincidem com a precisão estatística obtida, com um coeficiente de determinação igual a 0,99, erro padrão da estimativa igual a 0,0948 e coeficiente de variação igual a 1,17%.

Os resultados estatísticos de validação dos modelos indicaram que o modelo proposto por Tang, equação 57 da Tabela 2, é mais eficiente, quando comparado com os modelos de Reineke, Yoda e Zeide. Devido a isso, esse modelo é usado para estimar a densidade de árvores por hectare por diâmetro médio da população, para fins de obtenção da linha do autodesbaste e do Diagrama de Manejo da Densidade de povoamentos de *Pinus taeda*, objeto do estudo no presente trabalho.

### **5.3 Análise comparada das estimativas de densidade de árvores**

Todos os modelos de densidade e diâmetro e autodesbaste, ajustados aos dados do presente estudo, permitiram estimar os valores inteiros da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, com limites de 10 a 30 cm, que se encontram discriminados na Tabela 4. Observa-se que os modelos de densidade de árvores e diâmetro de Reineke, Yoda, Zeide e Tang, estimaram valores muito distintos de número de árvores por hectare por diâmetro médio.

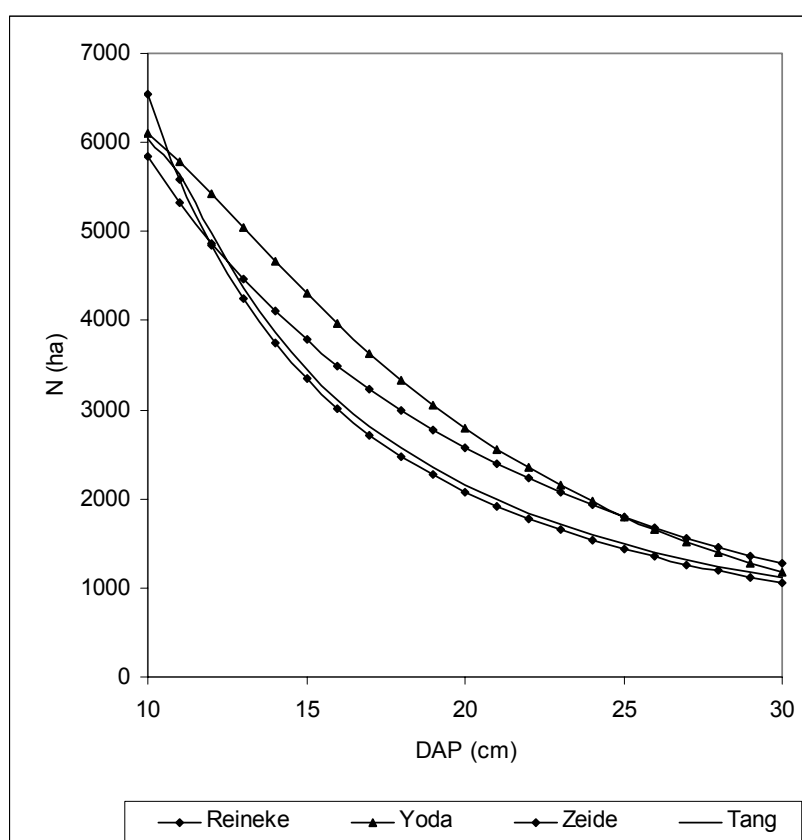
Os modelos de Yoda e Zeide foram os que apresentaram valores de densidade de árvores em hectare por diâmetro médio, extremamente superestimaram, chegando aos valores extremos de 1175 e 1273 árvores por hectare, respectivamente, para um diâmetro médio de 30 cm, quando

comparado com a equação de Tang. Também, nas classes de diâmetro intermediárias os valores de densidade estimados foram igualmente superestimados, em relação aos valores de densidade obtidos nos modelos de Reineke e Tang.

**Tabela 4 – Valores estimados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade de árvores por diâmetro médio.**

| DAP<br>(cm) | Modelos de densidade de árvores por hectare |      |       |      |
|-------------|---|------|-------|------|
|             | Reineke                                     | Yoda | Zeide | Tang |
| 10          | 6546  | 6103 | 5851  | 6042 |
| 11          | 5591  | 5779 | 5325  | 5646 |
| 12          | 4842  | 5417 | 4867  | 4978 |
| 13          | 4241  | 5042 | 4465  | 4373 |
| 14          | 3752  | 4669 | 4107  | 3873 |
| 15          | 3347  | 4307 | 3787  | 3458 |
| 16          | 3008  | 3962 | 3498  | 3110 |
| 17          | 2721  | 3638 | 3236  | 2816 |
| 18          | 2476  | 3335 | 2998  | 2563 |
| 19          | 2264  | 3056 | 2780  | 2346 |
| 20          | 2080  | 2798 | 2581  | 2156 |
| 21          | 1919  | 2561 | 2398  | 1990 |
| 22          | 1777  | 2345 | 2230  | 1844 |
| 23          | 1651  | 2147 | 2075  | 1714 |
| 24          | 1538  | 1967 | 1932  | 1598 |
| 25          | 1438  | 1802 | 1800  | 1494 |
| 26          | 1348  | 1653 | 1678  | 1401 |
| 27          | 1266  | 1516 | 1565  | 1317 |
| 28          | 1192  | 1392 | 1460  | 1241 |
| 29          | 1125  | 1279 | 1363  | 1171 |
| 30          | 1064  | 1175 | 1273  | 1108 |

Os modelos de Reineke e Tang estimaram valores mais próximos dos observados, porém o modelo de Reineke tendeu a subestimar valores nas maiores classes de diâmetro e superestimar nas menores classes de diâmetro. Essas tendências das estimativas obtidas nos modelos de densidade e diâmetro ajustadas encontram-se representadas na Figura 11, onde se percebe claramente as diferenças de densidade de árvores em hectare por diâmetro médio, obtidas entre os modelos.



**Figura 11 – Valores estimados de densidade de árvore por hectare em função do diâmetro médio, para povoamentos de *Pinus taeda*, nos modelos de densidade e diâmetro ajustados.**

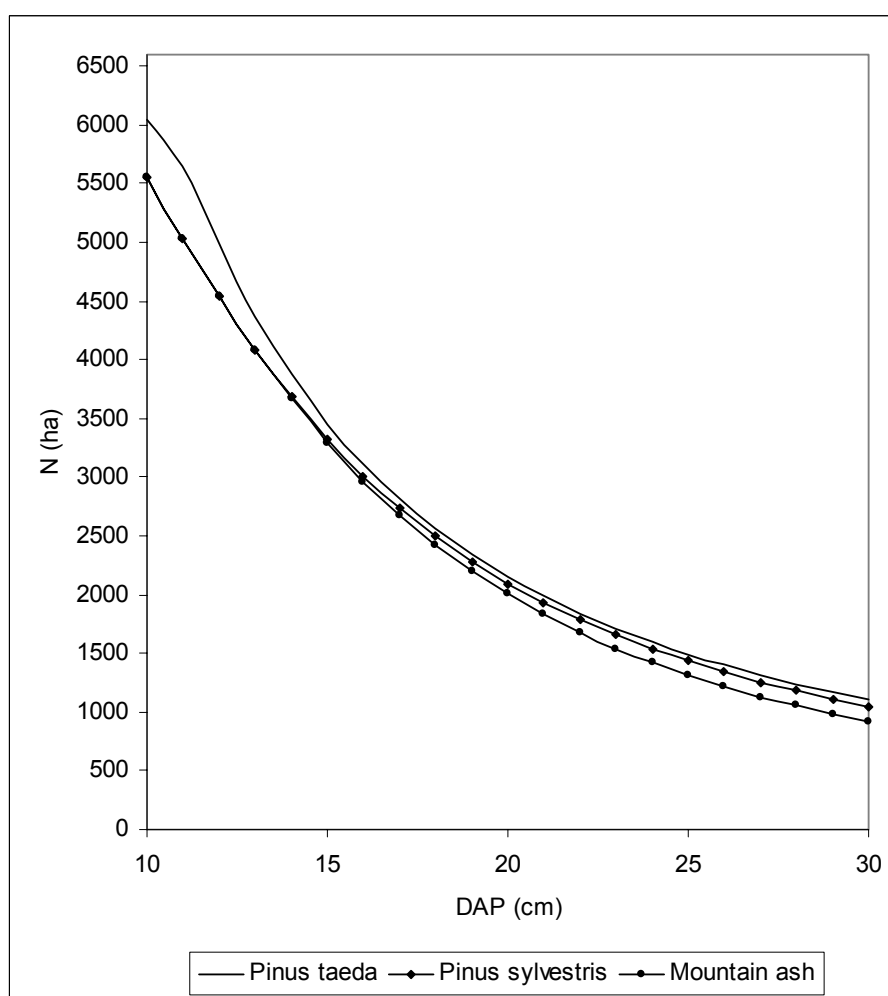
#### 5.4 Determinação do autodesbaste

Com a equação pré-selecionada de densidade de árvores pelo diâmetro de Tang et al. (1994), equação 57, foi definida a linha de autodesbaste para a espécie objeto deste estudo no presente trabalho, cujos parâmetros encontram-se dispostos no próprio modelo Tang et al. (1994), expressa por:



$$\ln N = \ln 1494,5 - \frac{1}{16,56} \ln \left[ \frac{(d/25)^{1,6523 \cdot 16,56}}{+ (1494,5 / N_1)^{16,56} - (d_1 / 25)^{1,6523 \cdot 16,56}} \right] \quad (57)$$

Para efeito de comparação, o resultado da estimativa do autodesbaste para *Pinus taeda*, através do modelo proposto por Tang et al. (1994), foi cruzada com os obtidos para *Pinus sylvestris*, na Espanha, por Del Rio et al. (2001) e *Mountain ash*, no Japão, por Tang et al. (1995), conforme pode ser observado na Figura 12.



**Figura 12 – Valores estimados de densidade de árvores por hectare função do diâmetro médio do povoamento de *Pinus taeda* (Brasil), *Pinus sylvestris* (Espanha) e *Mountain ash* (Japão), através do modelo de autodesbaste proposto por Tang et al. (1994).**

Observa-se que as tendências dos valores estimados de densidade de árvores por hectare em relação ao diâmetro médio da população são diferentes, com intercruzamento de valores de densidade de árvores a partir de determinados diâmetros. No caso do *Pinus taeda*, a curva tem uma forma hiperbólica perfeita, com decréscimo geométrico da densidade de árvores por hectare com o incremento da variável diâmetro médio. Através dessa comparação das curvas dessas espécies pode-se perceber claramente que o comportamento do autodesbaste é peculiar a cada espécie, por isso, sempre deve ser determinado independentemente.

Com o modelo de Tang et al. (1994) definido previamente, foram gerados os dados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio do povoamento. Essa equação permitiu obter a curva decrescente da máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, que representa a máxima capacidade de tolerância fisiológica das árvores para se manter sobreviventes na população, nas condições do seu habitat. Nesta condição, passa a ocorrer o autodesbaste de árvores da população, porque, a partir desse ponto, as árvores passam a não suportar mais a concorrência entre os próprios indivíduos por água, luz, nutriente e espaço vital, ocorrendo, então, a mortalidade, normalmente incidindo sobre as árvores mais dominadas da população.

Assim, partindo da densidade de árvores máximas por hectare da implantação, definida pelo espaçamento utilizado no momento do plantio de: 1,5x1,0 m (1,5 m<sup>2</sup>), 2,5x1,0 m (2,5 m<sup>2</sup>), 1,5x2,0 m (3 m<sup>2</sup>), 2,0x2,0 m (4 m<sup>2</sup>), 1,5x3,0 m (4,5 m<sup>2</sup>), 2,5x2,0 m (5 m<sup>2</sup>), 2,0x3,0 m (6 m<sup>2</sup>), 2,5x3,0 m (7,5 m<sup>2</sup>), foram gerado os parâmetros estatísticos do modelo de autodesbaste de Tang, que se encontram na Tabela 5.

Observa-se nesta Tabela 5 que para todos os espaçamentos iniciais de implantação do povoamento o modelo proposto por Tang apresentou um excelente ajuste e baixo erro padrão da estimativa, tendência muito pequena com valor de Bias inferior a 0,009 e alta eficiência com valor superior a 0,999, em todos os espaçamentos.

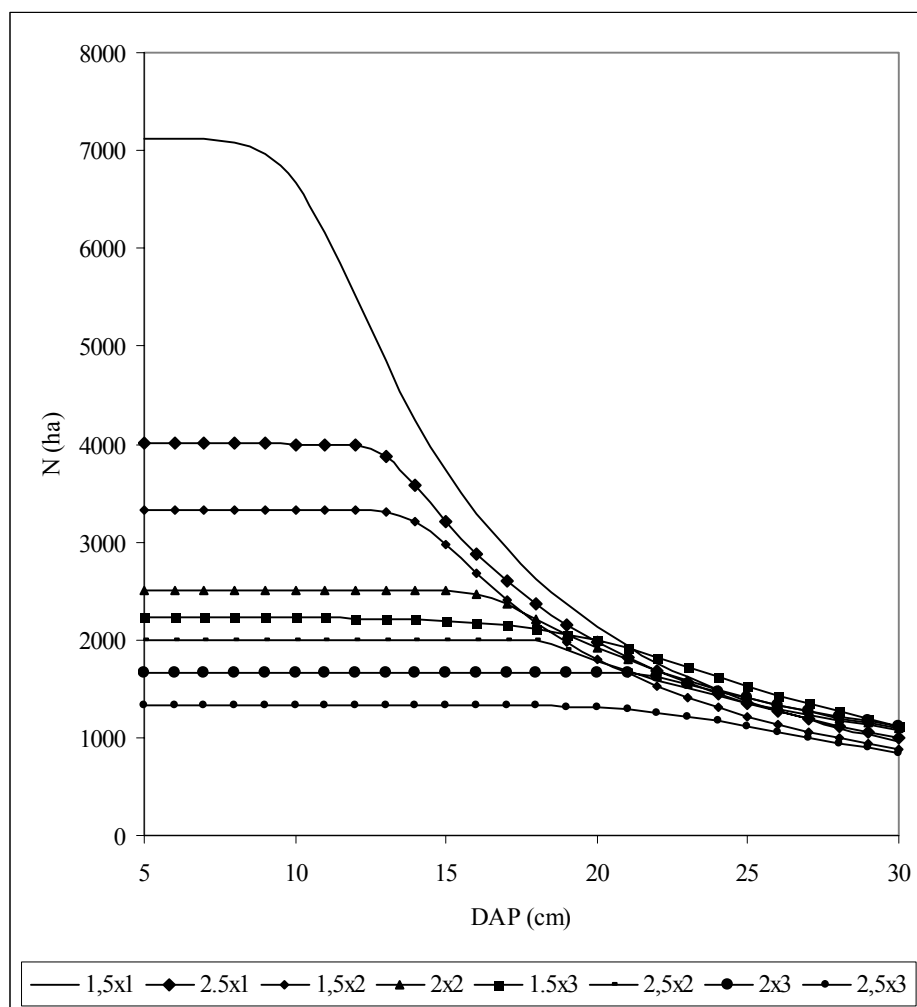
Com os parâmetros gerados para o modelo de Tang foi possível plotar as tendências das densidades de árvores por hectare pelo diâmetro médio do povoamento, como é demonstrado na Figura 13. Observa-se que para todos os

espaçamentos iniciais houve uma tendência a supressão de árvores próximo ao ponto de intersecção com a curva de máxima densidade de árvores por hectare, obtido no espaçamento de 1,5x1,0 m. No ponto de declínio repentino da densidade de árvores por hectare, em todos os espaçamentos, ocorre o processo de autodesbaste na população. Então, o momento da ocorrência do autodesbaste é representado pela dimensão do diâmetro médio da população, que é dependente do espaçamento inicial, utilizado na implantação do povoamento.

**Tabela 5 - Resultados estatísticos do modelo de densidade e diâmetro de Tang, ajustado por espaçamento.**

| Espaçamento<br>(m) | Parâmetros     |         |          | R <sup>2</sup> | S <sub>yx</sub> | Bias   | E      |
|--------------------|----------------|---------|----------|----------------|-----------------|--------|--------|
|                    | S <sub>f</sub> | $\beta$ | $\gamma$ |                |                 |        |        |
| 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         | 1,200   | 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 |

Analisando-se os valores do parâmetro  $\beta$ , da Tabela 5, que reflete para a interpretação de comprovação da lei do autodesbaste, verifica-se que houve uma grande variação com o espaçamento de plantio, sem ter mantido uma tendência lógica de valores. Por isso, não se pode afirmar sobre a universalidade da aplicação do coeficiente angular de -3/2 para todas as situações de manejo e tratamento silvicultural como foi teoricamente preconizado inicialmente, o que se encontra fartamente citado na bibliografia como de uso corrente.



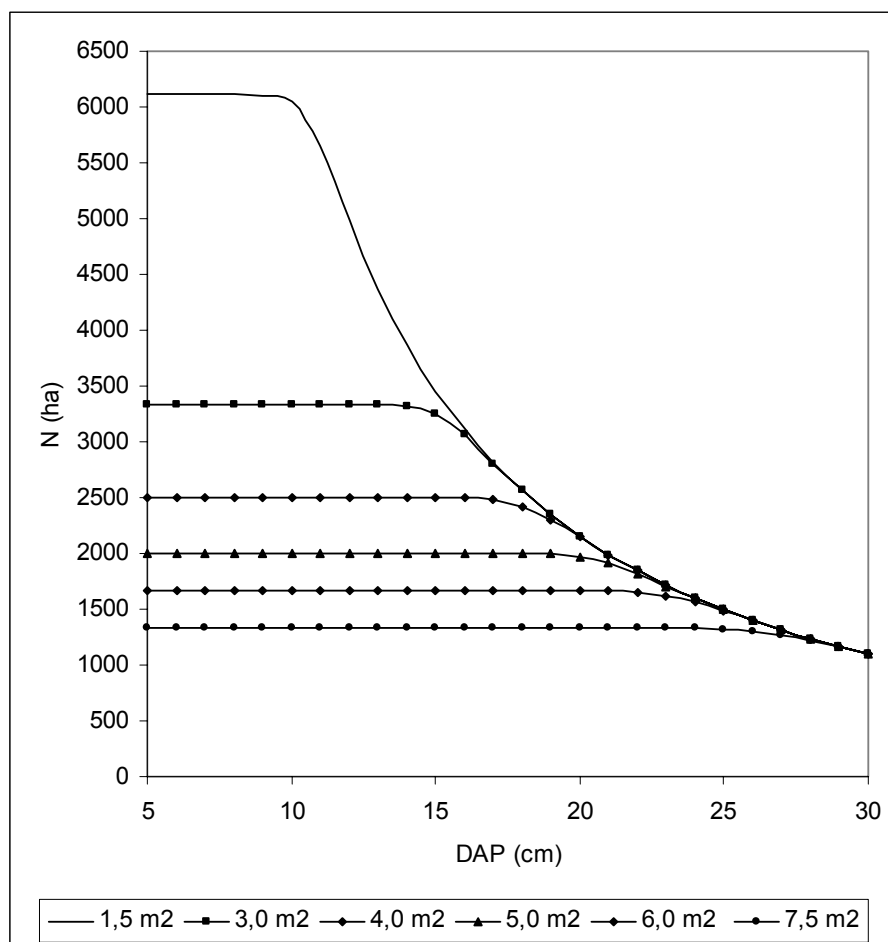
**Figura 13 – Tendência da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em diferentes espaçamentos de implantação do povoamento.**

Como as tendências das densidades de árvores por hectare pelo diâmetro médio apresentaram o mesmo padrão para todos os espaçamentos, foram geradas as densidades de árvores por hectare a partir do modelo de Tang (equação 57 da Tabela 2), cujos parâmetros foram obtidos através dos dados de espaçamentos mais reduzidos, portanto com maior densidade, 1,5x1,0 m e 2,5x1,0 m. Esses valores estão relacionado na Tabela 6 e representados na Figura 14. As curvas de densidade de árvores por hectare para os diâmetros médios foram obtidas substituindo-se na equação o número de árvores iniciais por hectare correspondente ao espaçamento inicial e os demais parâmetros previamente determinados para as densidades máximas.

**Tabela 6 – Densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade e diâmetro de Tang, com variação do espaçamento.**

| DAP<br>(cm) | Espaço vital inicial (m <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
|-------------|--|------|------|------|------|------|
|             | 1,5                                    | 3,0  | 4,0  | 5,0  | 6,0  | 7,5  |
| 5           | 6109                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 6           | 6109                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 7           | 6109                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 8           | 6109                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 9           | 6105                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 10          | 6042                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 11          | 5646                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 12          | 4978                                   | 3333 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 13          | 4373                                   | 3331 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 14          | 3873                                   | 3317 | 2500 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 15          | 3458                                   | 3247 | 2499 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 16          | 3110                                   | 3059 | 2496 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 17          | 2816                                   | 2805 | 2480 | 2000 | 1666 | 1333 |
| 18          | 2563                                   | 2561 | 2425 | 1998 | 1666 | 1333 |
| 19          | 2346                                   | 2345 | 2304 | 1992 | 1666 | 1333 |
| 20          | 2156                                   | 2156 | 2145 | 1970 | 1665 | 1333 |
| 21          | 1990                                   | 1990 | 1987 | 1913 | 1661 | 1333 |
| 22          | 1844                                   | 1844 | 1843 | 1818 | 1649 | 1333 |
| 23          | 1714                                   | 1714 | 1714 | 1706 | 1618 | 1332 |
| 24          | 1598                                   | 1598 | 1598 | 1596 | 1559 | 1329 |
| 25          | 1494                                   | 1494 | 1494 | 1494 | 1481 | 1322 |
| 26          | 1401                                   | 1401 | 1401 | 1401 | 1397 | 1304 |
| 27          | 1317                                   | 1317 | 1317 | 1317 | 1315 | 1270 |
| 28          | 1241                                   | 1241 | 1241 | 1241 | 1240 | 1221 |
| 29          | 1171                                   | 1171 | 1171 | 1171 | 1171 | 1163 |
| 30          | 1108                                   | 1108 | 1108 | 1108 | 1108 | 1105 |

Na Figura 14, pode-se observar a dimensão de diâmetro médio que ocorre o início do autodesbaste, com a supressão de indivíduos da população, que varia, consideravelmente, com a densidade de árvores de plantio. O autodesbaste de populações menos densas ocorre com um diâmetro médio um pouco inferior ao de máxima densidade, que pode ser percebida no ponto de inflexão da curva ou no encontro das curvas. Portanto, o autodesbaste ocorre numa dimensão de diâmetro médio diretamente proporcional à densidade de árvores de plantio, indicando que, quanto maior o espaçamento inicial maior será o diâmetro médio, portanto, mais tarde ocorrerá o momento do início do autodesbaste na população.

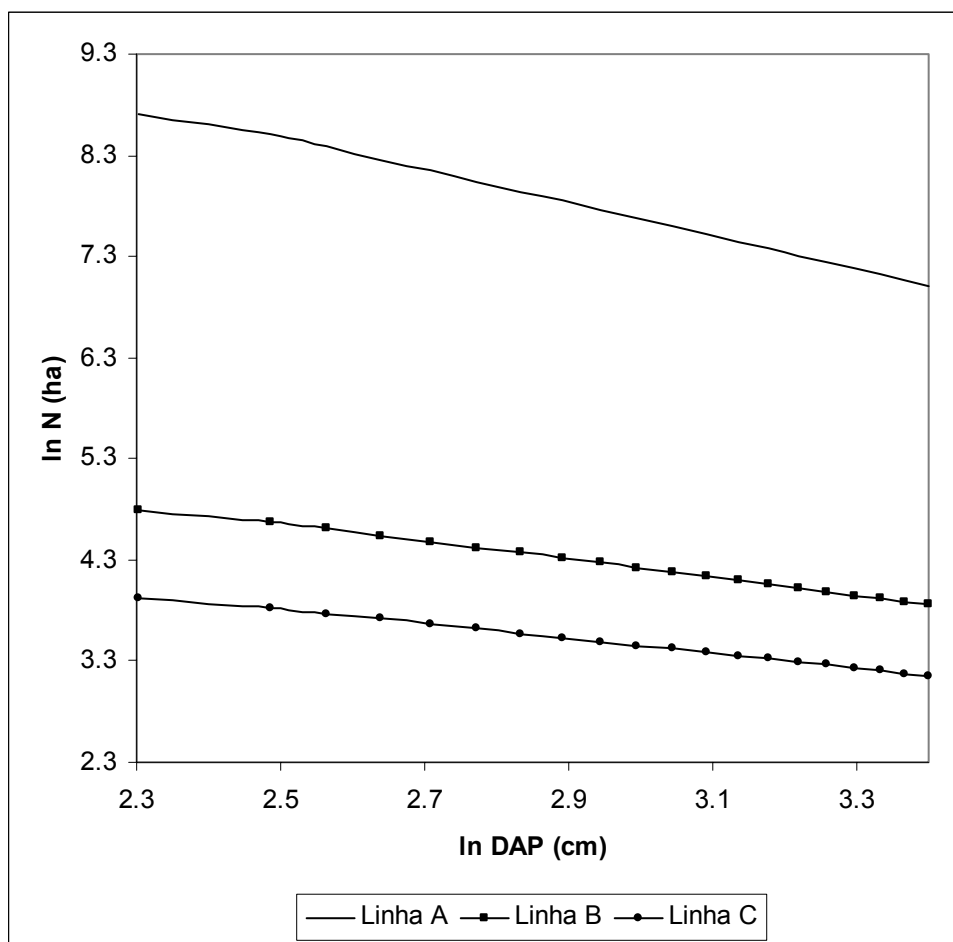


**Figura 14 – Tendências médias do autodesbaste, definido pela densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, obtidas através do modelo proposto por Tang et al. (1994).**

Com o Modelo de Tang et al. (1994), ajustado previamente, foi determinada a linha de máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio e as linhas que limitam as zonas das diferentes fases da concorrência durante o desenvolvimento da população.

Essas linhas limites foram determinadas algebricamente, seguindo a orientação de Saunders e Puettmann (2000) e Harrington (1977), que recomenda para *Pinus taeda* as densidades teóricas, em relação a densidade máxima, de 0,55 e 0,45, para o início da mortalidade (linha B) e máxima produção do povoamento (linha C), respectivamente. A linha A correspondente a máxima densidade de árvores, de ocorrência de autodesbaste, que foi obtida através do modelo de Tang et al. (1994), previamente definido. As fases de concorrência, onde na abscissa encontra-se o logaritmo dos diâmetros e na

ordenada o logarítmo das densidades de árvores por hectare, e apresentada na Figura 15.



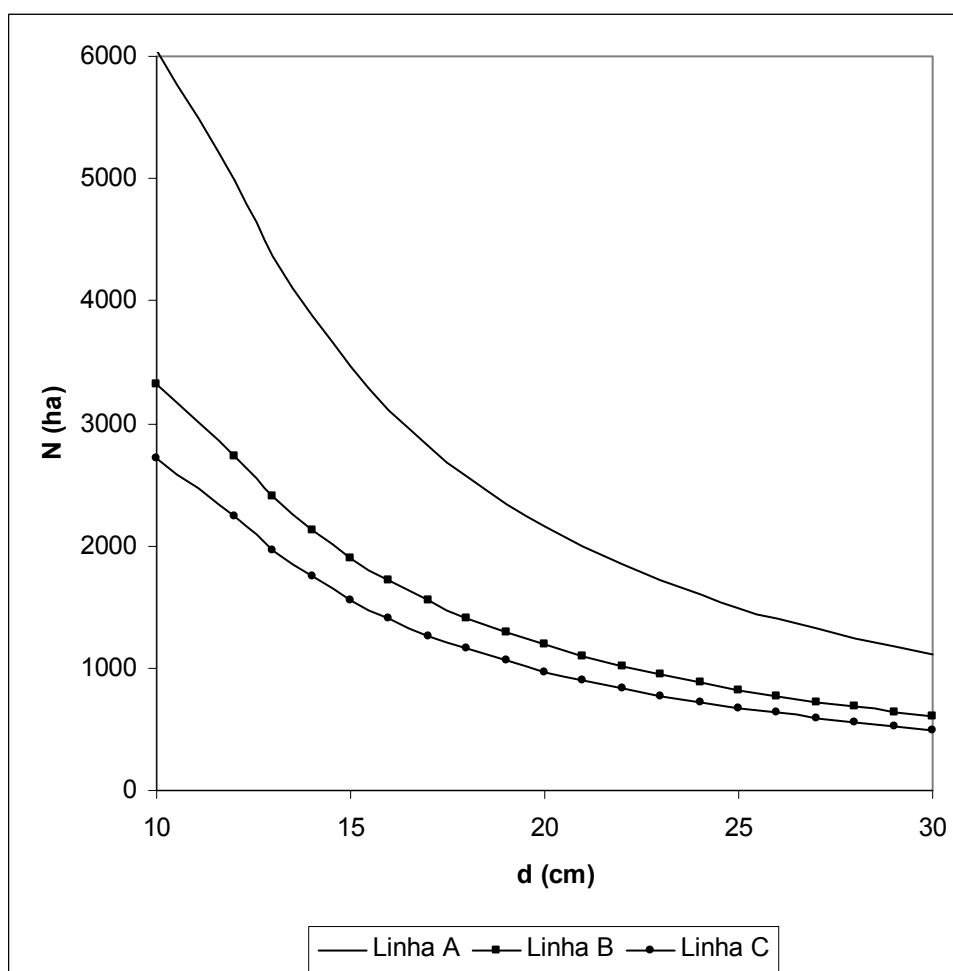
**Figura 15 – Limites das fases de concorrência entre indivíduos, em densidade de árvores pelo diâmetro médio, em unidade logarítmica: Linha A – máxima densidade por diâmetro, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B - manejo com estoque completo.**

Neste Diagrama de Manejo da Densidade, representado na Figura 15, a linha A representa a máxima densidade por diâmetro que é suportada pela população. A linha B indica o início da mortalidade, ocasionada pela concorrência por: água, luz, nutriente e espaço vital entre os indivíduos da população. A linha C indica o início da máxima produção de madeira do povoamento.

Por outro lado, entre as linhas B-A tem-se uma condição de povoamento superestocado, indicando uma situação de manejo indesejada pela perda de

indivíduos pela mortalidade. Entre as linhas C-B acontece uma situação de manejo da densidade de árvores que permite um estoque completo do povoamento, portanto é uma situação ótima e almejada no manejo. Abaixo da linha C tem-se uma condição de povoamento subestocado, onde não se consegue o máximo aproveitamento do solo.

Na Figura 16 encontram-se as mesmas linhas limitantes de concorrência interpretados da Figura 15, porém, aqui expressos em unidade aritmética.



**Figura 16 – 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.**



## 5.5 Índices de Densidade do Povoamento

O estudo dos Índices de Densidade do Povoamento - IDP foi realizado através do modelo de densidade, diâmetro e autodesbaste proposto por Tang et al. (1994), equação 57 da Tabela 2, cujos parâmetros foram apresentados anteriormente. Esse modelo permitiu gerar as densidades máximas de árvores por hectare pelo diâmetro médio do povoamento, cujos valores encontram-se discriminados na Tabela 7, em unidade logarítmica.

**Tabela 7 – Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio, em unidade logarítmica, e por Índices de Densidade do Povoamento.**

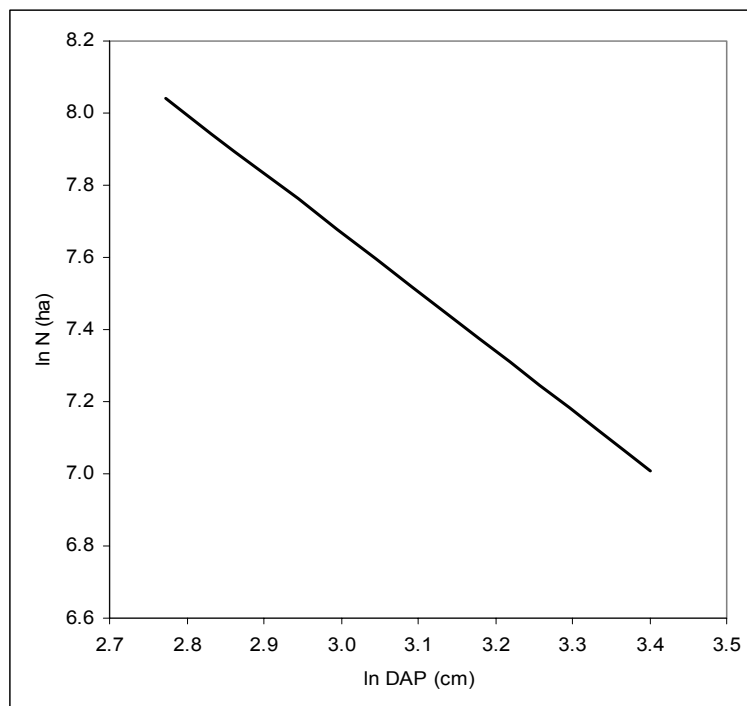
| DAP<br>(cm) | Densidade<br>Máxima | Índices de Densidade do Povoamento |        |        |        |        |
|-------------|---------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|             |                     | 1400                               | 1200   | 1000   | 800    | 600    |
| 2,3026      | 8,7065              | 8,6287                             | 8,4451 | 8,2279 | 7,9621 | 7,6195 |
| 2,3979      | 8,6387              | 8,5615                             | 8,3794 | 8,1639 | 7,9002 | 7,5602 |
| 2,4849      | 8,5129              | 8,4368                             | 8,2573 | 8,0449 | 7,7851 | 7,4500 |
| 2,5649      | 8,3833              | 8,3083                             | 8,1315 | 7,9224 | 7,6665 | 7,3366 |
| 2,6391      | 8,2618              | 8,1879                             | 8,0137 | 7,8076 | 7,5554 | 7,2302 |
| 2,7081      | 8,1485              | 8,0757                             | 7,9038 | 7,7006 | 7,4518 | 7,1311 |
| 2,7726      | 8,0425              | 7,9706                             | 7,8010 | 7,6004 | 7,3549 | 7,0384 |
| 2,8332      | 7,9429              | 7,8719                             | 7,7044 | 7,5063 | 7,2638 | 6,9512 |
| 2,8904      | 7,8490              | 7,7789                             | 7,6134 | 7,4176 | 7,1780 | 6,8691 |
| 2,9444      | 7,7603              | 7,6909                             | 7,5273 | 7,3337 | 7,0968 | 6,7914 |
| 2,9957      | 7,6760              | 7,6074                             | 7,4455 | 7,2541 | 7,0197 | 6,7176 |
| 3,0445      | 7,5959              | 7,5280                             | 7,3678 | 7,1784 | 6,9465 | 6,6475 |
| 3,0910      | 7,5195              | 7,4523                             | 7,2937 | 7,1062 | 6,8766 | 6,5807 |
| 3,1355      | 7,4465              | 7,3799                             | 7,2229 | 7,0372 | 6,8098 | 6,5168 |
| 3,1781      | 7,3766              | 7,3107                             | 7,1551 | 6,9711 | 6,7459 | 6,4556 |
| 3,2189      | 7,3095              | 7,2442                             | 7,0901 | 6,9078 | 6,6846 | 6,3969 |
| 3,2581      | 7,2451              | 7,1804                             | 7,0276 | 6,8469 | 6,6257 | 6,3406 |
| 3,2958      | 7,1832              | 7,1190                             | 6,9675 | 6,7883 | 6,5690 | 6,2863 |
| 3,3322      | 7,1234              | 7,0598                             | 6,9095 | 6,7319 | 6,5144 | 6,2340 |
| 3,3673      | 7,0658              | 7,0027                             | 6,8536 | 6,6774 | 6,4617 | 6,1836 |
| 3,4012      | 7,0101              | 6,9475                             | 6,7996 | 6,6248 | 6,4108 | 6,1349 |

Para a determinação dos Índices de Densidade do Povoamento - IDP foi fixado o diâmetro médio padrão de 25 cm, em que para os dados amostrados corresponde a idade de 15 anos. Assim, foram gerados os Índices de Densidade do Povoamento, a partir do valor máximo de 1400 até o mínimo de 600, com intervalo de classe de índice de 200. Os resultados do número de árvores por hectare por diâmetro médio, para os estes IDPs encontram-se relacionados na Tabela 7.

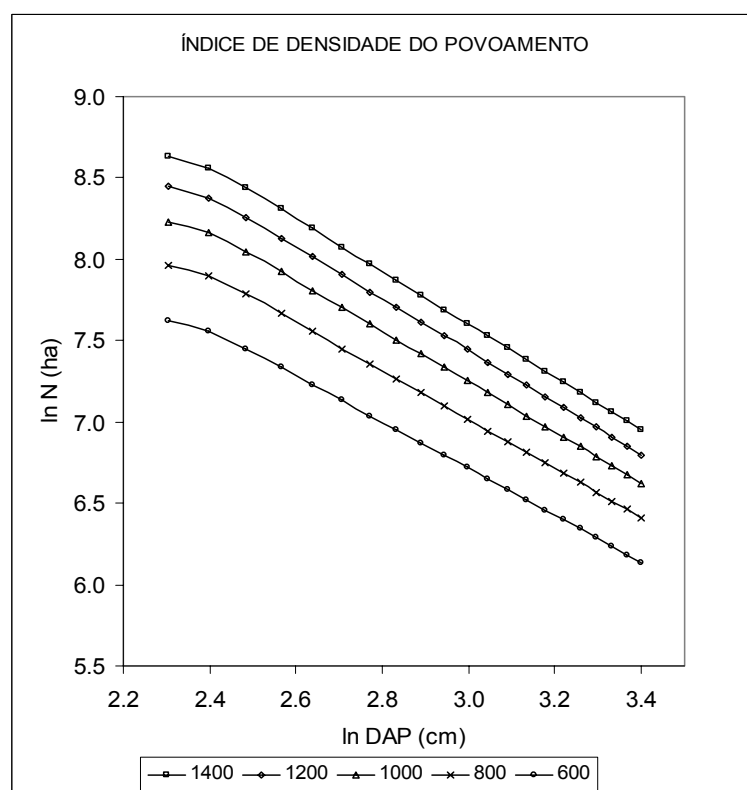
O máximo número de árvores por hectare por diâmetro médio, em unidade logarítmica, gerados no modelo de Tang, permitiu gerar a linha do índice de máxima densidade populacional. A partir dessa linha começa a ocorrer uma supressão de indivíduos pela mortalidade com o incremento diamétrico, cujos valores encontram-se representados na Figura 17. Essa linha de densidade máxima de árvores foi concebida a partir de um diâmetro padrão fixado em 25 cm, ou seja, em unidade logarítmica igual a 3,2189, que corresponde a uma densidade de árvores por hectare de 1494, ou seja, em unidade logarítmica igual a 7,3095.

As densidades de árvores por hectare por diâmetro médio, expressos em unidade logarítmica, que se encontram na Tabela 7, foram geradas por proporção, tendo como referência a densidade de árvores por hectare obtida no diâmetro padrão de 25 cm, para um intervalo de 200 árvores por hectare, o que resultou em 5 curvas de Índices de Densidade do Povoamento – IDPs, demonstradas nas curvas de número 1400, 1200, 1000, 800 e 600.

As densidades de árvores por hectare por diâmetro médio, geradas para cada IDP, em unidade logarítmica, encontram-se disponibilizada na Tabela 7, e representada na Figura 18. Observa-se que as curvas dos IDPs apresentam uma tendência paralela entre si, distanciando-se à medida que diminui o Índice de Densidade do Povoamento, o que evidencia uma situação de população menos estocada.



**Figura 17 – Linha de máxima densidade de árvores por hectare por diâmetro médio, expressa em unidade logarítmica.**

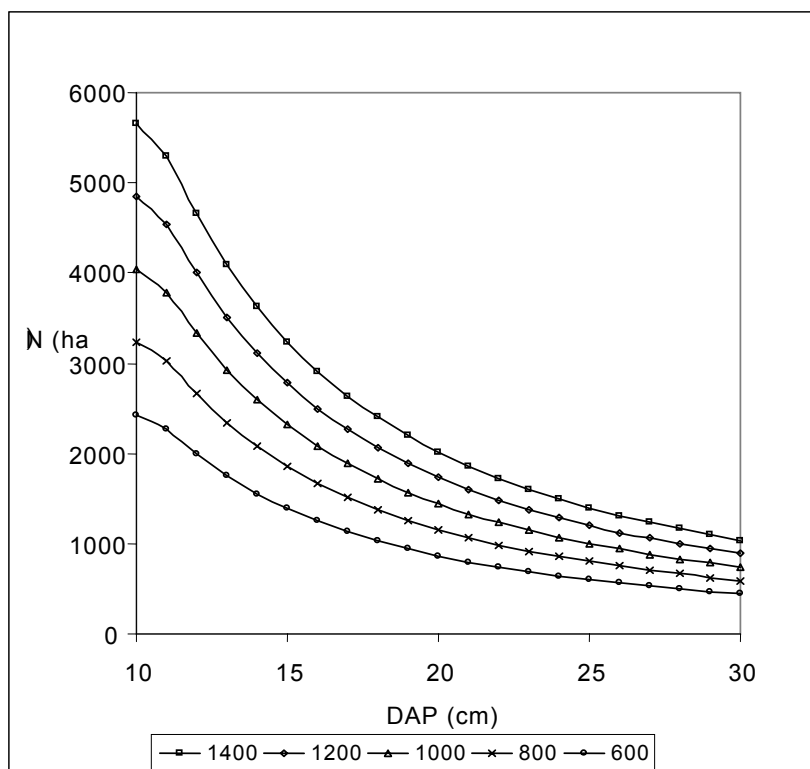


**Figura 18 – Índice de Densidade do Povoamento, com representação da densidade de árvores por hectare por diâmetro médio, em unidade logarítmica.**

Essas mesmas densidades de árvores por hectare por diâmetro médio da Tabela 7 foram transformadas, agora para unidade aritmética, o que permitiu gerar a Tabela 8 e a Figura 19, que representadas as tendências do número de árvores por hectare por diâmetro médio, em todos os IDPs. Percebe-se que, em unidade aritmética, as tendências das frequências de indivíduos por hectare decrescem exponencialmente com o incremento diamétrico.

**Tabela 8 – Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio, por Índice de Densidade do Povoamento.**

| DAP<br>(cm) | Densidade<br>Máxima | Índices de Densidade do Povoamento |      |      |      |      |
|-------------|---------------------|------------------------------------|------|------|------|------|
|             |                     | 1400                               | 1200 | 1000 | 800  | 600  |
| 10          | 6042                | 5660                               | 4851 | 4043 | 3234 | 2426 |
| 11          | 5646                | 5289                               | 4534 | 3778 | 3022 | 2267 |
| 12          | 4978                | 4664                               | 3997 | 3331 | 2665 | 1999 |
| 13          | 4373                | 4097                               | 3511 | 2926 | 2341 | 1756 |
| 14          | 3873                | 3628                               | 3110 | 2591 | 2073 | 1555 |
| 15          | 3458                | 3239                               | 2777 | 2314 | 1851 | 1388 |
| 16          | 3110                | 2914                               | 2497 | 2081 | 1665 | 1249 |
| 17          | 2816                | 2638                               | 2261 | 1884 | 1507 | 1130 |
| 18          | 2563                | 2401                               | 2058 | 1715 | 1372 | 1029 |
| 19          | 2346                | 2197                               | 1883 | 1569 | 1256 | 942  |
| 20          | 2156                | 2020                               | 1731 | 1443 | 1154 | 866  |
| 21          | 1990                | 1864                               | 1598 | 1332 | 1065 | 799  |
| 22          | 1844                | 1727                               | 1480 | 1234 | 987  | 740  |
| 23          | 1714                | 1605                               | 1376 | 1147 | 917  | 688  |
| 24          | 1598                | 1497                               | 1283 | 1069 | 855  | 642  |
| 25          | 1494                | 1400                               | 1200 | 1000 | 800  | 600  |
| 26          | 1401                | 1313                               | 1125 | 938  | 750  | 563  |
| 27          | 1317                | 1234                               | 1058 | 881  | 705  | 529  |
| 28          | 1241                | 1162                               | 996  | 830  | 664  | 498  |
| 29          | 1171                | 1097                               | 940  | 784  | 627  | 470  |
| 30          | 1108                | 1038                               | 889  | 741  | 593  | 445  |



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

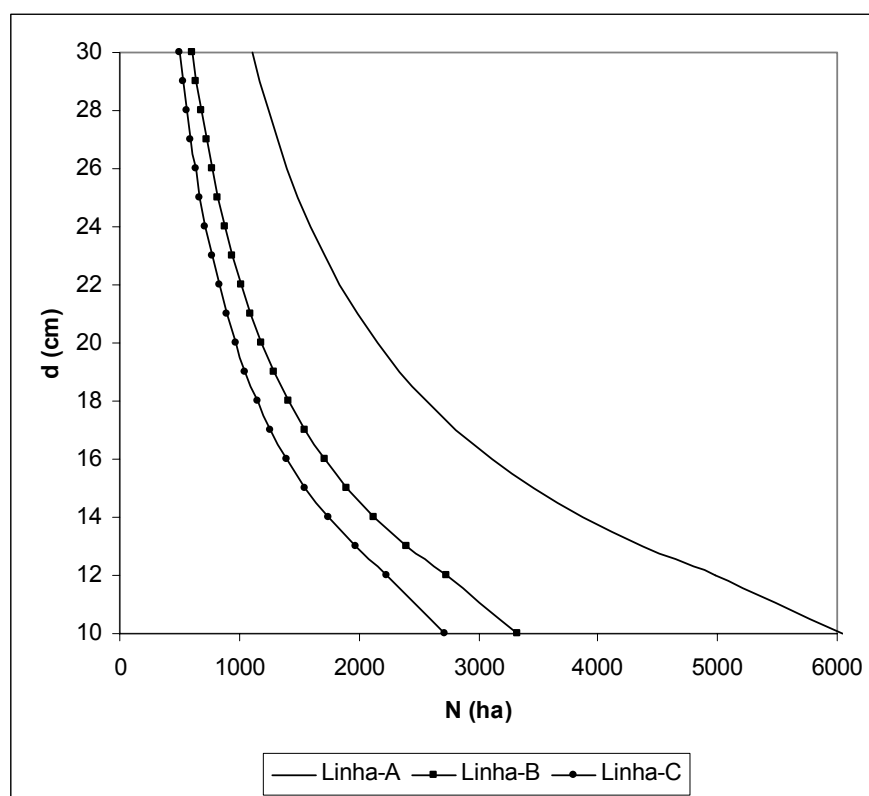
Por outro lado, observa-se, também, que a densidade de árvores por hectare diminui numa relação inversamente proporcional ao IDP. E que, o afastamento entre as curvas dos IDPs é maior nos de menores do que nos de maiores densidades. Isso se reflete ao momento de ocorrência do autodesbaste no povoamento, a partir de uma densidade de árvores por unidade de área em relação ao diâmetro médio, o que em IDP de menor densidade de árvores irá ocorrer mais tarde do que nos mais densos.

## 5.6 Diagrama de Manejo da Densidade

### 5.6.1 Relações de variáveis dendrométricas com a densidade

Antes da elaboração dos Diagramas de Manejo da Densidade - DMD foram determinada as isolinhas que delimitam as zonas das diferentes fases de concorrência entre os indivíduos da população.

Essas linhas limites de densidade de árvores pelo diâmetro foram determinadas algebricamente, segundo a recomendação de Saunders e Puettmann (2000) e Harrington (1997) para *Pinus taeda*, com as densidades teóricas em relação à máxima densidade (Tabela 7) de 0,55 e 0,45, para o início da mortalidade (linha B) e máxima produção do povoamento (linha C), respectivamente, que se encontram representados na Figura 20.



**Figura 20 – Diâmetro médio por densidade de árvores, em unidade aritmética: Linha A – diâmetro máximo por densidade, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B - manejo com estoque completo.**

Da mesma forma, na Figura 20 é apresentado o Diagrama de Manejo da Densidade – DMD, onde na ordenada encontra-se o diâmetro médio e na abscissa a densidade de árvores por hectare, ambas em escala logarítmica. A linha A representa a máxima densidade de árvores e ocorrência de autodesbaste, que foi obtida por estimativa através do modelo de Tang et al. (1994), previamente definido.

Como anteriormente demonstrado, neste Diagrama de Manejo da Densidade, a linha A representa o máximo diâmetro por densidade de árvores por hectare que é suportada pela população. A linha B indica o início da mortalidade, ocasionada pela concorrência por água, luz, nutrientes e espaço vital entre os indivíduos da população. A linha C indica o início da máxima produção de madeira do povoamento. A zona entre as linhas C-B, representa uma condição ótima de manejo em que se consegue o estoque completo de aproveitamento do povoamento.

Por outro lado, entre as linhas B-A tem-se uma condição de povoamento superestocado, indicando uma situação de manejo indesejada pela perda de indivíduos pela mortalidade. Entre as linhas C-B acontece uma situação de manejo da densidade de árvores que permite um estoque completo do povoamento, portanto é uma situação ótima e almejada no manejo. E, abaixo da linha C tem-se uma condição de povoamento subestocado, onde não se consegue o máximo aproveitamento do solo.

Na representação do Diagrama de Manejo da Densidade pelo volume, foi estudada uma equação para estimar esta variável para a árvore média do povoamento, em função de variáveis que expressam densidade da população e crescimento. Para isso, foram testados 5 modelos volumétricos que se encontram relacionados na Tabela 9.

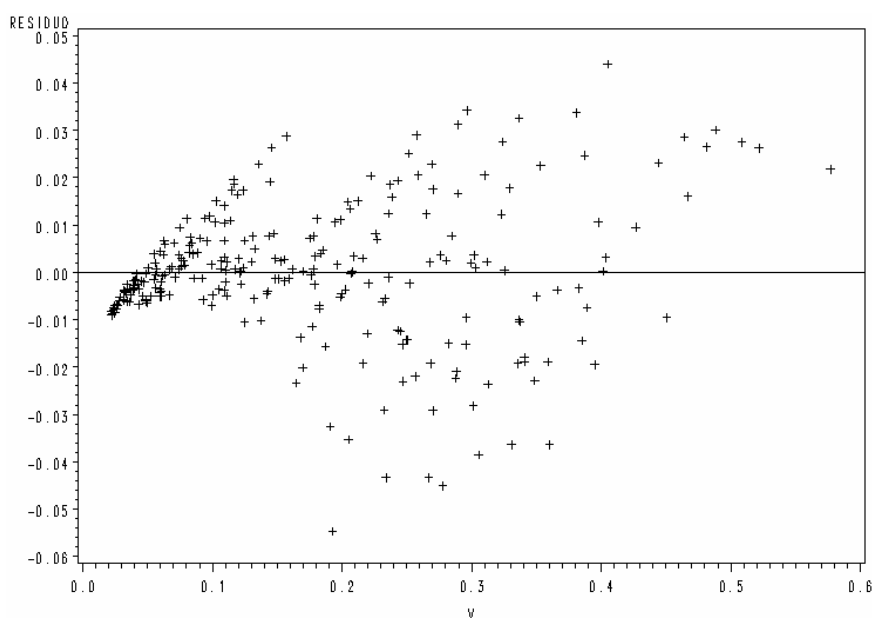
**Tabela 9 – Parâmetros estatísticos das equações de volume testadas.**

| Equação | Modelo                                      | Parâmetros |          |        | $R^2_{aj}$ | $S_{xy}$ | CV%   |
|---------|---|------------|----------|--------|------------|----------|-------|
|         |   | $b_0$      | $b_1$    | $b_2$  |            |          |       |
| 65      | $\ln \bar{v} = b_0 + b_1.N$                 | 13,941     | -1,9546  |        | 0,8266     | 0,2624   | -12,1 |
| 66      | $\ln \bar{v} = b_0 + b_1.\ln N + b_2.\ln d$ | -17,141    | 0,6091   | 3,7623 | 0,9845     | 0,1914   | -5,01 |
| 67      | $\ln \bar{v} = b_0 + b_1.\ln N + b_2.\ln G$ | 5,5041     | -1,264   | 0,0443 | 0,9784     | 0,1695   | -5,89 |
| 68      | $\bar{v} = b_0 + b_1.(d.h)^{b_2}$           | 0,0010     | 0,000009 | 1,7253 | 0,9883     | 0,1467   | 4,87  |
| 69      | $\ln \bar{v} = b_0 + b_1.\ln d + b_2.\ln h$ | -10,236    | 1,8702   | 1,1400 | 0,9833     | 0,1904   | 8,87  |

Sendo que,  $\bar{v}$  é o volume médio ( $m^3$ );  $d$  o diâmetro médio,  $N$  o número de árvores ( $ha^{-1}$ );  $G$  a área basal ( $m^2 ha^{-1}$ ).

Os resultados estatísticos das equações testadas, relacionados na Tabela 9, indicam que a equação 68 foi a que apresentou maior coeficiente de determinação, igual a 0,9883, menor erro padrão da estimativa, igual a 0,1467, e menor coeficiente de variação, igual a 4,87 %, indicando uma excelente precisão estatística.

Esse modelo, também, apresentou uma melhor distribuição dos valores residuais do que a obtida nas demais equações testadas. A distribuição dos valores residuais, desta equação de volume, pode ser visualizada na Figura 21. Assim, o volume médio das árvores passou a ser estimado como uma função do número de árvores por hectare e do diâmetro médio do povoamento.



**Figura 21 – Distribuição dos valores residuais pelo volume observado.**

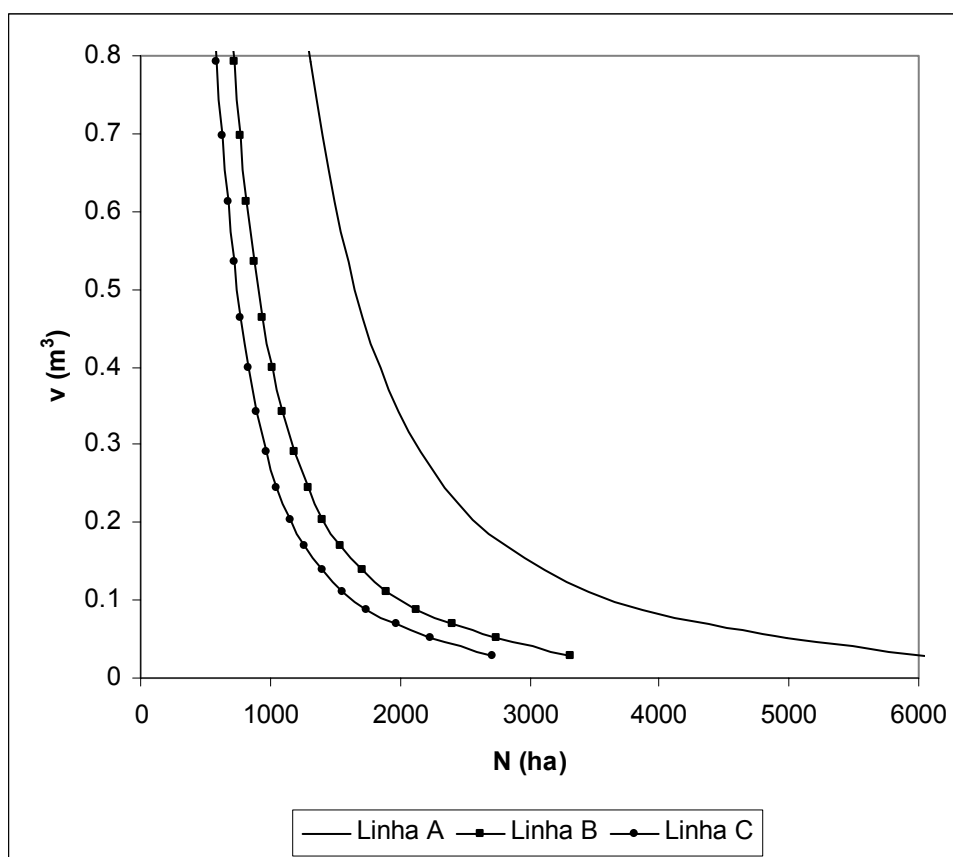
Para obter a estimativa do volume na equação de volume selecionada foi ajustada uma relação hipsométrica, que apresentou um coeficiente de determinação de 0,89, erro padrão da estimativa de 0,0509 e coeficiente de variação igual a 2,05 %, indicando um bom ajuste. Essa equação corresponde ao modelo reduzido de Backman, sendo expressa por:

$$\ln h = 1,0657 \cdot \ln d - 0,0200 \cdot \ln^2 d$$

Sendo que, “h” é a altura (m) e “d” o diâmetro à altura do peito (cm).



Os volumes médios em relação à densidade de árvores por hectare e diâmetro médio do povoamento, encontram-se representados na Figura 22. A tendência dos volumes médios segue uma forma hiperbólica, indicando que essa variável tende a diminuir com o aumento da densidade populacional, confirmando a mesma relação obtida para o diâmetro. As interpretações das linhas e zonas coincidem ao caso anteriormente analisado para a relação diâmetro e densidade árvores por hectare.



**Figura 22 – Volume médio em relação a densidade de árvores por hectare: Linha A – diâmetro máximo por densidade, Linha B – início da mortalidade, Linha C – máxima produtividade do povoamento, Zona entre as linhas C-B - manejo com estoque completo.**

#### 5.6.2 Relação da produção com o Índice de Densidade do Povoamento

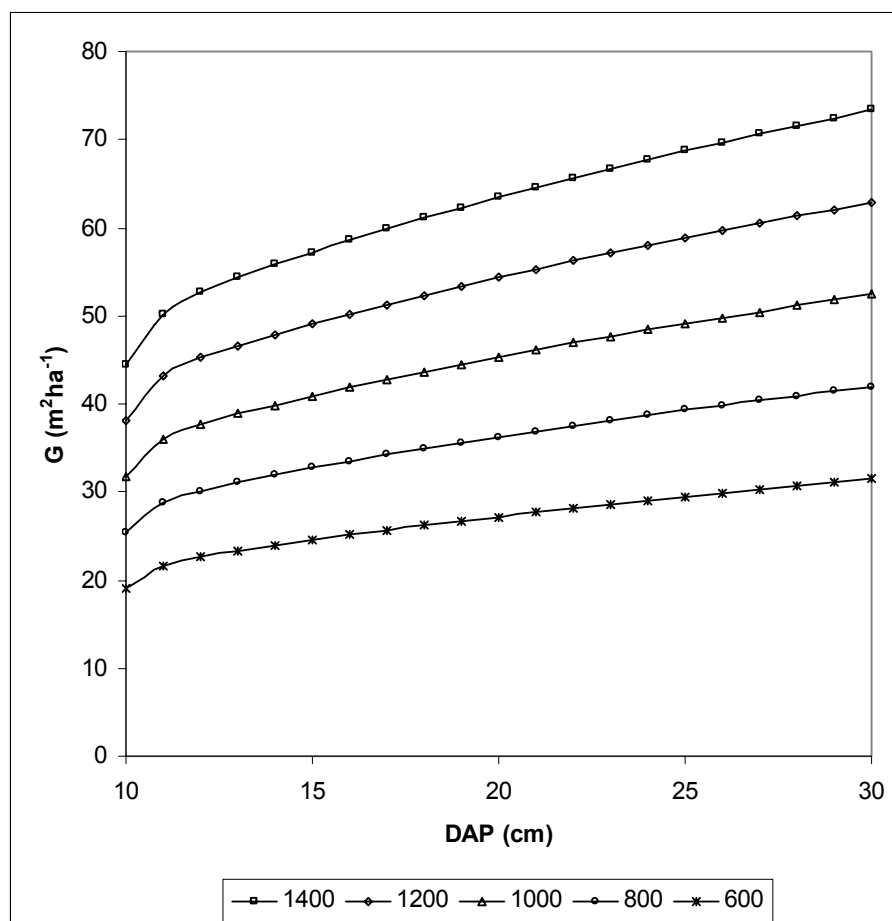
Com as densidades de árvores por hectare por Índice de Densidade do Povoamento previamente determinadas, foram geradas as áreas basais e volumes por hectare, conforme Tabelas 10 e 11, demonstrado a seguir.

**Tabela 10 – Área basal ( $m^2ha^{-1}$ ) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento**

| DAP<br>(cm) | Índice de Densidade do Povoamento |       |       |       |       |
|-------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1400                              | 1200  | 1000  | 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 |

Nesta Tabela 10 encontram-se os valores de área basal por hectare por diâmetro médio, discriminados por Índice de Densidade do Povoamento, e representadas na Figura 23. Observa-se que as áreas basais apresentam uma

tendência paralela entre si, com aumento numa relação direta ao incremento diamétrico e valor do Índice de Densidade do Povoamento.



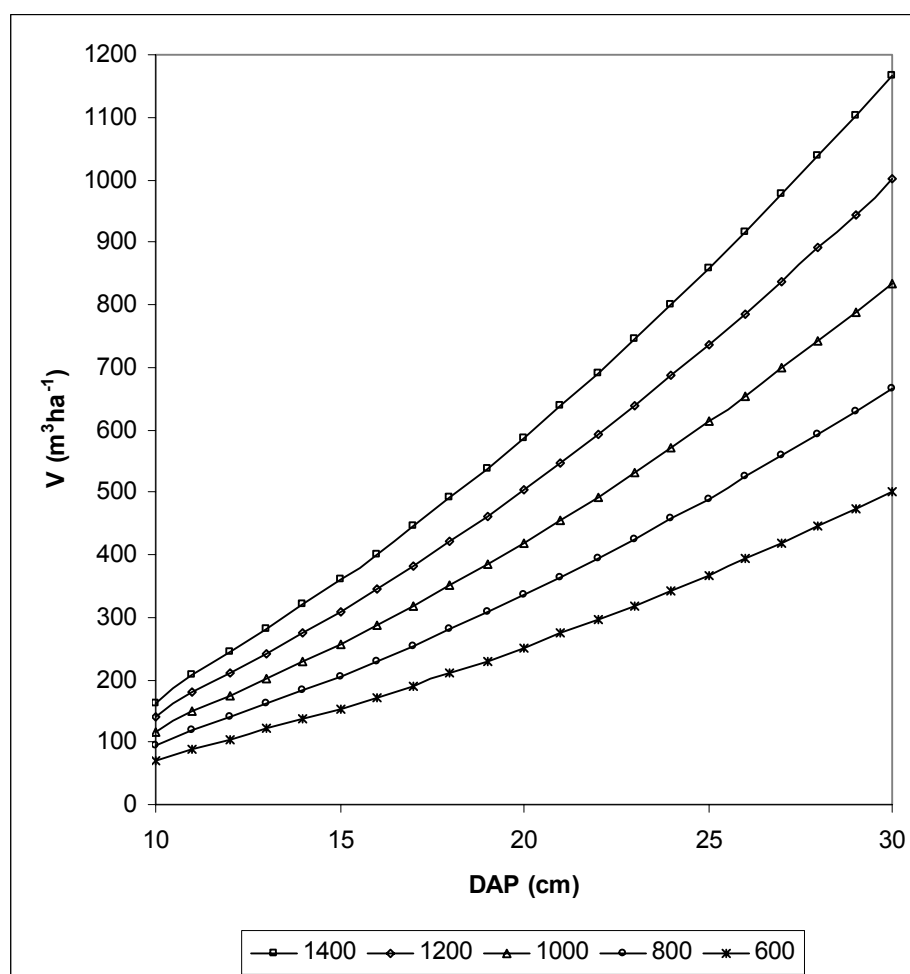
**Figura 23 – Área basal por hectare em função do diâmetro médio e por Índice de Densidade do Povoamento.**

Da mesma forma, na Tabela 11 encontram-se relacionados os volumes por hectare em função do diâmetro médio e discriminados por Índice de Densidade do Povoamento. Esses valores de volume por hectare foram representados na Figura 25, onde se pode observar que as tendências de ocorrência das maiores produções volumétricas por hectare são obtidas nos maiores Índices de Densidade do Povoamento, e, conseqüentemente, onde ocorrem maiores diâmetros médios.

**Tabela 11 – Volume ( $m^3ha^{-1}$ ) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.**

| DAP<br>(cm) | Índice de Densidade do Povoamento |        |       |       |       |
|-------------|-----------------------------------|--------|-------|-------|-------|
|             | 1400                              | 1200   | 1000  | 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          | 1038,7                            | 890,4  | 742,0 | 593,6 | 445,2 |
| 29          | 1102,1                            | 944,6  | 787,2 | 629,8 | 472,3 |
| 30          | 1166,9                            | 1000,2 | 833,5 | 666,8 | 500,1 |

As tendências dos volumes por hectare foram de aumentar com o incremento do diâmetro médio e do Índice de Densidade do Povoamento - IDP. Os volumes por IDPs apresentaram uma tendência de paralelismo, porém tenderam a afastar-se como o aumento do valor do IDP e da própria produção, bem como, ao incremento diamétrico. Essas tendências podem ser consideradas normais em povoamentos superestocados, pois se enquadram na estrutura de crescimento destas populações equiâneas de *Pinus taeda*.

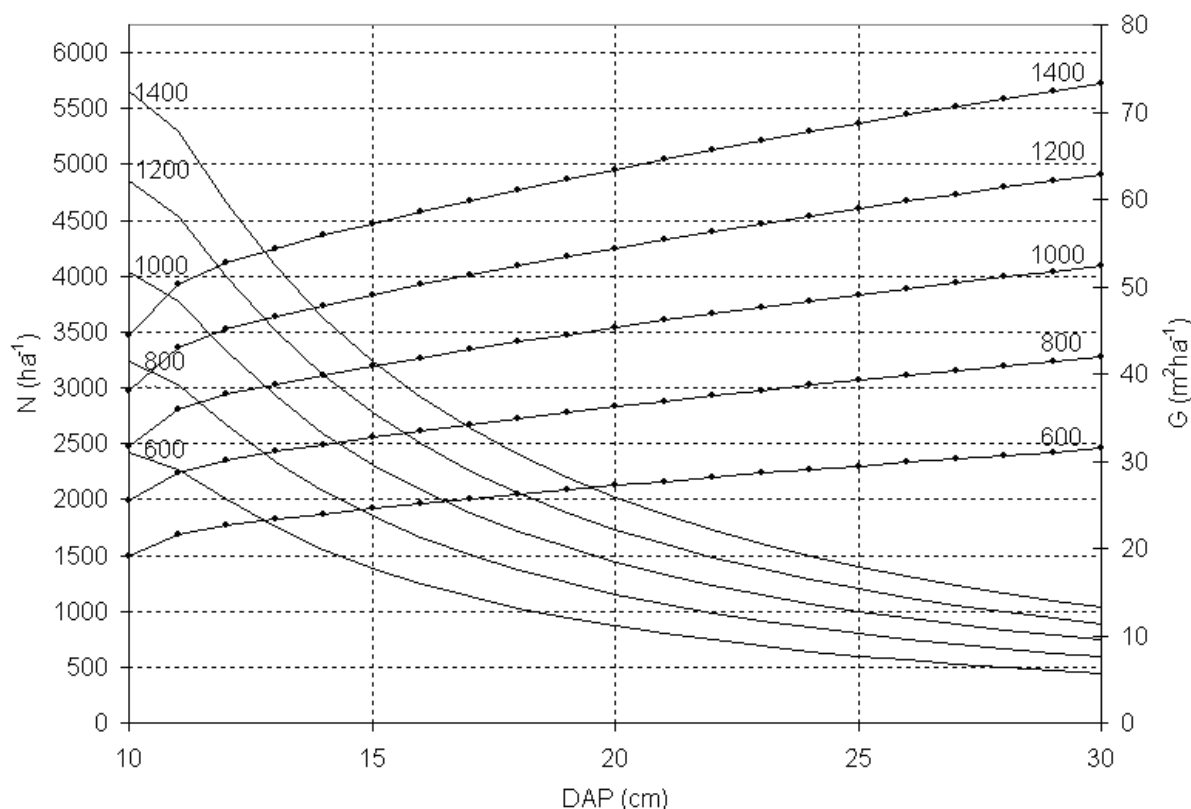


**Figura 24 – Volume por hectare em função do diâmetro médio e por Índice de Densidade do Povoamento.**

### 5.6.3 Elaboração dos Diagramas de Manejo da Densidade

Os Diagramas de Manejo da Densidade – DMD, para cada Índice de Densidade do povoamento – IDP, foram concebidos através do cruzamento das informações de densidade de árvores, área basal e volume por hectare em relação ao diâmetro médio. Os valores dessas variáveis encontram-se discriminadas nas Tabelas 8, 10 e 11, respectivamente.

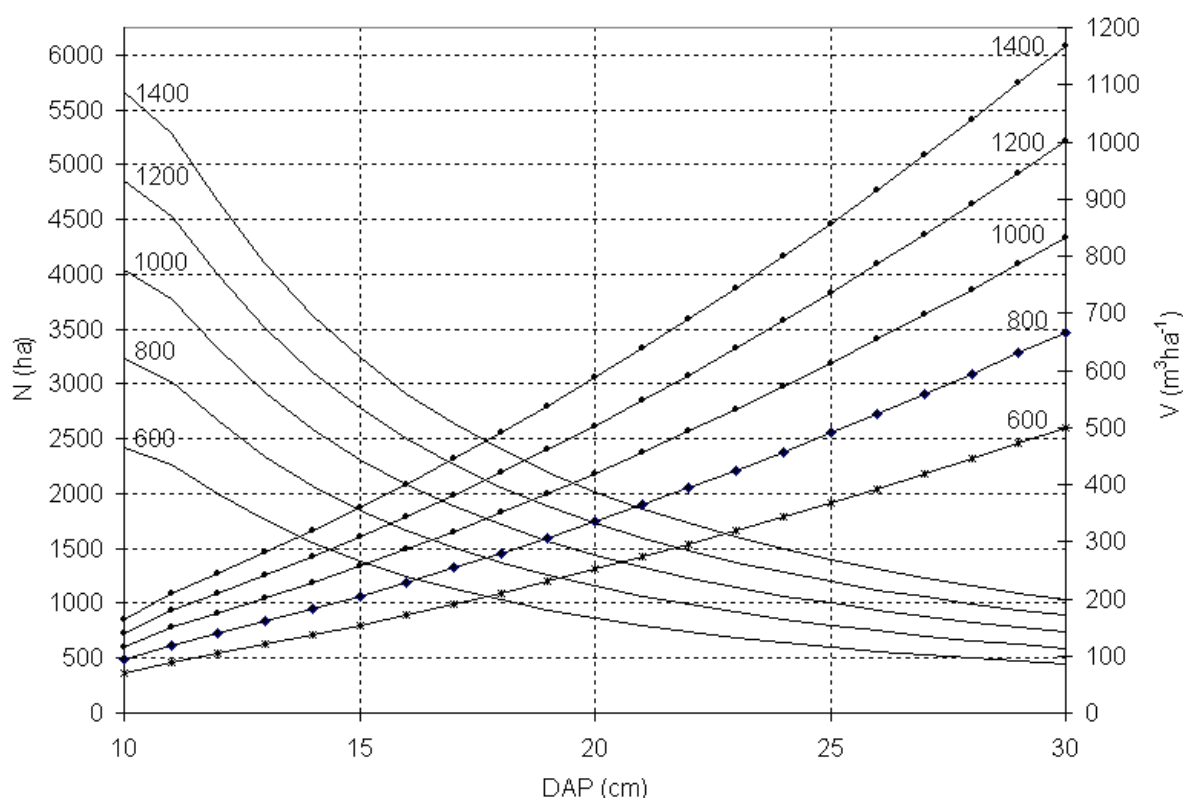
Assim, pela combinação das variáveis dendrométricas: número de árvores por hectare, área basal por hectare e diâmetro médio, discriminados por Índice de Densidade do Povoamento – IDP foi gerada a Figura 25.



**Figura 25 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento, considerando a inter-relação do número de árvores e área basal por hectare com o diâmetro médio.**

Da mesma forma, da combinação das variáveis dendrométricas: número de árvores por hectare, volume por hectare e diâmetro médio, discriminados por Índice de Densidade do Povoamento – IDP foi gerada a Figura 27.

Para uma utilização prática dos Diagramas de Manejo da Densidade, inicialmente deve-se conhecer número de árvores por hectare e o diâmetro médio da população alvo. Supondo-se que um povoamento e *Pinus taeda* apresente um diâmetro médio de 10 cm e 2.426 árvores por hectare, pode-se determinar o Índice de Densidade do Povoamento a que pertence usando as informações da Tabela 8. Para o caso, o povoamento apresenta um IDP igual a 600.



**Figura 26 – Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento, considerando a inter-relação do número de árvore e volume por hectare com o diâmetro médio.**

Então, assumindo que o povoamento pertence ao IDP igual a 600, toma-se os Diagrama de Manejo da Densidade para área basal e volume em hectare, conforme Figuras 25 e 26, respectivamente. Assim, podem-se prognosticar os valores das variáveis definidas pelo número de árvores em hectare, área basal em hectare por diâmetro médio, que se projetarão ao longo do tempo, como pode ser observado na Tabela 12.

#### 5.6.4 Validação dos Diagramas de Manejo da Densidade

A validação dos Diagramas de Manejo da Densidade – DMDs foi realizada por comparação das estimativas dos volume no modelo em relação ao volume real por hectare obtidos em parcelas permanentes, instaladas em povoamentos implantados em espaçamento de 2,0x2,0 m, e inventariadas nas idades de 10, 14 e 18 anos.

**Tabela 12 – Prognose dos parâmetros dendrométricos de uma população com IDP igual a 600.**

| <b>DAP<br/>(cm)</b> | <b>N<br/>(ha)</b> | <b>G<br/>(m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>)</b> | <b>V<br/>(m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>)</b> |
|---------------------|-------------------|---|---|
| 10                  | 2426              | 19,05                                       | 69,9  |
| 15                  | 1388              | 24,53                                       | 154,0                                       |
| 20                  | 866               | 27,19                                       | 251,6                                       |
| 25                  | 600               | 29,45                                       | 367,5                                       |
| 30                  | 445               | 31,44                                       | 500,1                                       |

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

Assim, na Tabela 13 podem ser encontrados os resultados dos cálculos das diferenças absolutas e relativas dos volumes por hectare, para cada unidade amostral e por idade. Esses valores foram determinados a partir dos volumes por hectare estimados no DMD e os reais observados na população para cada condição da unidade amostral com densidade de árvores específica.

Observa-se nesta Tabela 13 que nas unidades amostrais a diferença absoluta, entre os volumes reais e os estimados no DMD por hectare, foi de apenas -7,79 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, e uma diferença relativa de -1,79 %. Esses dados demonstram a precisão do modelo de DMD determinado, e que pode ser usado como estimador de valores de volume por hectare de populações florestais em densidade completa.

Para maior segurança, também foi calculado o valor da Eficiência (E) das estimativas volumétricas por hectare no DMD em relação aos reais, sendo obtido um valor igual a 0,99 o que indica uma alta precisão do modelo empregado, pois se aproxima de uma unidade. Para o mesmo fim, também foi calculado o  $\chi^2$ , tendo obtido um valor igual a 0,00034, não significativo a 0,01% de probabilidade, indicando que os valores dos volumes reais por hectare não diferem dos estimados no modelo do DMD determinado, comprovando a sua elevada eficiência.



**Tabela 13 – 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)      | Amostra | Povoamento real |        |                                      | DMD V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | Dif. Abs. V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | Diferença relativa (%) |
|------------------|---------|-----------------|--------|--------------------------------------|--|--|------------------------|
|                  |         | D (cm)          | N (ha) | V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) |  |  |                        |
| 10               | 1       | 17,0            | 2383   | 379                                  | 401,9                                    | -22,90   | -6,04                  |
|                  | 2       | 17,0            | 2383   | 373,6                                | 401,9                                    | -28,30   | -7,57                  |
|                  | 3       | 16,1            | 2500   | 355,2                                | 344,2                                    | 11,00  | 3,10                   |
| 14               | 1       | 19,5            | 2008   | 534,8                                | 535,1                                    | -0,30  | -0,06                  |
|                  | 2       | 18,8            | 2070   | 507                                  | 507,2                                    | -0,20  | -0,04                  |
|                  | 3       | 18,9            | 2031   | 473,3                                | 497,3                                    | -24,00   | -5,07                  |
| 18               | 1       | 21,2            | 1875   | 653,9                                | 641,5                                    | 12,40  | 1,90                   |
|                  | 2       | 21,0            | 1836   | 616,7                                | 628,2                                    | -11,50   | -1,86                  |
|                  | 3       | 21,1            | 1719   | 585,5                                | 588,2                                    | -2,70  | -0,46                  |
| Média / Erro (%) |         |                 |        | 497,7                                | 497,7                                    | -7,39  | -1,79                  |

Considerando-se estes resultados estatísticos, pode-se auferir que o modelo do DMD pode ser empregado sem restrição e com segurança na estimativa dos valores de volume por hectare. Bem como, ser utilizado para realizar prognose da produção em volume, área basal, diâmetro médio e número de árvores, para o estabelecimento de estratégias de manejo, com a finalidade de planejamento florestal.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram chegar as seguintes conclusões:

a) Os modelos propostos por Reineke, Yoda, Zeide e Tang, para ajustar a densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio do povoamento, apresentaram uma boa precisão estatística, com um coeficiente de determinação superior a 0,88 e coeficiente de variação inferior a 1,25 %, em todos os modelos;

b) Os modelos de Zeide e Tang, embora tenham apresentado boa precisão estatística, estimaram valores de densidade de árvores por hectares superestimados por classe de diâmetro médio;

c) O modelo de Reineke estimou valores próximos aos observados, porém superestimou valores nas maiores classes de diâmetro, assumindo um coeficiente angular igual a -1,4482, não correspondendo ao inicialmente postulado, igual a -1,605, que foi indicado para uso universal em várias espécies;

d) O modelo de autodesbaste proposto por Tang, apresentou uma ótima performance estatística, com elevado coeficiente de determinação, igual a 0,99, baixo erro padrão da estimativa, igual a 0,0948, baixo coeficiente de variação, igual a 1,17 %, uma mínima tendência, com valor igual a 0,0086, e elevada eficiência, com valor igual a 0,8976, na estimativa dos valores de densidade de árvores por hectare por diâmetro médio;

e) As tendências dos valores estimados de densidade de árvores por hectare por diâmetro médio da população estudada foram distintas das encontradas por outros pesquisadores, tendo apresentado inter cruzamento das estimativas a partir de determinados diâmetros médios;

f) A dimensão do diâmetro médio que inicia o autodesbaste de indivíduos da população varia consideravelmente com a densidade de árvores implantadas por hectares;

g) O limite do autodesbaste de populações menos densas, com menor espaçamento inicial, ocorre com um diâmetro médio um pouco inferior ao

obtido em máxima densidade, sendo diretamente proporcional a densidade de árvores por hectare de implantação;

h) Quanto maior o espaçamento inicial maior é o diâmetro médio no momento do início do autodesbaste da população;

i) Para todos os espaçamentos de plantio analisados não foi comprovado o valor do coeficiente angular de  $-3/2$ , proposto por Tang, e estabelecido universalmente como o valor fixo da lei do autodesbaste;

j) Os Índices de Densidade do Povoamento - IDP variaram de um valor mínimo igual a 600 até o máximo de 1400, com intervalo de classe de 200.

k) Os Diagramas de Manejo da Densidade elaborados com as variáveis diâmetro médio, área basal e volume por hectare para cada Índice de Densidade do Povoamento, mostraram-se eficientes, permitindo estimar os valores com pouca tendência e baixo erro padrão;

l) Os volumes reais por hectare estimados no DMD apresentaram uma diferença absoluta média de apenas  $-7,39 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  e relativa de  $-1,79 \%$ , comprovando uma elevada precisão do modelo de DMD desenvolvido;

m) As estimativas volumétricas por hectare no DMD em relação aos valores reais, apresentaram um valor de eficiência igual a 0,99, o que indica uma alta precisão, e um valor de  $\chi^2$  igual a 0,00034, não significativo a 0,01 % de probabilidade, demonstrando que os valores reais e os estimados não diferem estatisticamente entre si.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETZ, P. Eine Entscheidungshilfe für die Durchforstung von Fichtenbeständen. **Allgemeine Forstzeitschrift**, v.30, p.666-677, 1975.

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

ANDO, T. Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand. **Bull. Gov. For. Exp.** Station No. 210. Tokyo, 1968. 153p.

ANDO, T.; HATIYA, K.; DOI, K.; KATAOKA, H.; KATO, Y. Studies on the system of density control of sugi (*Cryptomeria japonica*) stand. **Bull. Gov. For. Exp.** Station No. 209. Tokyo, 1968. 76p.

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

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

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

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

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

CELLINI, J. M.; PASTEUR, G. M.; WADO, E. LENCINAS, M. V. 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.**, v.11, n.2, p.245-261, 2002.

COETZEE, J. The influence of stand density on the yield of *Eucalyptus grandis*: a comparison between a good site and a poor site at age 4 years. In: SCHÖNAU, A. P. G. **Symposium on Intensive Forestry**: the role of Eucalypts, Durban: Southern African Institute of Forestry, p.901-915, 1991.

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

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

DEAN, T. J.; JOKELA, E. J. A density-management diagram for slash pine plantations in the lower coast plain. **Southern Journal of Applied Forestry**, n.16, p.51-54, 1992.

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**, v.142, p.79-87, 2001.

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

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

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

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, (Note NC-61), 1967.

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

HAMILTON, D. A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of northern Idaho. **Forest Science**, 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. 18p.

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

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

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

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

JENNINGS, S. **Blackwood**. Native Forest Silviculture. Technical Bulletin No. 10. Forestry Commission, Tasmania. 1991.

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

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

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

LARSON, P. R. Some indirect effects of environment on wood formation. In: ZIMMERMANN, M. H. THE FORMATION OF WOOD IN FOREST TREES. Academic. New York: p.345-365. 1964.

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

LIU, J. Study of the relationships between stand averaged diameter and self-thinning. **Forest Science Research Spec. Edn.**, p.45-54. 1987.

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

MÁRQUEZ-LINARES, M. A.; ALVAREZ-ZAGOYA, R. Construcción de una guía de densidad para *Pinus cooperi* var. ornelasi con base en la clase de copa en Durango, México. **Madera y Bosques**. v.1, n.2. p.23-36. 1995.

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

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

MONSERUD, R. A.; LEDERMANN, T.; STERBA, H. Are self-thinning constraints needed in a tree-specific mortality model ?. **Forest Science**, v.50, n.6, p.848-858, 2005.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. **Forest Ecology and Management**. 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. 80p.

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 Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. **Invest. Agr. Sist. Recr. For.** v.11, n.2, p.409-424, 2002.

PENNER, M.; SWIFT, E.; GAGNON, R.; KNOX, J. A stand density management diagram for spruce in New Brunswick. In: Fundy Model Forest Network. **Canadian Forest Service**. 2004. 12p.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 1997. 586p.

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**, v.46, p.627-638, 1933.

REINSTORF, L. O. **The influence of stand density on growth of *Pinus elliottii***. Stellenbosch: Forestry University of Stellenbosch. 1970. 62p. Dissertação (Mestrado) - University of Stellenbosch.

RENNOLS, K.; PEACE, A. Flow models of mortality and yield for unthinned forest stands. **Forestry**, v.1, p.47-58. 1986.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, v.10, p.290-300, 1959.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística. Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro. 1986. 173p.

SAS Institute Inc. **SAS/STAT user's guide**. Version 8 (computer manual). SAS Institute Inc., Cary. N.C. 1999.

SAUNDERS, M. R.; PUETTMANN, K. J. A preliminary white spruce density management diagram for the lake states. University of Minnesota. Dep. of For. Res. n.145. 13p. 2000.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM, 1993. 348 p.

SHIMANO, K. A power function for forestry structure and regeneration pattern of pioneer and climax species in patch mosaic forests. **Plant Ecology**. v.146, p.207-220, 2000.

SMITH, D. J.; WOODS, M. E. **Red pine and white pine density management diagrams for Ontario**. Tech. Rep. n.48. Ontario Ministry of Natural Resources, Southcentral Sciences Division, Sault Ste. Marie, ON. 1997. 31p.

SMITH, N. J.; HANN, D. W. A growth model based on the self-thinning rule. **Canadian Journal Research**, v.16, p.330-334, 1986.

SPIECKER, H. Durchforstungsansätze bei Eiche unter besonderer Berücksichtigung des Dickenwachstums. **Allgemeine Forstzeitschrift - u. J. -Ztg.**, v. 154, n. 2, p. 21-36, 1983.

STERBA, H.; MONSERUD, R. A. The maximum density concept applied to uneven-aged mixed-species stands. **Forest Science**, v.39, n.3, p.432-452, 1993.

SWIFT, E. Development of stand density management diagrams for Eastern spruce-Balsam fir forests of the Acadian Forest Region. In: Fundy Model Forest Network. **Canadian Forest Service**. 2003. 19p.

TANG, S. Stand growth model and its applications for Ma-Wei pine in Daqing Mountain area. **Forest Science Research**, v.4, p.8-13. 1991.

TANG, S.; MENG, C. H.; MENG, F. R.; WANG, Y. H. A growth and self-thinning model for pure even-aged stands: theory and applications. **Forest Ecology and Management**. 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**, v.75, p.61-68, 1995.

VAN LAAR, A. Influence of the parameter and stand density on diameter growth of *Pinus radiata*. **South African Forestry Journal**, v.70, p.5-15, 1969.

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**, 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.; KIRA, T., OGAWA, H.; HOZUMI, K., Self-thinning in over rowed pure stands under cultivated and natural conditions. **Journal Biology**, v.14, p.107-129, 1963.

ZEIDE, B. A relationship between size of trees and their number. **Forest Ecology and Management**, v.72, p.265-272, 1995.



ZEIDE, B. Analysis of the  $3/2$  power law of self-thinning. **Forest Science**, v.33, n.5, p.17-537, 1987.

ZEIDE, B. Self-thinning and stand density. **Forest Science**, v.37, p.517-523, 1991.

ZEIDE. B. Tolerance and self-tolerance of trees. **Forest Ecology and Management**, v.13, p.149-166, 1985.