

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

**Anelisa Pedroso Finger**

**DIAGRAMAS DE MANEJO DA DENSIDADE PARA POVOAMENTOS  
DE *Acacia mearnsii* De Wild.**

Santa Maria, RS

2016

**Anelisa Pedroso Finger**

**DIAGRAMAS DE MANEJO DA DENSIDADE PARA POVOAMENTOS DE *Acacia mearnsii* De Wild.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Schneider**

Santa Maria, RS

2016

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

Finger, Anelisa Pedroso  
Diagramas de manejo da densidade para povoamentos de  
Acacia mearnsii De Wild. / Anelisa Pedroso Finger.-2016.  
67 p.; 30cm

Orientador: Paulo Renato Schneider  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2016

1. Acácia-negra 2. Autodesbaste 3. Modelo de Tang I.  
Schneider, Paulo Renato II. Título.

---

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Anelisa Pedroso Finger. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: anefinger@yahoo.com.br

**Anelisa Pedroso Finger**

**DIAGRAMAS DE MANEJO DA DENSIDADE PARA POVOAMENTOS DE *Acacia mearnsii* De Wild.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**

**Aprovado em 23 de fevereiro de 2016:**

---

**Paulo Renato Schneider, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)**

---

**Erni José Milani, Dr. (UFSM)**

---

**Eduardo Pagel Floriano, Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, RS  
2016

## RESUMO

### DIAGRAMAS DE MANEJO DA DENSIDADE PARA POVOAMENTOS DE *Acacia mearnsii* De Wild.

AUTOR: Anelisa Pedroso Finger  
ORIENTADOR: Paulo Renato Schneider

O Diagrama de Manejo da Densidade (DMD) é uma ferramenta utilizada para realizar a prognose da produção em densidade, área basal e volume a fim de estabelecer estratégias de manejo para o planejamento florestal. O objetivo do presente foi construir um diagrama de manejo da densidade para *Acacia mearnsii* De Wild., com dados dendrométricos provenientes de 12 municípios da região nordeste do Rio Grande do Sul. A máxima densidade populacional foi estimada pelo modelo de Tang, ajustado com dados de parcelas em espaçamento 1x1m. Com este modelo foram gerados os gráficos de autodesbaste e Índices de Densidade de Povoamento (IDP) para um diâmetro padrão de 10cm. Os níveis de densidade foram determinados, proporcionalmente, a partir da máxima densidade, por índice de densidade de povoamento (IDP), em intervalos de classe de 200, com IDP máximo 2400 e mínimo 1400. Os DMDs foram elaborados com controle de diâmetro médio e densidade populacional, e como variável de resposta o volume por hectare e o peso de casca verde por hectare. Um segundo modelo de DMD foi elaborado com o objetivo de inserir um controle produtivo dos sítios, através da altura dominante do povoamento. Estes modelos de DMD permitiram estimar o volume e peso de casca verde com ótima precisão, a partir do controle do desenvolvimento do diâmetro, densidade e altura dominante.

**Palavras-chave:** Acácia-negra. Autodesbaste. Modelo de Tang.

## ABSTRACT

### DENSITY MANAGEMENT DIAGRAMS IN *Acacia mearnsii* De Wild. STANDS.

AUTHOR: Anelisa Pedroso Finger  
ADVISER: Paulo Renato Schneider

Density management diagrams (DMD) is a tool used to carry out the prognosis of production in density, basal area and volume in order to establish management strategies for forest planning. The aim was to build a density management diagram for *Acacia mearnsii* De Wild. Data from 12 cities in the northeastern region of Rio Grande do Sul were used for the DMD construction. Since the Tang model had the best evaluation, it was used to select the maximum population density estimative, thus the density 1x1 was used to construction of the DMD. With the same model, self-thinning graphs and Stand Density Index (SDI) were generated; adopting a standard quadratic mean diameter of 10cm. Density levels were determined proportionally to SDI maximum density in 200 class intervals, with higher 2400 and lower 1400 SDI. The DMD were produced with an average diameter and density control, and volume and green rind bark weight per hectare. A second DMD model was developed in order to insert a site production control through the dominant height of the stand. These DMD models allowed estimating the volume and green rind bark with great precision, from the control of diameter, density and dominant height.

**Key words:** Black wattle. Self-thinning. Tang model.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos dados utilizados no estudo. ....	30
Tabela 2 - Parâmetros estatísticos das equações de volume médio testadas para <i>Acacia mearnsii</i> De Wild. ....	31
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos das equações de peso de casca verde testadas para <i>Acacia mearnsii</i> De Wild. ....	32
Tabela 4 - Resultados estatísticos dos modelos de densidade-diâmetro e de autodesbaste ajustados.....	33
Tabela 5 - Estatística para seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio. ....	34
Tabela 6 - Valores estimados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade de árvores. ....	35
Tabela 7 - Parâmetros do modelo de densidade-diâmetro de Tang ajustado por espaçamento.....	36
Tabela 8 - Densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através do modelo de densidade-diâmetro de Tang, com variação do espaçamento.....	37
Tabela 9 - Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio (unidade logarítmica) e Índices de Densidade do Povoamento.....	40
Tabela 10 - Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento. ....	43
Tabela 11 - Área basal (m <sup>2</sup> /ha) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.....	45
Tabela 12 - Volume (m <sup>3</sup> /ha) por diâmetro médio e Índice de densidade do povoamento. ....	46
Tabela 13 - Peso de casca verde (kg/ha) por diâmetro médio e índice de densidade do povoamento. ....	49
Tabela 14 - Variação da relação do peso de casca verde (T/ha) pelo volume (m <sup>3</sup> ).. ....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de povoamento de acácia-negra e suas diversas utilizações. ....	14
Figura 2 - Representação dos componentes básicos de um DMD (escala logarítmica). ....	19
Figura 3 - Diagrama de Manejo da Densidade. ....	21
Figura 4 - Localização dos municípios com plantios de <i>Acacia mearnsii</i> De Wild..	22
Figura 5 - Valores estimados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio para os modelos de densidade-diâmetro ajustados. ....	35
Figura 6 - Tendência da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio em diferentes espaçamentos de implantação do povoamento. ....	38
Figura 7 - Limites das fases de concorrência entre indivíduos em densidade de árvores por diâmetro médio. ....	39
Figura 8 - Linha de máxima densidade de árvores por hectare por diâmetro médio em unidade logarítmica. ....	41
Figura 9 - Índice de Densidade de Povoamento representando a densidade de árvores por hectare por diâmetro médio (unidade logarítmica). ....	41
Figura 10 - Índice de Densidade do Povoamento com representação da densidade de árvores por hectare por diâmetro médio. ....	44
Figura 11 - Área basal por hectare em função do diâmetro médio e por Índice da Densidade do Povoamento. ....	46
Figura 12 - Volume (m <sup>3</sup> /ha) em função do diâmetro médio e por índice de densidade do povoamento. ....	48
Figura 13 - Peso de casca verde por hectare em função do diâmetro médio e índice de densidade do povoamento. ....	50
Figura 14 - Diagrama de Manejo da Densidade com variável área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ) para povoamentos de <i>Acacia mearnsii</i> . ....	52
Figura 15 - Diagrama de manejo da densidade por índice de densidade de povoamento (relação entre número de árvores e área basal com o diâmetro médio) ....	53
Figura 16 - Diagrama de Manejo da Densidade com variável volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) para povoamentos de <i>Acacia mearnsii</i> . ....	54
Figura 17 - Diagrama de manejo da densidade por índice de densidade de povoamento (relação entre número de árvores e volume com o diâmetro médio). ....	56
Figura 18 - Diagrama de Manejo da Densidade com variável peso de casca (kg ha <sup>-1</sup> ) para povoamentos de <i>Acacia mearnsii</i> . ....	57
Figura 19 - Diagrama de manejo da densidade por índice de densidade de povoamento (relação entre número de árvores e peso de casca verde com o diâmetro médio). ....	58
Figura 20 - Diagrama de Manejo da Densidade para Povoamentos de <i>Acacia mearnsii</i> . ....	61



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	24
Equação 2.....	24
Equação 3.....	24
Equação 4.....	24
Equação 5.....	24
Equação 6.....	25
Equação 7.....	25
Equação 8.....	25
Equação 9.....	25
Equação 10.....	25
Equação 11.....	26
Equação 12.....	26
Equação 13.....	26
Equação 14.....	26
Equação 15.....	27
Equação 16.....	27
Equação 17.....	27
Equação 18.....	27
Equação 19.....	27
Equação 20.....	28
Equação 21.....	28
Equação 22.....	36
Equação 23.....	47
Equação 24.....	49
Equação 25.....	59
Equação 26.....	60
Equação 27.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	OBJETIVOS .....	11
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	11
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
2.1	DESCRIÇÃO DA ESPÉCIE .....	13
2.2	CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	14
2.3	DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDADE (DMD).....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
3.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	22
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA .....	22
3.3	ORIGEM DOS DADOS.....	23
3.4	METODOLOGIA EMPREGADA .....	23
3.4.1	<b>Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento</b> .....	26
3.4.2	<b>Formulação do Diagrama de Manejo da Densidade</b> .....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	30
4.1	SELEÇÃO DO MODELO DE DENSIDADE DE ÁRVORES .....	30
4.2	DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DE VOLUME MÉDIO E PESO DE CASCA VERDE .....	30
4.2.1	<b>Determinação da equação de volume médio</b> .....	30
4.2.2	<b>Determinação da equação de peso de casca verde médio</b> .....	31
4.3	DETERMINAÇÃO DO MODELO DE DENSIDADE POPULACIONAL PELO DIÂMETRO .....	32
4.4	DETERMINAÇÃO DO AUTODESBASTE.....	36
4.5	ÍNDICES DE DENSIDADE DO POVOAMENTO.....	39
4.5.1	<b>Determinação dos IDPs em valor absoluto pelo diâmetro médio</b> .....	43
4.5.2	<b>Determinação da área basal por diâmetro médio e índice de densidade do povoamento</b> .....	45
4.5.3	<b>Determinação do volume por índice de densidade do povoamento</b> .....	46
4.5.4	<b>Determinação do peso de casca verde por índice de densidade do povoamento</b> .....	49
4.5.5	<b>Varição da relação do peso de casca verde pelo volume</b> .....	50
4.6	DIAGRAMAS DE MANEJO DA DENSIDADE .....	51
4.6.1	<b>Construção dos Diagramas de Manejo da Densidade do Povoamento</b> ...51	
4.6.2	<b>Diagrama de Manejo da Densidade do Povoamento (DMDPs) com altura dominante</b> .....	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	62
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

O plantio de espécies exóticas tem sido recomendado como uma opção de manejo a fim de aumentar a produtividade e a biodiversidade de ecossistemas degradados (COSSALTER, 1987).

A exploração de espécies exóticas como *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp. e *Acacia* spp. fora de sua área de ocorrência natural, remonta os séc XVIII e XIX (EVANS, 1992). Caracterizadas por serem espécies de rápido crescimento, dentre estas, a *Acacia* spp. apresenta também um grande potencial econômico.

O gênero *Acacia* compreende mais de 1200 espécies (ENDRESS, 1994; BARROSO, 1991) representando um dos maiores gêneros nas Angiospermas (ENDRESS, 1994). Os exemplares são encontrados como árvores, arbustos ou trepadeiras lenhosas.

As árvores de Acácia apresentam inúmeros benefícios, entre eles a contenção e fixação de areais, prevenção de erosão hídrica e eólica, produção de madeira, celulose e papel, tanino e chapas.

Por pertencerem à família das leguminosas, as representantes da espécie são caracterizadas por uma grande capacidade de fixação de nitrogênio e como consequência, a capacidade de desenvolvimento em solos pobres neste nutriente.

Segundo Carpanezzi (1998) a acácia-negra é considerada uma espécie recuperadora de solos degradados, pela capacidade de fixação simbiótica de nitrogênio e deposição de serapilheira rica em nutrientes, melhorando as condições químicas, físicas e biológicas do solo.

Por ser uma espécie utilizada para múltiplas finalidades (restauração de ambientes degradados, produção de tanino e energia e fixação de nitrogênio), a acácia-negra vem sendo amplamente plantada no estado do Rio Grande do Sul, onde alcança área superior a 160 mil hectares, beneficiando cerca de 40 mil famílias que cultivam a espécie em suas propriedades (ABRAF, 2013). No estado, a acacicultura, é uma sólida atividade econômica que vem, ao longo dos anos, promovendo benefícios sociais e econômicos para vários municípios.

Recentemente, o uso do polímero de acácia-negra foi divulgado e utilizado como recuperador de rios e mananciais hídricos que sofreram derramamento de rejeitos de minérios, que é obtido a partir da casca da acácia-negra.

A correta condução da floresta para usos múltiplos gera renda ao longo do período de rotação e agrega valores a matéria prima produzida. A otimização do uso da floresta por meio de técnicas silviculturais ao longo de seu ciclo, gera fluxo de caixa intermediários e agrega um maior valor aos produtos gerados.

Uma das formas de conhecer a dinâmica dos povoamentos são os diagramas de manejo de densidade pois auxiliam na determinação de densidades alternativas para os regimes de manejo de acordo com os mais variados objetivos. Isto só é possível, pois por serem considerados modelos simples e versáteis, estes refletem as relações fundamentais do povoamento, tais como: densidade, competição e autodesbaste.

Ainda que, no manejo de acácia-negra não se realizem desbastes, o uso de DMD são importantes, pois possibilitam planejar a produção para diferentes densidades de plantio, qualidades de sitio ou da condução da regeneração natural.

Embora pouco utilizados no Brasil, os diagramas de manejo de densidade vêm, nos últimos anos, mostrando-se como uma importante ferramenta de planejamento devido ao aumento da atividade florestal de pequenos e médios proprietários.

Com a confecção de dendrogramas de manejo de densidade pode-se definir o melhor momento para intervir no povoamento, bem como, para obtermos informações sobre qualidade e nível de detalhamento destas; possibilitadas pela modelagem específica de equações de crescimento e densidade, conduzindo assim o povoamento dentro de uma faixa ótima de densidade de manejo, evitando a ocorrência do autodesbaste.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a densidade de árvores por hectare em relação ao diâmetro médio para determinação de autodesbaste e elaborar os Diagramas de Manejo da Densidade que servirão de modelos auxiliares no manejo e planejamento da produção de povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Este trabalho foi desenvolvido para atender aos seguintes objetivos específicos para o manejo de povoamentos de acácia-negra:

- a) Estudar a precisão e eficiência dos modelos de densidade populacional em relação ao diâmetro médio;
- b) Analisar o momento de ocorrência do autodesbaste nos povoamentos para a espécie;
- c) Selecionar o melhor modelo volumétrico para a construção do Diagrama de Manejo da Densidade;
- d) Elaborar o Diagrama de Manejo da Densidade do Povoamento para a espécie.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DESCRIÇÃO DA ESPÉCIE

A *Acacia mearnsii* De Wild., conhecida popularmente no Brasil como acácia-negra, é uma representante da família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Mimosoideae (KANNEGIESSER, 1990).

A espécie é originária do sudoeste da Austrália e da Tasmânia com região de ocorrência situada entre as latitudes 33 a 44° sul e longitudes 140 a 151° leste de Greenwich, em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.070m (BOLAND et al., 1984).

*Acacia mearnsii* é uma das espécies de acácia mais plantada fora da Austrália (Ásia, América do Norte, Central e Sul e África) (GRIFFIN et al., 2011), e comumente usada como fonte comercial de tanino ou carvão (lenha-combustível) por populações locais. A espécie também é citada como potencial invasora, modificando a ecologia e o habitat quando competindo com a vegetação nativa (RICHARDSON; REJMANEK, 2011).

De acordo com Sherry (1971); Boland et al. (1984); Pieterse e Boucher (1997); Carpanezzi (1998); Dedeczek e Higa (2003) a acácia-negra é uma espécie pioneira, possuindo como principais características:

- A rápida colonização de ambientes abertos;
- Alta capacidade de se estabelecer em áreas alteradas e degradadas;
- Produção de grande quantidade de sementes que permanecem viáveis no solo por longo período de tempo;
- Germinação rápida (requer indução);
- Rápido crescimento;
- Vida curta (em média 10 anos).

A espécie foi introduzida no estado do Rio Grande do Sul em 1918, por Alexandre Bleckmann, sendo os primeiros plantios comerciais realizados em 1928, no município de Estrela (OLIVEIRA, 1968).

Por ser uma madeira de excelente qualidade a espécie pode ser utilizada para os mais diversos fins. Atualmente, o aproveitamento da acácia-negra é realizado em três esferas: madeira descascada, lenha e casca, dando origem à diferentes produtos (Figura 1).

Figura 1 - Esquema de povoamento de acácia-negra e suas diversas utilizações.



Fonte: O autor, 2016.

A casca da acácia-negra é utilizada, principalmente, nas indústrias de tanino, curtumes e, também, no tratamento de efluentes industriais.

Os galhos, árvores mortas e resíduos são também aproveitados como lenha para secagem de grãos e de fumo, indústrias de carvão vegetal, olarias, hotéis, restaurantes e demais lugares onde há necessidade desta matéria-prima.

A madeira descascada é utilizada nas indústrias de chapas e painéis, celulose e como combustível para alimentação de caldeiras.

## 2.2 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

Entende-se por crescimento de uma floresta, ou das árvores componentes desta, as mudanças ocorridas em tamanho durante um determinado período de tempo (GAUTO, 1997). O crescimento é definido como o aumento periódico das raízes, copa e tronco como consequência dos processos naturais e aos estímulos ambientais (HUSCH et al., 1982).

No processo de crescimento, à medida que a árvore cresce, há maior necessidade de espaço para o desenvolvimento da copa, raízes e fuste. Nos povoamentos, a área útil de uma árvore pode ser limitada pelas árvores vizinhas, gerando competição entre copas e raízes, o que afeta o crescimento em diâmetro (HILEY, 1959).

Os fatores de crescimento que afetam diretamente o crescimento de determinada espécie são: luz, concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, disponibilidade de água e nutrientes (SPIECKER, 1981). A disponibilidade desses elementos para cada árvore está associado a um processo dinâmico influenciado pela concorrência no povoamento. Sobre isso, Schneider (2002), afirma que a competição é outro fator que afeta o crescimento das espécies florestais, pois há uma relação entre a ocupação horizontal da árvore com a sua dimensão e volume.

O crescimento das árvores depende dos fatores genéticos da espécie (fator considerado fixo para determinada planta), interagindo com o ambiente, compreendendo, desta forma, fatores climáticos: temperatura, precipitação, vento e insolação; solo: características químicas, físicas e biológicas; topográficos: inclinação, altitude e exposição; competição: influência de outras árvores, vegetação rasteira e animais (FINGER, 1992).

A dimensão da árvore é definida pelo crescimento longitudinal, diametral e volumétrico. Dentre esses, o crescimento longitudinal é minimamente afetado pela densidade do povoamento (HILEY, 1959); porém o diâmetro é normalmente afetado pela densidade populacional, sendo muito sensível a mudanças causadas pelos desbastes (SCHNEIDER, 2008). Segundo este autor, o crescimento em diâmetro determina o grau de aproveitamento da madeira, sendo, por isso muito importante para o silvicultor. O volume da árvore é dependente dos dois tipos de crescimento (longitudinal e diamétrico) e pode ser controlado, na sua maior parte, pela correta manipulação dos espaçamentos no plantio conforme a qualidade do sitio. Este tipo de crescimento depende também, da forma da árvore que por sua vez tem relação direta com a densidade populacional.

Todos esses fatores, em conjunto determinam que as taxas de crescimento apresentem variações, não somente entre espécies, como também entre árvores da mesma espécie, em decorrência da constituição genética ou do sitio onde crescem, resultando em diferentes tamanhos (ZANON, 2007).



A produtividade florestal é definida em termos de qualidade de sítio sendo constituída pela interação de vários fatores ambientais. A máxima produção de determinada área em um determinado período de tempo é chamada de qualidade de sítio (DANIEL; HELMS; BAKER, 1979). Como afirmado por Ortega e Monteiro (1988), a capacidade produtiva de um sítio florestal pode ser avaliada, para determinado local, pela medição de fatores intrínsecos (altura, crescimento e produção final) ou extrínsecos (clima, litologia, edafologia e morfologia) à biomassa florestal.

De acordo com Schneider (2008), em povoamentos equiâneos, é fundamental o conhecimento das inter-relações entre a densidade de árvores por hectare e o desenvolvimento do diâmetro ao longo do tempo, pois com o envelhecimento dos povoamentos há um aumento na taxa de mortalidade dos indivíduos, que deve ser evitada com o emprego da densidade adequada a cada situação.

A influência da densidade do povoamento sobre o crescimento em povoamentos de acácia-negra foi também estudada por Schneider et al. (2000) que quantificou a redução do crescimento em diâmetro, como proporcional ao espaçamento.

Além da importância do acompanhamento do diâmetro em povoamentos florestais ao longo do tempo, Crechi (1996) cita a evolução da área basal em função da idade e/ou outras variáveis, para tomada de decisão no manejo da floresta, no que se refere a intensidade de desbastes.

O conceito de área basal crítica, introduzido por Assmann (1970), propõe que abaixo desta são esperadas perdas no crescimento em volume; sendo esta, um bom indicador do espaço vital.

Por ser a única variável que influencia diretamente no diâmetro, o espaço vital, pode ser controlado, o que implica na qualidade e valor da matéria prima produzida (SCHNEIDER, 2008). Bem como, é uma variável com relação direta com o fator de competição e concorrência, pois as árvores não pertencem ao ambiente estático, e sim, a um dinâmico onde muitas acabam sendo eliminadas pela seleção natural durante a competição por espaço (KRAMER; KOSLOWSKI, 1960).

Conhecida como Lei de Yoda (regra da potência de  $-3/2$ ), a regra do autodesbaste descreve a relação entre o tamanho e a densidade de povoamentos equiâneos com máxima densidade e que ainda estão em pleno crescimento. O termo autodesbaste só é aplicado quando a mortalidade ou o “autodesbaste” é

causado pela competição entre a população e não por competição entre outras populações ou stress, tais como: seca, fogo, doenças ou mato competição.

O autodesbaste ocorre em povoamentos florestais que se encontram com alta densidade, o que gera mortalidade. Sendo assim, o autodesbaste, gera um decréscimo exponencial na densidade, promovendo o incremento em tamanho dos indivíduos remanescentes no povoamento (SCHNEIDER, 2008).

De acordo com Tang et al. (1994), em povoamentos que se encontram em densidade completa ou superestocados, o autodesbaste tem início antes do mesmo atingir a máxima densidade e se intensifica com o aumento desta, atingindo o máximo autodesbaste.

### 2.3 DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDADE (DMD)

Introduzido nos Estados Unidos em 1979 por Drew e Flewelling (1979), os diagramas de manejo de densidade foram projetados em relação ao volume médio e o número de árvores por hectare, sobrepondo o diâmetro médio a fim de estimar a área basal.

Os Diagramas de Manejo da Densidade, também chamados de Dendrogramas de Manejo da Densidade, são utilizados no monitoramento dos povoamentos florestais quanto a sua densidade, podendo orientar as densidades de plantio em diferentes situações, maximizando assim a produção por meio de controle da competição (THOMAS, 2009). Trata-se de uma ferramenta que pode ser baseada na teoria do autodesbaste, a qual permite visualizar a mudança do diâmetro médio, altura, densidade e volume de povoamentos equiâneos puros (LONG; SMITH, 1985).

Um grande número de autores, incluindo Reineke (1933), sugeriram ser possível o uso de tais diagramas para definir o grau de competição em florestas equiâneas utilizando uma série de linhas traçadas paralelamente a linha de auto desbaste (DEAN; BALDWIN, 1996).

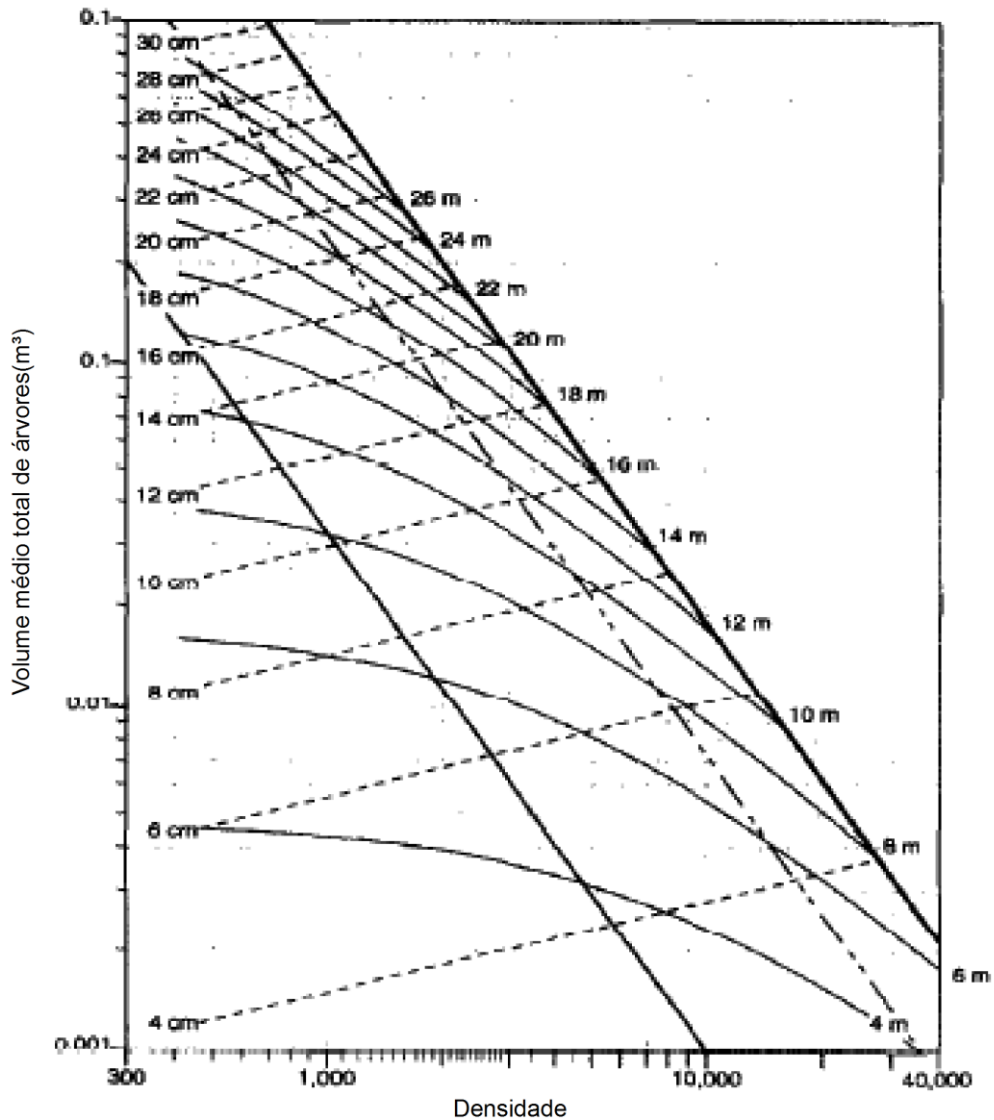
O DMD é uma ferramenta acessível para o manejo de povoamentos equiâneos e que possibilita o planejamento do manejo. Conhecer o momento de ocorrência da mortalidade que é dependente da densidade é tão importante e o DMD fornece meios de minimizar as perdas por mortalidade no autodesbaste (VANDERSCHAAF, 2006).

Pioneiro nos estudos relacionados à diagramas de manejo da densidade para povoamentos florestais (GINRICH, 1967), foi acompanhado por mais tarde por Rogers (1983) e Day (1998) que desenvolveram DMDs para espécies de coníferas e latifoliadas no hemisfério norte. No Brasil, estudos recentes tem sido desenvolvidos por Schneider (2008b), Thomas (2009), Selle (2009), Meyer (2011), Loureiro (2013) e Marangon (2015).

Em sua construção, o DMD contém 5 zonas de competição para florestas advindas de plantações florestais, denominadas de zona de exposição excessiva, onde o crescimento em altura de cada árvore é diminuído devido a deficiência da ocorrência de sombreamento entre as árvores até uma zona de mortalidade iminente que é totalmente indesejável de ser obtida.

Um modelo genérico de DMD, apresentado na Figura 2 mostra a densidade do povoamento (número de árvores por hectare) representada em escala logarítmica no eixo x e o volume médio das árvores ( $m^3$ ) representado no eixo y. As linhas pontilhadas correspondem aos diâmetros (cm) e as linhas contínuas correspondem as alturas (m). A relação entre as variáveis é apresentada no gráfico em escala logarítmica (ARCHIBALD; BOWLING, 1995).

Figura 2 - Representação dos componentes básicos de um DMD (escala logarítmica).



Fonte: Archibald e Bowling (1995).

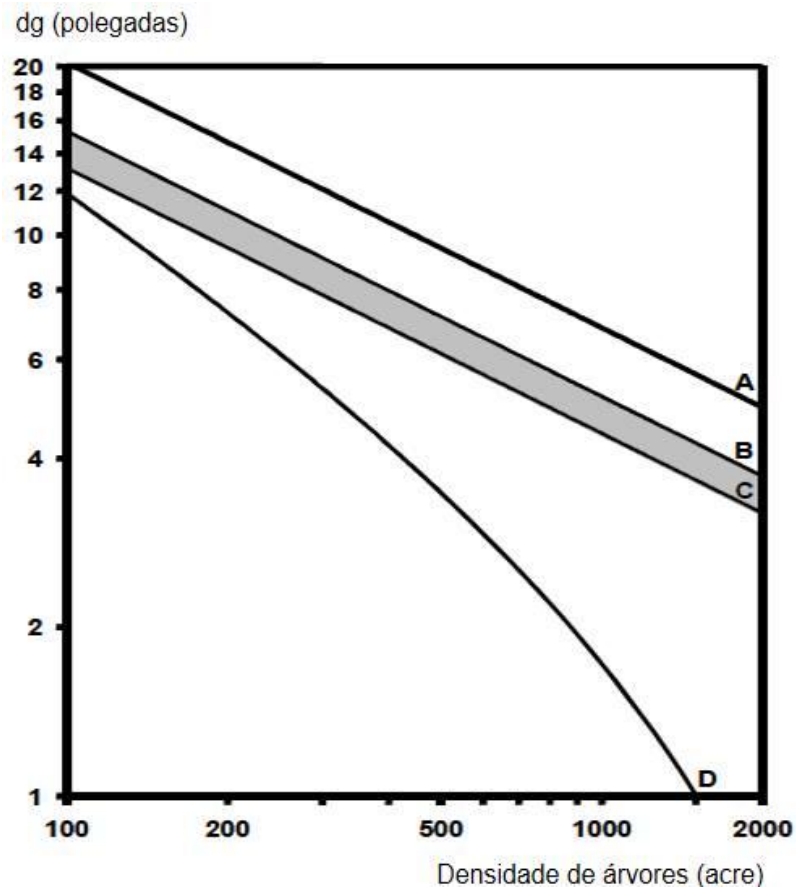
Schneider (2008), apresenta outro método para representar linhas de densidade no diagrama, utilizando os denominados Índices de Densidades do Povoamento (IDP). De acordo com Gezan et al. (2007), os dendrogramas são baseados na curva de área basal máxima, e a partir desta, os níveis de densidade são calculados por proporção. Portanto, a área basal máxima será calculada com o número máximo de árvores por hectare e um diâmetro quadrático médio de referência, gerando assim a curva máxima à qual corresponde a máxima ocupação do local (onde o IDP também será máximo) (THOMAS, 2009).

Zeide (s.d) reafirma que a área basal é a medida de densidade mais comum utilizada e, dependendo do tamanho das árvores, mudará a interpretação do estoque total do povoamento. De acordo com Girinch (1967) em estudo com folhosas, um povoamento que apresenta estoque de  $17\text{m}^2/\text{ha}$  é considerado subestocado quando o diâmetro médio for de 38cm, porém povoamentos com diâmetros médios pequenos (8cm) são considerados superestocados para uma mesma área basal. O mesmo autor, cita que o dendrograma de densidade de dado povoamento pode ser definido por faixas de estocagem: *Faixa superestocada*: onde a densidade é extremamente excessiva; *Faixa totalmente abastecida*: onde as árvores ainda possuem espaço de desenvolvimento, porém o espaço deve ser manejado para um máximo aproveitamento; *Faixa subestocada*: onde a densidade é baixa e o povoamento apresenta espaços disponíveis.

Saunders e Puettmann (2000), nominam essas faixas por quatro linhas (A, B, C, D) indicativas da ocupação do sitio. A linha "A" define o limite máximo em que a relação densidade-diâmetro é dependente da mortalidade das árvores do povoamento, ou seja, representa quando há total ocupação do sitio e como consequência a mortalidade por competição.

As linhas "B" e "C" representam o início da mortalidade e o início da produção máxima do povoamento, respectivamente. Na linha "D" observamos o momento de fechamento do dossel. Essas linhas são geradas em um diagrama que relaciona o diâmetro quadrático médio (dg) (eixo y) e a densidade de árvores (eixo x) e apresentam comportamento linear, com exceção à curva "D" de comportamento não-linear (Figura 3).

Figura 3 - Diagrama de Manejo da Densidade



Em que: A – Linha de máxima densidade e diâmetro; B – Início da mortalidade; C – Máxima produtividade do povoamento; D – Densidade de fechamento das copas; B-C – faixa de densidade ótima.

Fonte: Saunders e Puettmann (2000)

No intervalo entre B e C encontra-se a condição ótima de manejo a fim de se conseguir o estoque completo, por meio de desbastes. O intervalo entre as linhas A-C, apresenta o momento em que o povoamento está superestocado e, abaixo da linha C o momento de subestoque do povoamento com um baixo aproveitamento do sítio (SCHNEIDER, 2008).

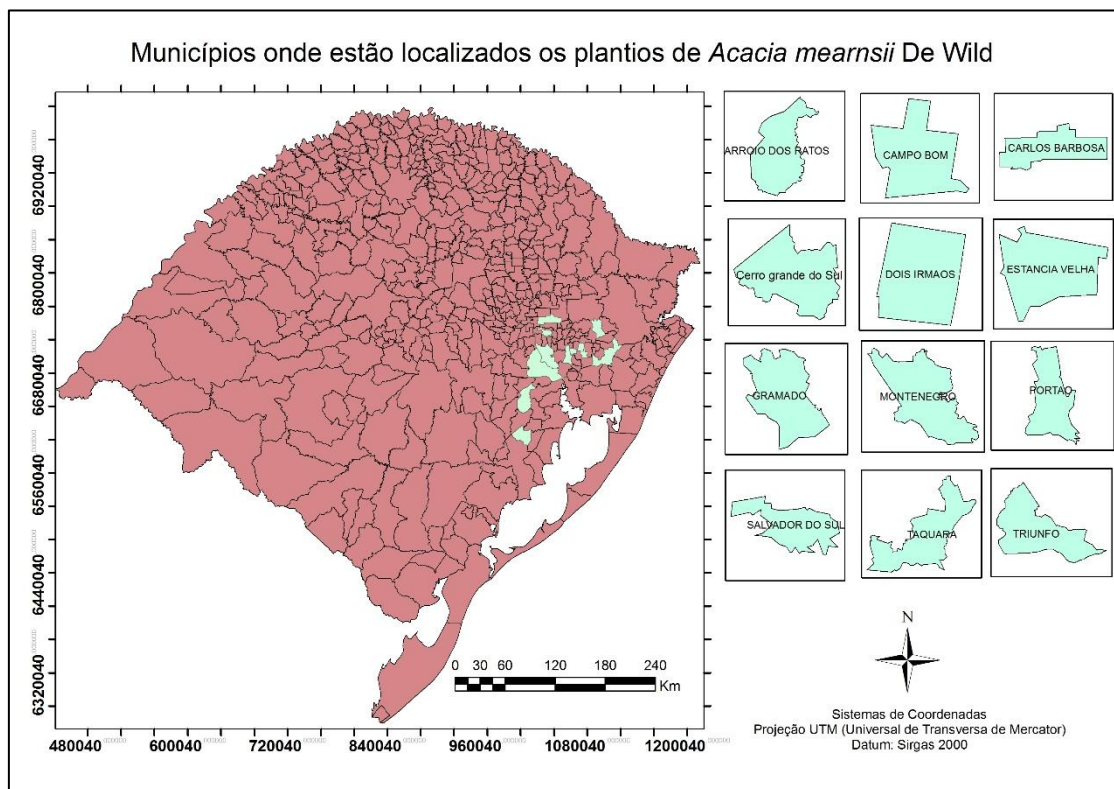
Povoamentos naturais com a mesma densidade inicial, mas que crescem em sítios diferentes seguirão a mesma trajetória no DMD, no entanto, o povoamento localizado no sítio de melhor qualidade terá o maior incremento quando comparado ao sítio de pior qualidade (SAUNDERS; PUETTMANN, 2000).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

Os dados foram medidos em plantios de *Acacia mearnsii* localizados nos municípios de Campo Bom, Estância Velha, Portão, Carlos Barbosa, Dois Irmãos, Gramado, Montenegro, Salvador do Sul, Cerro Grande do Sul, Arroio dos Ratos, Taquara e Triunfo (Figura 4).

Figura 4 - Localização dos municípios com plantios de *Acacia mearnsii* De Wild.



Fonte: O autor, 2016.

#### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A região apresenta relevo que varia desde áreas planas a áreas fortemente inclinadas, com altitude entre 29m no município de Taquara a 850m no município de Canela, e distribuem-se sobre as unidades geomorfológicas da Serra Geral,

Patamares da Serra Geral, Depressão do Rio Jacuí, Planaltos Residuais Canguçu-Caçapava do Sul e Planalto Rebaixado Marginal (FLEIG, 1993).

O clima da região varia de superúmido a úmido, não ocorrendo déficit hídrico, mas já foram registrados excedentes de até 870mm de precipitação nas regiões mais altas. As chuvas apresentam distribuição anual uniforme, com a precipitação média anual variando de 1.395mm a 1.977mm nos municípios de Taquara e Gramado, respectivamente.

A temperatura média anual varia de 15,3°C no município de Canela, a 19,9°C no município de Taquara. A ocorrência de geadas é frequente nos meses mais frios, aumentando a frequência com o aumento da altitude (MORENO, 1961).

### 3.3 ORIGEM DOS DADOS

Os dados utilizados tiveram origem em plantios de acácia-negra implantados no ano de 1980, derivados de um experimento instalado em delineamento blocos ao acaso, com quatro repetições e sete tratamentos. As parcelas foram instaladas com espaçamentos de: 1x1, 1x1,33, 2x1, 2x2, 2x2,5, 3x1 e 3x2m. Destes, os dados do espaçamento de 1x1m foram utilizados para representar a relação de máxima densidade do povoamento. Adicionalmente, foram utilizados dados dendrométricos de parcelas permanentes e temporárias, originárias de povoamentos instalados na mesma região.

As parcelas do experimento foram medidas periodicamente até os 9 anos de idade. Em cada árvore da parcela foi medida a circunferência à altura do peito (cap), altura total (h) e o número de árvores por hectare (N/ha).

### 3.4 METODOLOGIA EMPREGADA

O estudo entre a densidade-diâmetro foi realizado por meio do número de árvores por hectare e o diâmetro médio das árvores amostradas. Para isto, foram testadas as equações de Reineke (1933), Yoda et al. (1963), Tang et al. (1994) e Zeide (1995), expressos por:



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

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \cdot \ln(\bar{d}) \quad (1)$$

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

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \cdot \ln(\bar{d}) - c_1 \cdot (\ln(\bar{d}))^2 \quad (2)$$

c) Modelo do autodesbaste de Tang et al. (1994);

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{y} \ln \left[ \left( \frac{\bar{d}(t)}{d_0} \right)^{\beta y} + \left( \frac{S_f}{N_1} \right)^y - \left( \frac{d_1}{d_0} \right)^{\beta y} \right] \quad (3)$$

d) Modelo da relação densidade-diâmetro de Zeide (1995);

$$\ln(N) = a_1 - b_1 \cdot \ln(\bar{d}) + c_1 \cdot h \cdot \ln(\bar{d}) \quad (4)$$

Sendo que, “ $\bar{d}$ ” é o diâmetro quadrático médio das árvores; “ $\bar{h}$ ” 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); “ $S_f$ ” índice de máxima densidade do povoamento;  $\gamma$  o índice de autodesbaste; e, “ $d_0$ ” o diâmetro padrão igual a 10cm.

O diâmetro médio do povoamento foi expresso pela equação:

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot \bar{G}}{\pi N}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:  $d_g$  = diâmetro quadrático médio (cm);  $\bar{G}$  = área basal média da parcela (m<sup>2</sup>);  $N$  = número de árvores por hectare.

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

Para a avaliação das equações testadas para densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio quadrático do povoamento, foram utilizados os critérios estatísticos citados por Cellini et al. (2002) e Palahi et al. (2002), expressos por:

a) Tendência (BIAS)

$$\text{BIAS} = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (6)$$

b) Eficiência (E)

$$E = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad (7)$$

c) Desvio padrão residual relativo (S%)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}} \quad (8)$$

d) Desvio médio relativo (D%)

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right)}{n} \quad (9)$$

e) Qui-quadrado ( $X^2$ )

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\hat{Y}_i} \quad (10)$$

Sendo que,  $Y_i$  é o valor observado da densidade de árvores por hectare;  $\bar{Y}_i$  o valor médio da densidade de árvores por hectare;  $\hat{Y}_i$  o valor estimado da 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 realizado pelo somatório dos escores estatísticos. Nessa etapa, foram atribuídos pesos crescentes para cada equação, de acordo com a

precisão apresentada. Quanto mais precisa a equação em dado critério estatístico, menor o peso atribuído. A equação selecionada foi a que apresentou menor valor para o somatório dos parâmetros estatísticos.

Ainda foram utilizadas funções para estimativa do volume total com casca e comercial sem casca ( $m^3$ ), determinadas por Schneider e Hosokawa (1978), para acácia-negra, em povoamentos na mesma região estudada.

a) Volume total com casca

$$\log vt = -4,20076+0,9494568*\log(d^2*h) \quad (11)$$

b) Volume comercial sem casca

$$\log vc = -4,29654+0,9562276*\log(d^2*h) \quad (12)$$

As equações para estimativa do peso de casca verde e seca à 12% de umidade (kg), foram determinadas por Schneider (1978), como seguem:

a) Peso de casca verde

$$pv = 1,627002+0,00629*(d^2*h)+0,0000075*(d^2*h^2) \quad (13)$$

b) Peso de casca seca à 12% de umidade

$$ps = 0,75059+0,0029*(d^2*h)+0,0000035*(d^2*h^2) \quad (14)$$

Em que: “d” é o diâmetro (cm); “h” a altura (m); “vt” é o volume total com casca ( $m^3$ ); “vc” é o volume comercial sem casca ( $m^3$ ); “pv” é o peso de casca verde (kg); e, “ps” é o peso de casca seca à 12% de umidade (kg).

### 3.4.1 Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento

Os Índices de Densidade do Povoamento (IDP), foram determinados a partir do ajuste de um modelo estatístico com dados do espaçamento de maior densidade

(1x1m), ajustado aos dados de densidade de árvores por hectare pelo diâmetro quadrático médio das parcelas estudadas.

Para a confecção dos IDP foi definido o diâmetro padrão de 10cm, que serviu para a estratificação proporcional das densidades das árvores por hectare.

Para tal, foi utilizado um intervalo de IDP igual a 200, tomado de forma arbitrária no momento em que o diâmetro padrão era igual a 10cm. Com esse critério, foram gerados os Índices de Densidade do Povoamento suficientes para cobrir a amplitude dos dados observados.

### 3.4.2 Formulação do Diagrama de Manejo da Densidade

Para construção dos DMD, foram utilizados os parâmetros encontrados no ajuste de equação com os dados de máxima densidade (espaçamento 1x1m), por representar o momento de maior competição entre as árvores, ou seja, o autodesbaste.

A partir da equação do modelo selecionado, com coeficientes calculados para as parcelas de maior densidade, foram estimadas as densidades para os diâmetros médios, que variaram entre 5 a 15cm.

Para estimar o volume e o peso de casca verde como variável dependente foram ajustadas e selecionadas uma das equações recomendadas por Penner et al. (2004):

$$\ln(Y) = b_0 + b_1 \cdot \ln(N) \quad (15)$$

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

$$\ln(Y) = b_0 + b_1 \cdot \ln(N) + b_2 \cdot \ln(G) \quad (17)$$

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

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

Em que:  $Y$  é volume médio das árvores ( $m^3$ ) e peso de casca verde (kg);  $\bar{d}$  é o diâmetro à altura do peito (cm);  $\bar{h}$  é a altura média (m);  $N$  é o número de árvores ( $ha^{-1}$ );  $G$  é a área basal ( $m^2ha^{-1}$ );  $e$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são parâmetros.

Para formulação dos Dendrogramas foi observada a seguinte sequência:

- Seleção da equação de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio;
- Determinação dos Índices de Densidade do Povoamento para um intervalo de classes de 200 árvores e com diâmetro de referência de 10cm;
- Determinação das variáveis do dendrograma definidas por: diâmetro médio, volume médio, área basal, volume por hectare e peso de casca verde por hectare;
- A estimativa do volume médio e peso de casca verde foi obtida por equação anteriormente selecionada;
- Determinação da área basal média por hectare ( $\bar{G}$ ) em relação ao diâmetro médio ( $\bar{d}$ ) e número de árvores por hectare ( $N$ ), em cada IDP, calculada por:

$$\bar{G} = \frac{\pi \cdot (\bar{d})^2}{4} \cdot N \quad (20)$$

- Estimativa do volume por hectare dos IDPs através do volume médio e número de árvores por hectare:

$$V = N \cdot \bar{v} \quad (21)$$

Em que:  $V$  é volume ( $m^3/ha$ );  $N$  é o número de árvores ( $ha$ );  $\bar{v}$  é o volume da árvore média ( $m^3$ ).

#### 4.4.3 Processamento dos dados

Os procedimentos estatísticos para o ajuste das regressões lineares e não-lineares foram realizados com o auxílio do *software* estatístico SAS (2004), com os procedimentos NLIN (método Gauss-Newton), MODEL e REG. Os gráficos foram gerados com o *software* “Microsoft Excel (2013)”.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 SELEÇÃO DO MODELO DE DENSIDADE DE ÁRVORES

Os dados de número de árvores por hectare e diâmetro quadrático médio são oriundos de parcelas permanentes, manejados em densidade completa. O resumo dos dados, incluindo a média e desvio padrão das variáveis utilizadas encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1- Resumo dos dados utilizados no estudo.

<b>Variáveis</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Valor Máximo</b>
Idade (ano)	4,6	2,24	2	9
Diâmetro (cm)	11,3	3,21	0,2	23,0
Altura (m)	13,1	3,13	1,5	24,9
Área basal (m <sup>2</sup> )	0,022	0,01	4,3E-6	0,042
Volume total com casca (m <sup>3</sup> )	0,243	0,11	4,3E-6	0,485
Volume comercial sem casca(m <sup>3</sup> )	0,208	0,09	3,4-6	0,415
Peso de casca verde (kg)	41,741	19,21	1,627	81,921
Peso de casca seca a 12 % de umidade(kg)	24,23	8,86	0,751	37,783
Número de árvores(ha)	5052	2196,19	2326	9513

Fonte: O autor, 2016.

### 4.2 DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DE VOLUME MÉDIO E PESO DE CASCA VERDE

#### 4.2.1 Determinação da equação de volume médio

Na representação do diagrama de manejo de densidade pelo volume, foi estudada uma equação a fim de estimar esta variável para a árvore média do povoamento, em função das variáveis que expressam densidade da população e crescimento. Para este objetivo foram testados cinco modelos volumétricos recomendados por Penner et al. (2004). As equações para descrever a relação

volume médio em função de variáveis que expressam a densidade da população e o crescimento (equações 15 a 19), apresentaram bom ajuste e precisão (Tabela 2). Dentre os modelos, o número 3 foi o que apresentou o maior coeficiente de determinação ajustado, um baixo erro padrão da estimativa e um baixo coeficiente de variação.

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos das equações de volume médio testadas para *Acacia mearnsii* De Wild.

Equação	Coeficientes			R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	S <sub>yx</sub>	CV%	F
	$\hat{b}_0$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$				
1	6,63799	-0,00024629	-	0,8160	0,19229	3,44188	138,48
2	-13,00257	1,34235	3,27864	0,9903	0,04415	0,79020	1583,73
3	2,34871	-0,30654	1,65879	0,9939	0,03510	0,62823	2514,08
4	-812,1000	492,000	0,1641	0,9217	26,9579	0,34567	183,56
5	1,01079	-0,61696	2,29041	0,9777	0,06688	1,19705	681,95

Em que: R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação ajustado; S<sub>yx</sub>= erro padrão da estimativa; CV%= coeficiente de variação em %; F= valor de F da análise de variância; b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>= coeficientes.

Fonte: O autor, 2016.

O modelo também apresentou a melhor distribuição de resíduos quando comparado aos demais. Dessa forma, o volume médio das árvores passou a ser estimado como uma função do número de árvores por hectare e da área basal por hectare do povoamento.

Em estudos com *A. angustifolia*, Loureiro (2013) também encontrou o mesmo modelo (equação 3) como o mais eficiente para a construção de dendrogramas.

#### 4.2.2 Determinação da equação de peso de casca verde médio

A análise das estatísticas de ajuste e precisão das equações para peso de casca verde (equações 15 a 19), mostrou, novamente o modelo 3 como o mais adequado por apresentar um excelente ajuste e um baixo erro padrão da estimativa (Tabela 3).



Tabela 3 - Parâmetros estatísticos das equações de peso de casca verde testadas para *Acacia mearnsii* De Wild.

Equação	Coeficientes			$R^2_{aj.}$	$S_{yx}$	CV%	F
	$\hat{b}_0$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$				
1	11,48208	-0,00016469	-	0,7890	0,13993	1,29815	116,93
2	-1,19120	0,85498	2,14551	0,9637	0,05802	0,53829	412,77
3	8,77933	-0,21939	1,09603	0,9722	0,05075	0,47079	544,06
4	-40559,5	23658,6	0,2727	0,8799	4515,5	0,79178	114,53
5	7,77510	-0,25150	1,36982	0,9452	0,07132	0,66163	268,31

Em que:  $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado;  $S_{yx}$ = erro padrão da estimativa; CV%= coeficiente de variação em %; F= valor de F da análise de variância;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ = coeficientes.

Fonte: O autor, 2016.

O modelo teve todos os coeficientes significantes e apresentou a melhor distribuição de resíduos, quando comparado aos demais.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DO MODELO DE DENSIDADE POPULACIONAL PELO DIÂMETRO

As equações de densidade e diâmetro de autodesbaste de Reineke (1933), Yoda et al. (1963), Zeide (1995) e Tang et al. (1994) (Tabela 4), ajustadas com os dados de número de árvores por hectare e diâmetro quadrático médio observados nas parcelas permanentes estudadas, mostraram bom ajuste e precisão, com um coeficiente de determinação ajustado maior que 90% e coeficiente de variação de 1%.

Importante observar que o coeficiente angular encontrado para o modelo de Reineke (1933) foi de -1,8533 (Tabela 4), diferentemente do coeficiente angular proposto por este autor (-1,605), determinado para a relação entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio em povoamentos não desbastados para todas as espécies.

O coeficiente angular de -3/2 proposto por Tang et al. (1994) para todas as situações de manejo e intervenções silviculturais também diferiu dos resultados obtidos no estudo.

Tabela 4 - Resultados estatísticos dos modelos de densidade-diâmetro e de autodesbaste ajustados.

Nº	Modelos	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	S <sub>yx</sub>	CV%
1	$\ln(N) = 12,37326 - 1,85333 * \ln(\bar{d})$	0,93	0,0884	1,061
2	$\ln(N) = 8,75351 + 1,54158 * \ln(\bar{d}) - 0,79032 * (\ln \bar{d})^2$	0,94	0,0856	1,026
3	$\ln(N) = 13,39241 - 2,69719 * \ln(\bar{d}) + 0,02660 * \bar{h} * \ln(\bar{d})$	0,94	0,0866	1,038
4	$\ln(N) = \ln 3322,5 \left( \frac{1}{4,8635} \right) \ln \left[ \left( \frac{\bar{d}}{10} \right)^{2,0908 * 4,8635} + \left( \frac{3322,5}{N} \right) \right]$	0,99	0,0889	1,067

Em que: N = número de árvores por hectare;  $\bar{d}$  = diâmetro médio (cm);  $\bar{h}$  = altura média (m).  
 Fonte: O autor, 2016.

Entre os resultados obtidos, o modelo de Tang (4) foi o selecionado devido a performance estatística, e por apresentar, entre os modelos testados, a melhor distribuição de resíduos, embora a soma dos escores (Tabela 5) o tenha classificado em 3º lugar. Apesar da boa performance estatística, o modelo de Yoda (2) foi descartado, pois não descreve a mortalidade do povoamento na fase inicial.

A valoração das somas dos escores estatísticos confirmam o modelo de Tang como sendo o que melhor descreveu a densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio em povoamentos não desbastados e superestocados.

Tabela 5 - Estatística para seleção dos modelos de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio.

Estatísticas	Modelo de densidade de árvore			
	Reineke (1)	Yoda (2)	Zeide (3)	Tang (4)
Tendência (Bias)	0,0073 (4)	0,0065 (1)	0,0067 (2)	0,0071 (3)
Eficiência (E)	0,9383 (4)	0,9444 (1)	0,9431 (2)	0,9400 (3)
Desvio padrão residual relativo (S%)	34,93 (1)	34,93 (1)	34,93 (1)	34,93 (1)
Desvio médio relativo (D%)	-0,0110 (4)	-0,0094 (2)	-0,0102 (3)	0,0076 (1)
Qui-quadrado ( $\chi^2$ )	-0,0245 (4)	-0,0219 (1)	-0,0227 (2)	-0,0236 (3)
<b>Soma dos escores (VP)</b>	<b>(17)</b>	<b>(6)</b>	<b>(10)</b>	<b>(11)</b>

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

Fonte: O autor, 2016.

O modelo de Tang também foi o utilizado por Schneider (2008b) em estudos com *Pinus taeda* e por Loureiro (2013) em pesquisas com *Araucaria angustifolia* por melhor descrever a relação densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio.

Os modelos de densidade-diâmetro e autodesbaste utilizados, permitiram estimar a densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, compreendidos entre 5 a 15cm. Todos os modelos ajustados apresentaram valores distintos de número de árvores por hectare por diâmetro médio.

Os modelos de Reineke (1) e Zeide (3) apresentaram valores extremos de densidade de árvores por hectare por diâmetro médio, caracterizando por superestimar a densidade nas menores e maiores classes de diâmetro quando comparados a equação de Tang (4) (Tabela 6).

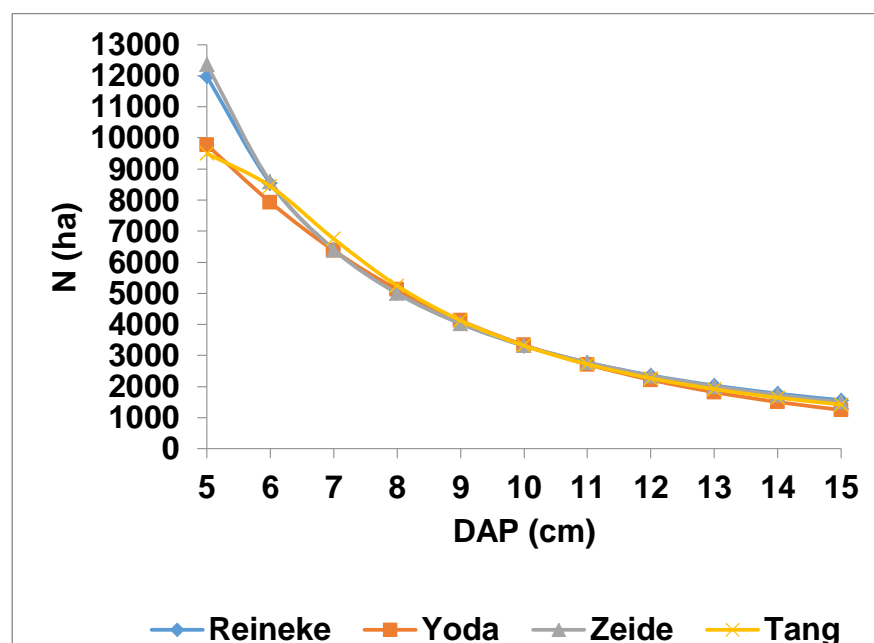
Tabela 6 - Valores estimados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade de árvores.

DAP (cm)	Modelos de densidade de árvores por hectare			
	Reineke (1)	Yoda (2)	Zeide (3)	Tang (4)
5	11973	9773	12359	9500
6	8540	7930	8592	8443
7	6418	6378	6404	6753
8	5011	5124	4999	5245
9	4028	4127	4027	4129
10	3314	3337	3317	3319
11	2777	2713	2776	2721
12	2364	2218	2352	2269
13	2038	1823	2011	1920
14	1776	1507	1731	1644
15	1563	1252	1500	1423

Fonte: O autor, 2016.

Os valores estimados pelos modelos de Yoda (2) e Tang (4) foram próximos aos observados, porém o modelo de Yoda (2) tendeu a subestimar valores nas maiores classes de diâmetro e superestimar nas menores classes diamétricas. Essas diferenças de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, obtidas entre os modelos encontram-se representadas a seguir (Figura 5).

Figura 5 - Valores estimados de densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio para os modelos de densidade-diâmetro ajustados.



Fonte: O autor, 2016.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DO AUTODESBASTE

Partindo da equação proposta por Tang et al. (1994), que expressa a densidade das árvores por hectare em função do diâmetro médio (modelo 4), foi definida a linha de autodesbaste, utilizando como parâmetros:

$$\ln(N) = \ln 3322,5 - \left(\frac{1}{4,8635}\right) \ln \left[ (d/10)^{2,0908 \times 4,8635} + (3322,5/N_1)^{4,8635} - (d_1/10)^{2,0908 \times 4,8635} \right] \quad (22)$$

Que representa o ponto máximo de tolerância fisiológica das árvores para sobreviver na população, em determinado local, iniciando assim o autodesbaste.

Definidos os diferentes espaçamentos utilizados no momento do plantio e, tomando como ponto de partida a densidade máxima de árvores por hectare no momento da implantação do povoamento, foi possível gerar os parâmetros estatísticos do modelo de autodesbaste de Tang (Tabela 7).

Tabela 7 - Parâmetros do modelo de densidade-diâmetro de Tang ajustado por espaçamento.

Parâmetros	Densidade Máxima						
	10000 1m <sup>2</sup>	5000 2m <sup>2</sup>	3333 3m <sup>2</sup>	2500 4m <sup>2</sup>	2000 5m <sup>2</sup>	1666 6m <sup>2</sup>	7519 7m <sup>2</sup>
<b>sf</b>	3322,5	3322,5	3322,5	3322,5	3322,5	3322,5	3322,5
<b>β</b>	2,0908	2,0908	2,0908	2,0908	2,0908	2,0908	2,0908
<b>γ</b>	4,8635	4,8635	4,8635	4,8635	4,8635	4,8635	4,8635
<b>n</b>	10000	5000	3333	2500	2000	1666	7519

Fonte: O autor, 2016.

Com os parâmetros calculados para o modelo de Tang, foram geradas as densidades de árvores por hectare (Tabela 8), geradas com a substituição do número de árvores iniciais por hectare, correspondente ao espaçamento inicial simulado, e os demais coeficientes determinados para as máximas densidades.

Tabela 8 - Densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, através dos modelos de densidade e diâmetro de Tang, com variação do espaçamento.

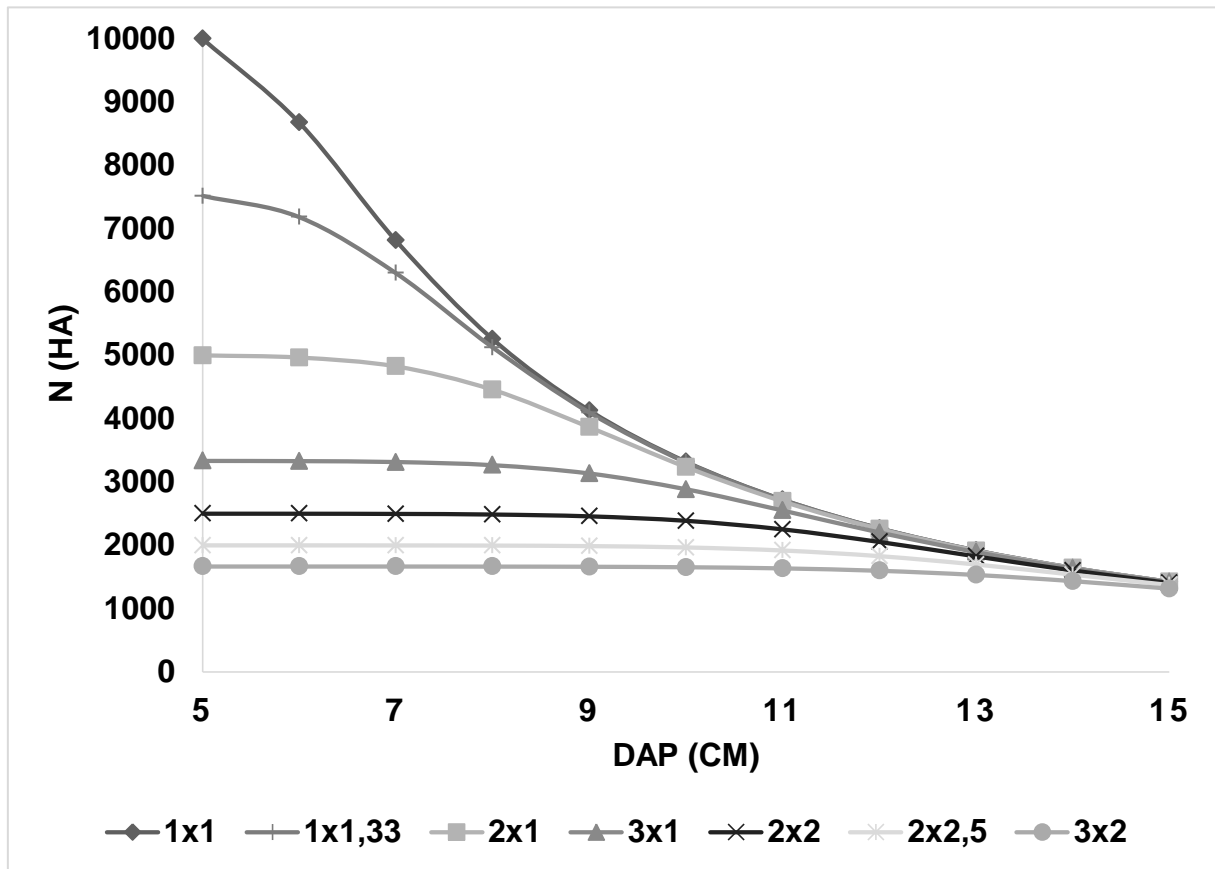
DAP (cm)	Espaçamento (m)						
	1x1	2x1	3x1	2x2	2x2,5	3x2	1x1,33
5	10000	5000	3333	2500	2000	1666	7519
6	8677	4966	3330	2499	2000	1666	7184
7	6812	4826	3316	2497	1999	1666	6299
8	5258	4457	3266	2487	1996	1665	5126
9	4132	3866	3135	2458	1988	1662	4098
10	3320	3236	2886	2388	1967	1654	3310
11	2721	2694	2550	2252	1919	1636	2718
12	2269	2260	2204	2054	1830	1599	2268
13	1920	1916	1894	1826	1697	1532	1919
14	1644	1643	1633	1603	1538	1435	1644
15	1423	1423	1419	1405	1373	1316	1423

Fonte: O autor, 2016.

Com a construção das curvas de densidade de árvores por hectare foi possível observar o momento do início do autodesbaste, que ocorre com a supressão de indivíduos da população, variando com a densidade de árvores plantadas (Figura 6).

O início do autodesbaste, nas respectivas curvas, representado pelo forte aumento na redução no número de árvores, ocorreu numa dimensão de diâmetro médio diretamente proporcional à densidade de árvores de plantio, ou seja, a existência de um espaçamento inicial maior indica um maior diâmetro médio ocorrendo mais tardiamente o autodesbaste na população.

Figura 6 - Tendência da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio em diferentes espaçamentos de implantação do povoamento.

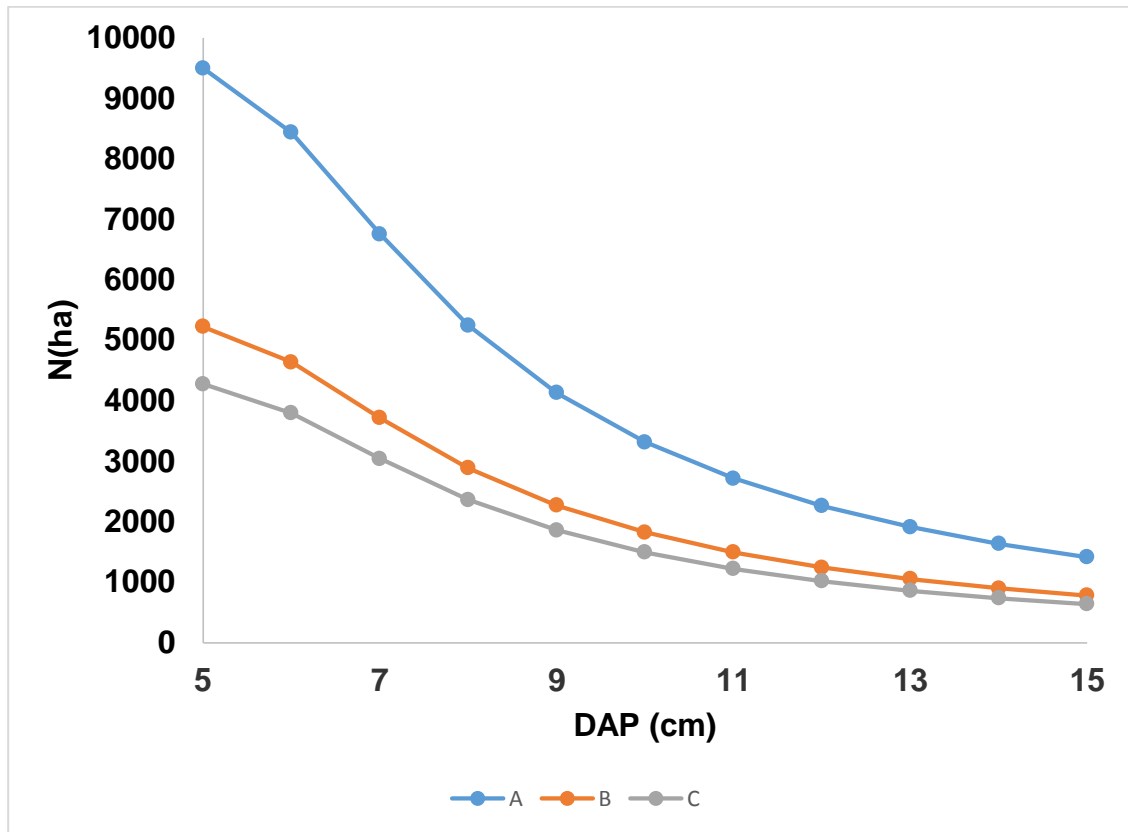


Fonte: O autor, 2016.

Os resultados confirmaram que a mortalidade ocorreu primeiro nos espaçamentos mais adensados do que naqueles mais amplos, devido à menor competição.

A partir deste resultado, foi possível determinar a linha de máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, bem como as linhas que delimitam as zonas das diferentes fases da concorrência durante o desenvolvimento da população (Figura 7), com a linha B definida como 50% do valor estimado pela linha A, de máxima densidade, e a linha C em 45% desta, descrevendo, respectivamente, o início da mortalidade e de máxima produção, segundo a metodologia de Saunders e Puettmann (2000), Schneider (2008b) e Harrington (1997).

Figura 7 - Limites das fases de concorrência entre indivíduos em densidade de árvores por diâmetro médio.



Fonte: O autor, 2016.

#### 4.5 ÍNDICES DE DENSIDADE DO POVOAMENTO

O Diagrama de Manejo da Densidade foi gerado com 6 Índices de Densidade do Povoamento (IDPs), cobrindo uma amplitude de 2400, 2200, 2000, 1800, 1600 e 1400 árvores para um diâmetro de referência de 10cm, suficiente para cobrir a amplitude dos dados observados em todas as classe de diâmetros. Os valores obtidos para os 6 IDPs tomando como referência a curva descrita pelo modelo selecionado (Tang, que descreveu a densidade máxima) estão relacionados em base logarítmica (Tabela 9).



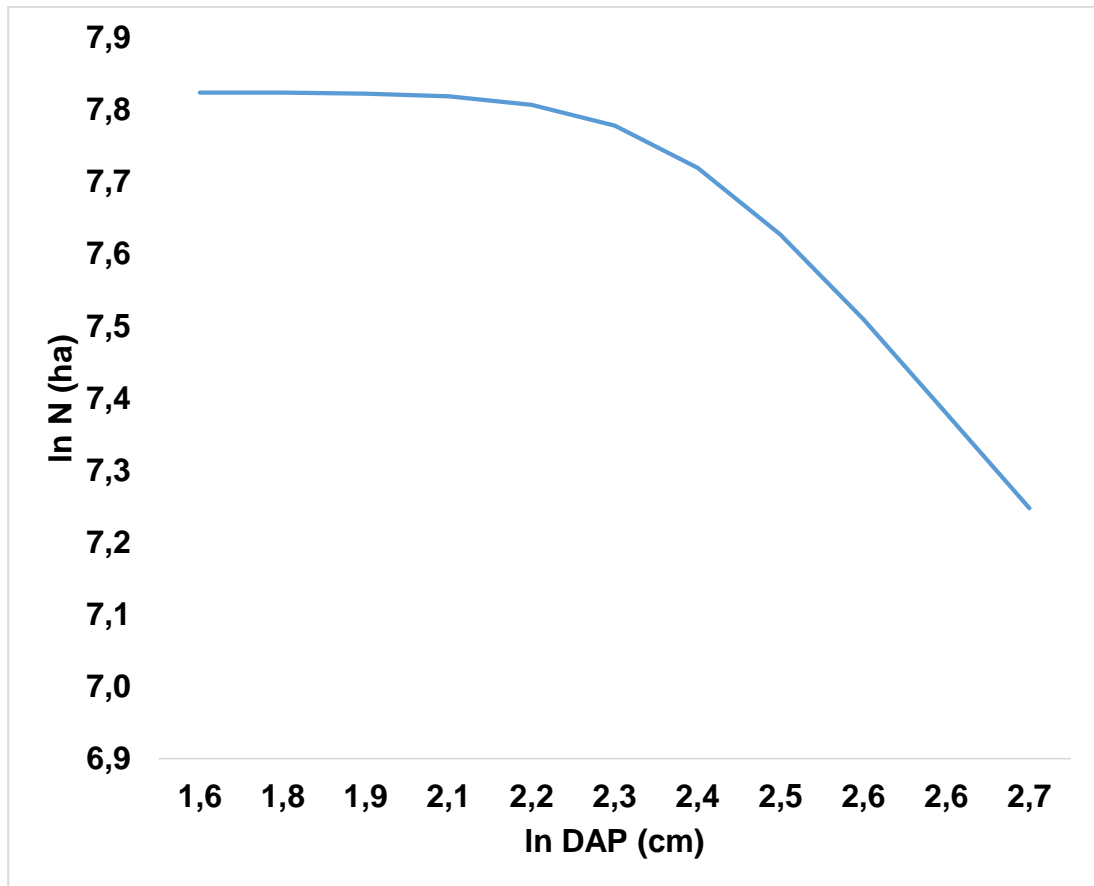
Tabela 9 - Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio (unidade logarítmica) e Índices de Densidade do Povoamento.

DAP(cm)	ln(DAP)	Densidade Máxima	Índices de Densidade do Povoamento					
			2400	2200	2000	1800	1600	1400
5	1,6094	7,8240	7,8189	7,8137	7,8085	7,8034	7,7982	7,7931
6	1,7918	7,8238	7,8186	7,8135	7,8083	7,8031	7,7980	7,7928
7	1,9459	7,8227	7,8176	7,8124	7,8072	7,8021	7,7969	7,7917
8	2,0794	7,8188	7,8137	7,8085	7,8033	7,7982	7,7930	7,7879
9	2,1972	7,8071	7,8020	7,7968	7,7917	7,7865	7,7814	7,7762
10	2,3026	7,7781	7,7729	7,7678	7,7627	7,7575	7,7524	7,7473
11	2,3979	7,7198	7,7146	7,7095	7,7044	7,6994	7,6943	7,6892
12	2,4849	7,6275	7,6225	7,6174	7,6124	7,6074	7,6023	7,5973
13	2,5649	7,5097	7,5047	7,4998	7,4948	7,4899	7,4849	7,4799
14	2,6391	7,3798	7,3749	7,3700	7,3652	7,3603	7,3554	7,3506
15	2,7081	7,2479	7,2431	7,2383	7,2335	7,2287	7,2239	7,2192

Fonte: O autor, 2016.

Com o número máximo de árvores por hectare por diâmetro médio gerado na equação de Tang, foi construída a linha do índice de máxima densidade populacional, que ocorreu a partir do início da supressão dos indivíduos pela mortalidade (Figura 8).

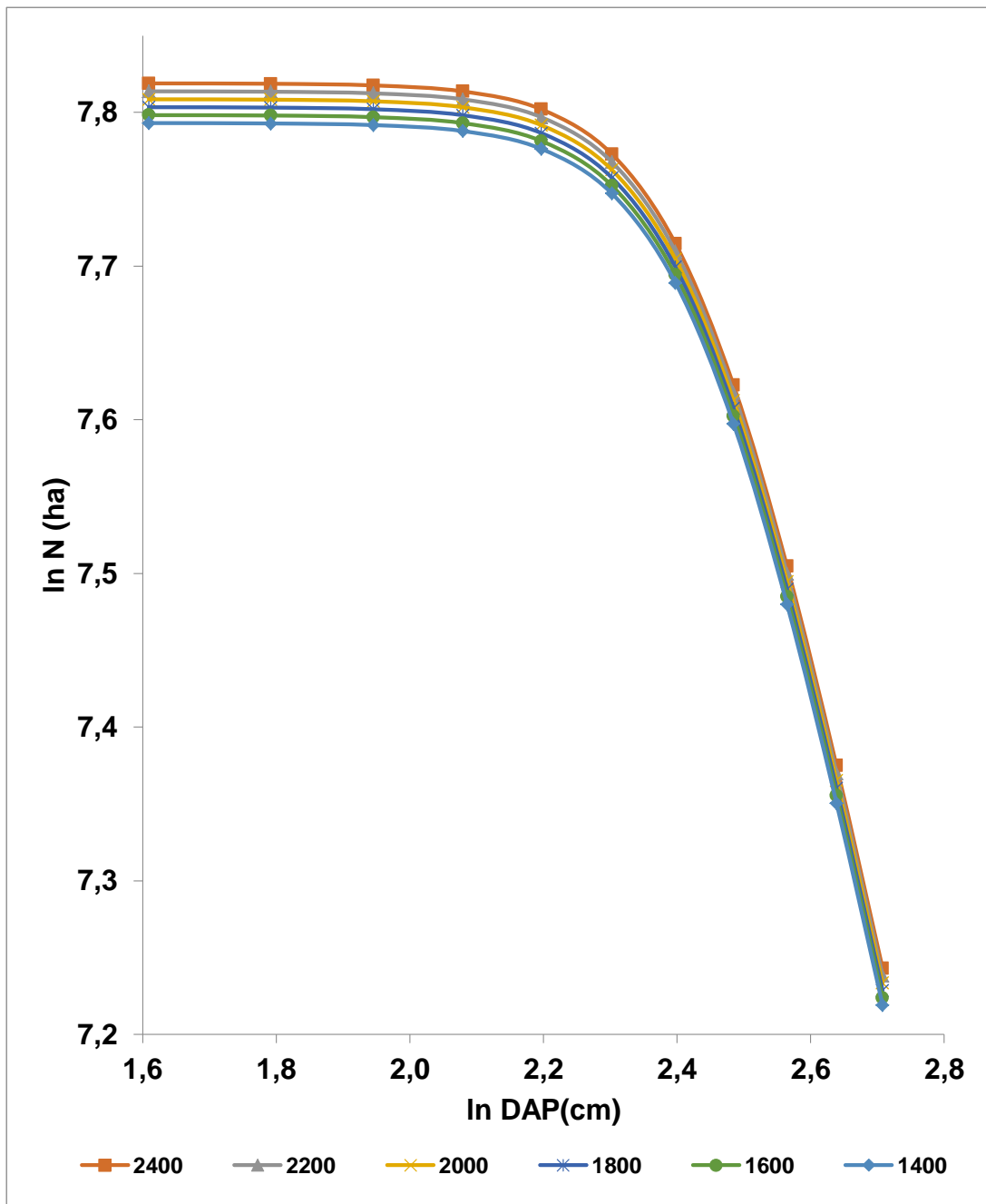
Figura 8 - Linha de máxima densidade de árvores por hectare por diâmetro médio em unidade logarítmica.



Fonte: O autor, 2016.

A linha de máxima densidade, expressa pelo modelo, corresponde ao início da supressão dos indivíduos pela mortalidade, apresentando um comportamento de uma população superestocada (Figura 9).

Figura 9 - Índice de Densidade de Povoamento representando a densidade de árvores por hectare por diâmetro médio (unidade logarítmica).



Fonte: O autor, 2016.

Observando a Figura 9, tem-se a falsa impressão da sobreposição das linhas dos 6 IDPs a partir dos diâmetros intermediários, que se deve a escala logarítmica da figura.

O número de IDPs calculados é dependente da variação de densidade encontrada nos dados observados na amplitude das classes de diâmetro. Em

estudos com *P. taeda*, Schneider (2008b) calculou 5 IDP com intervalo de classe de 200, variando de um valor mínimo de 600 a um máximo de 1400, Thomas (2009) determinou 9 IDP em intervalos de classe de 200 com variação de 400 a 1200 para povoamentos de *P. elliotii*.

#### 4.5.1 Determinação dos IDPs em valor absoluto pelo diâmetro médio

A transformação exponencial dos valores da Tabela 9, permitiu obter em unidade aritmética o número de árvores por hectare nos 6 IDPs (Tabela 10), onde foi observado que as frequências por hectare decresciam de forma exponencial com o aumento do diâmetro, conforme a Figura 10, onde ficou suprimido o efeito da escala logarítmica que indicava a sobreposição das curvas de densidade.

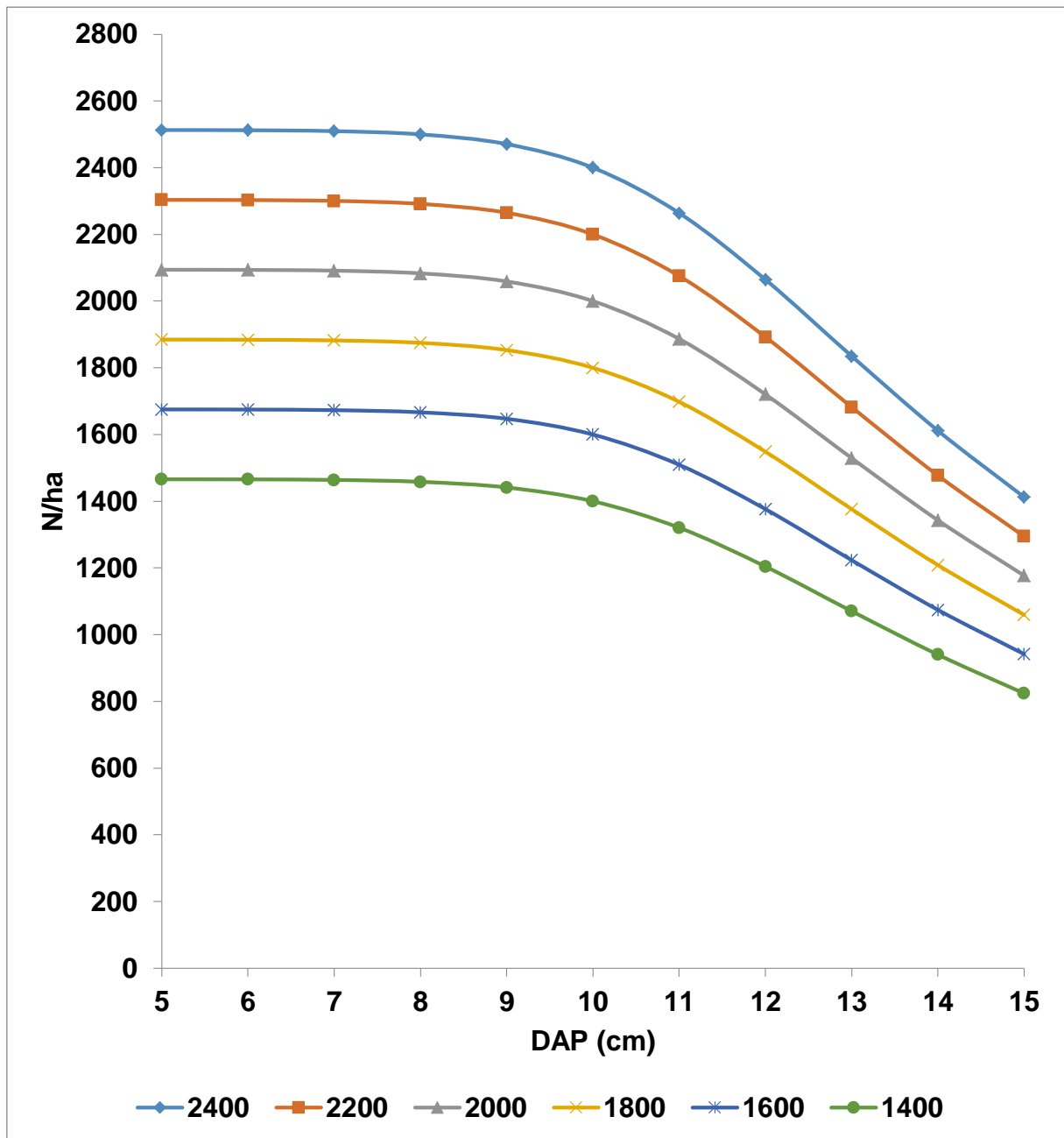
Tabela 10 - Densidade de árvores por hectare por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.

DAP (cm)	Máxima	Índices de Densidade do Povoamento					
		2400	2200	2000	1800	1600	1400
5	2500	2513	2303	2094	1885	1675	1466
6	2499	2512	2303	2094	1884	1675	1466
7	2497	2510	2300	2091	1882	1673	1464
8	2487	2500	2291	2083	1875	1667	1458
9	2458	2471	2265	2059	1853	1647	1441
10	2388	2400	2200	2000	1800	1600	1400
11	2252	2264	2075	1887	1698	1509	1321
12	2054	2065	1892	1720	1548	1376	1204
13	1826	1835	1682	1529	1376	1223	1070
14	1603	1612	1477	1343	1209	1074	940
15	1405	1412	1295	1177	1059	942	824

Fonte: O autor, 2016.

O valor nominal que define o IDP, por exemplo 2400, representa o número de árvores existentes no povoamento ao atingir o diâmetro de referência 10cm. Assim como, o IDP 2200 representa o número de árvores a ser encontrado nesse diâmetro de referência.

Figura 10 - Índice de Densidade do Povoamento com representação da densidade de árvores por hectare por diâmetro médio.



Fonte: O autor, 2016.

A densidade de árvores por hectare diminui com o aumento do DAP. Esta redução será proporcionalmente maior quanto maior for o IDP, pois representa povoamentos de maior densidade onde a mortalidade se estabelece mais cedo e em maior intensidade do que em povoamentos menos densos.

#### 4.5.2 Determinação da área basal por diâmetro médio e índice de densidade do povoamento

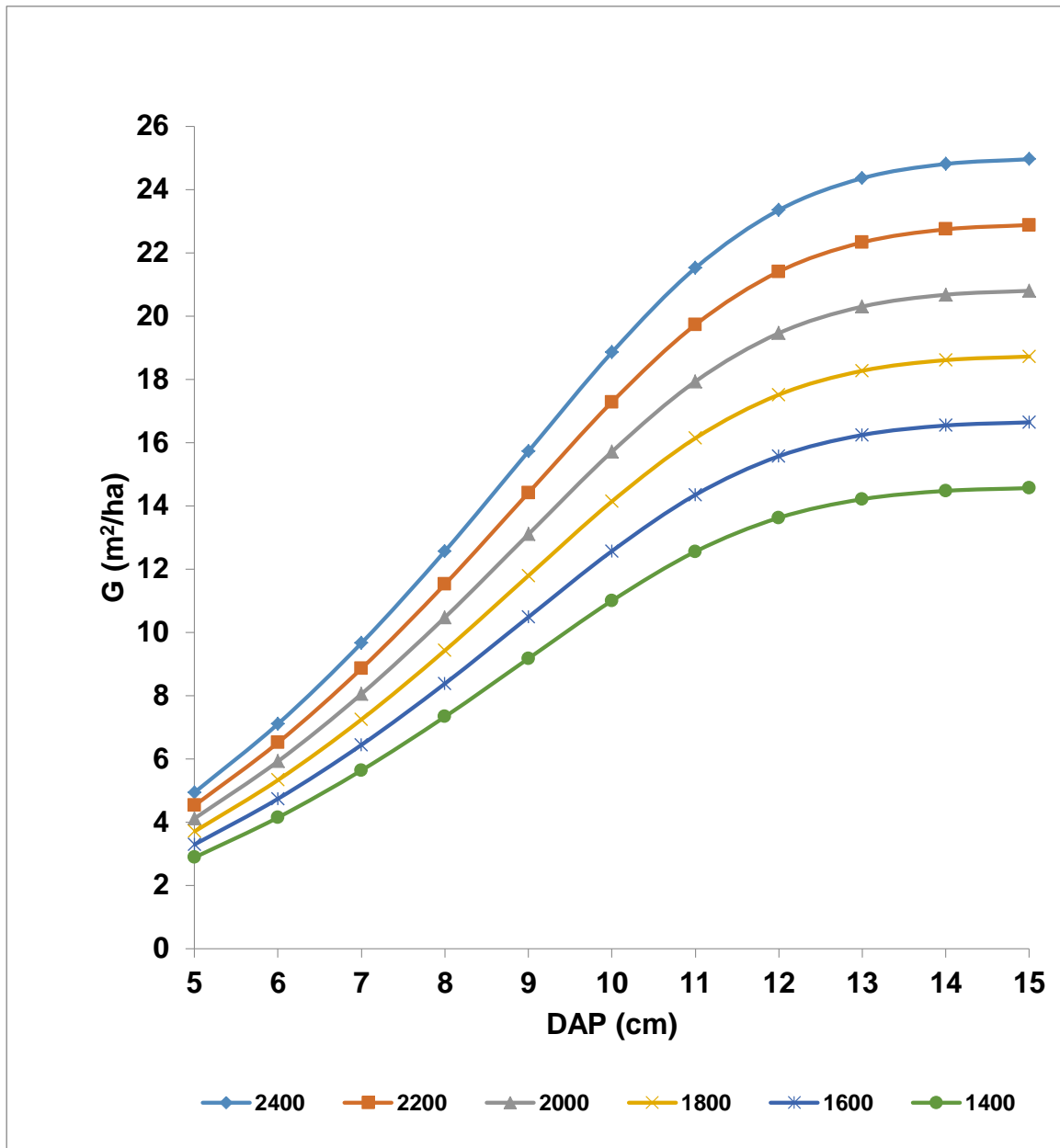
A determinação da área basal por hectare a partir da relação da área basal individual e o número de árvores (Tabela 11), serviu de base para a formulação do DMD da área basal. Os valores obtidos agrupados na Tabela 11 e Figura 11, descrevem uma tendência de paralelismo entre os IDPs para a amplitude de diâmetro entre 5 e 15cm.

Tabela 11 - Área basal (m<sup>2</sup>/ha) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento					
	2400	2200	2000	1800	1600	1400
5	4,9	4,5	4,1	3,7	3,2	2,8
6	7,1	6,5	5,9	5,3	4,7	4,1
7	9,6	8,8	8,0	7,2	6,4	5,6
8	12,5	11,5	10,4	9,4	8,3	7,3
9	15,7	14,4	13,0	11,7	10,4	9,1
10	18,8	17,2	15,7	14,1	12,5	10,9
11	21,5	19,7	17,9	16,1	14,3	12,5
12	23,3	21,4	19,4	17,5	15,5	13,6
13	24,3	22,3	20,2	18,2	16,2	14,2
14	24,8	22,7	20,6	18,6	16,5	14,4
15	24,9	22,8	20,7	18,7	16,6	14,5

Fonte: O autor, 2016.

Figura 11 - Área basal por hectare em função do diâmetro médio e por Índice da Densidade do Povoamento.



Fonte: O autor, 2016.

#### 4.5.3 Determinação do volume por índice de densidade do povoamento

O DMD para a variável volume, foi gerado a partir dos dados de densidade de árvores por hectare e índice de densidade do povoamento a partir do volume da árvore individual (Tabela 12) obtido pela função:

$$\bar{v} = \exp(b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G) \quad (23)$$

Tabela 12 - Volume (m<sup>3</sup>/ha) por diâmetro médio e Índice de densidade do povoamento.

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento					
	2400	2200	2000	1800	1600	1400
5	13,4	11,9	10,5	9,1	7,8	6,5
6	24,6	21,8	19,2	16,6	14,2	11,8
7	40,9	36,4	32,0	27,7	23,6	19,7
8	63,3	56,3	49,5	42,9	36,6	30,6
9	92,2	81,9	72,0	62,5	53,3	44,5
10	125,7	111,7	98,2	85,2	72,6	60,6
11	159,4	141,7	124,5	108,0	92,1	76,9
12	187,7	166,9	146,7	127,2	108,5	90,6
13	208,8	185,6	163,2	141,5	120,7	100,7
14	224,0	199,1	175,0	151,8	129,4	108,1
15	235,6	209,4	184,1	159,6	136,1	113,7

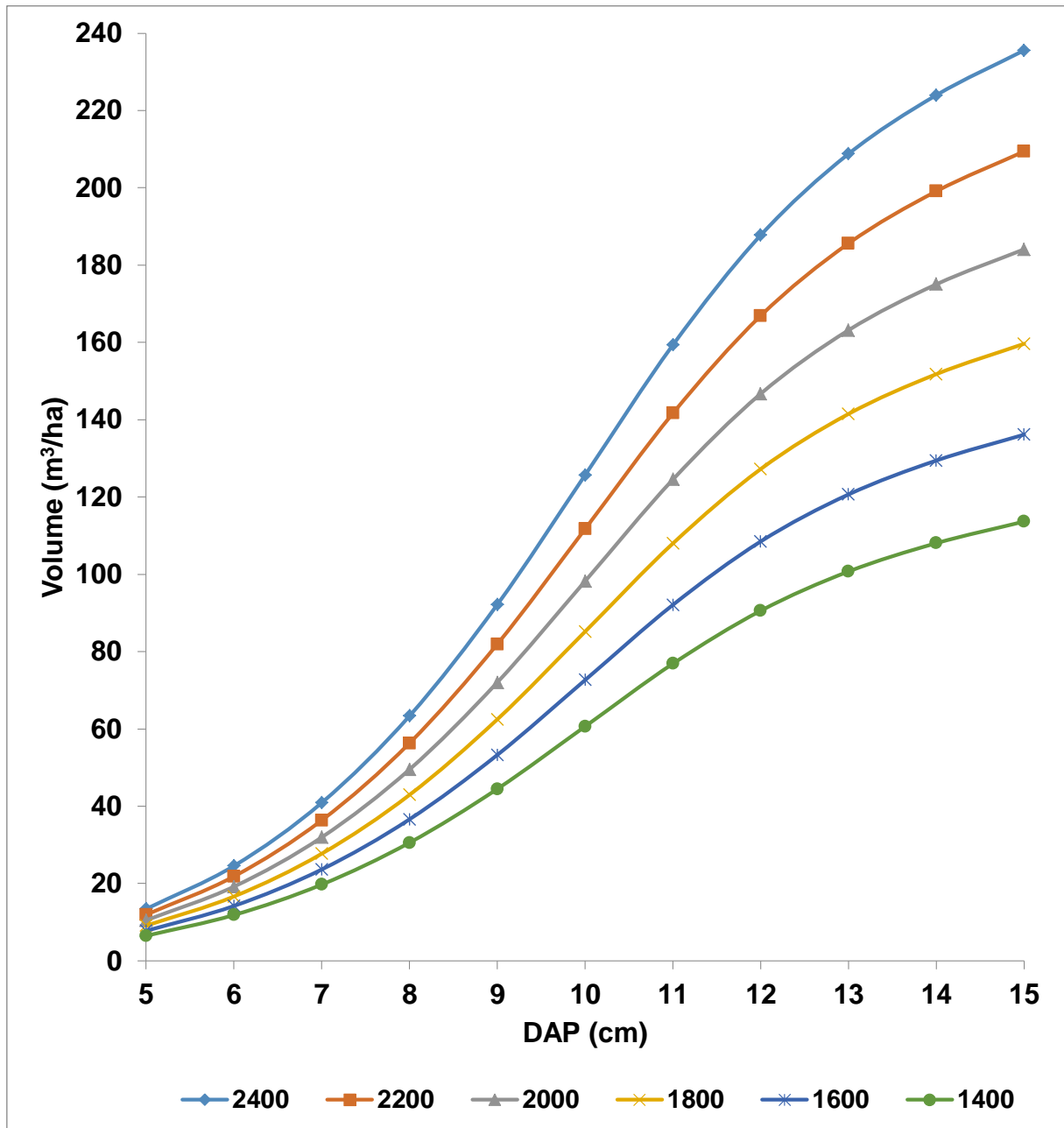
Fonte: O autor, 2016.

Em consequência da não realização de desbastes em povoamentos de acácia-negra, a mortalidade tende a aumentar a partir de um determinado momento, aproximando-se da linha A (intensa mortalidade de árvores). Em situações de manejo de densidade completa, a idade de corte final, deverá ser definida no instante em que a densidade de árvores do povoamento atingir ou aproximar da linha B.

A ocorrência das maiores produções volumétricas por hectare nos maiores Índices de Densidade de Povoamento foram descritas por Schneider (2008b) e confirmadas para o volume por diâmetro médio em povoamentos de *Acacia mearnsii* (Figura 12).



Figura 12 - Volume ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) em função do diâmetro médio e por índice de densidade do povoamento.



Fonte: O autor, 2016.

Assim como observado no desenvolvimento da área basal nos IDPs calculados, os maiores volumes foram encontrados nos povoamentos descritos pelos maiores IDPs. Embora a mortalidade tenha sido mais acentuada e mais precoce nos maiores IDPs (Figura 12), os maiores volumes por hectare foram encontrados nos maiores índices.

Este resultado demonstra que a maior mortalidade de árvores nos maiores IDPs não foi suficientemente intensa para reduzir o volume das árvores em pé até o diâmetro médio de 15cm, sendo esperado uma mudança nessa tendência em diâmetros superiores, quando a mortalidade deverá se intensificar no povoamento.

#### 4.5.4 Determinação do peso de casca verde por índice de densidade do povoamento

O peso de casca verde estimado em função do diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento calculados pela equação:

$$\bar{p}v = \exp(b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G) \quad (24)$$

que possibilitou a quantificação do peso de casca verde em kg por hectare (Tabela 13) e graficamente na Figura 13.

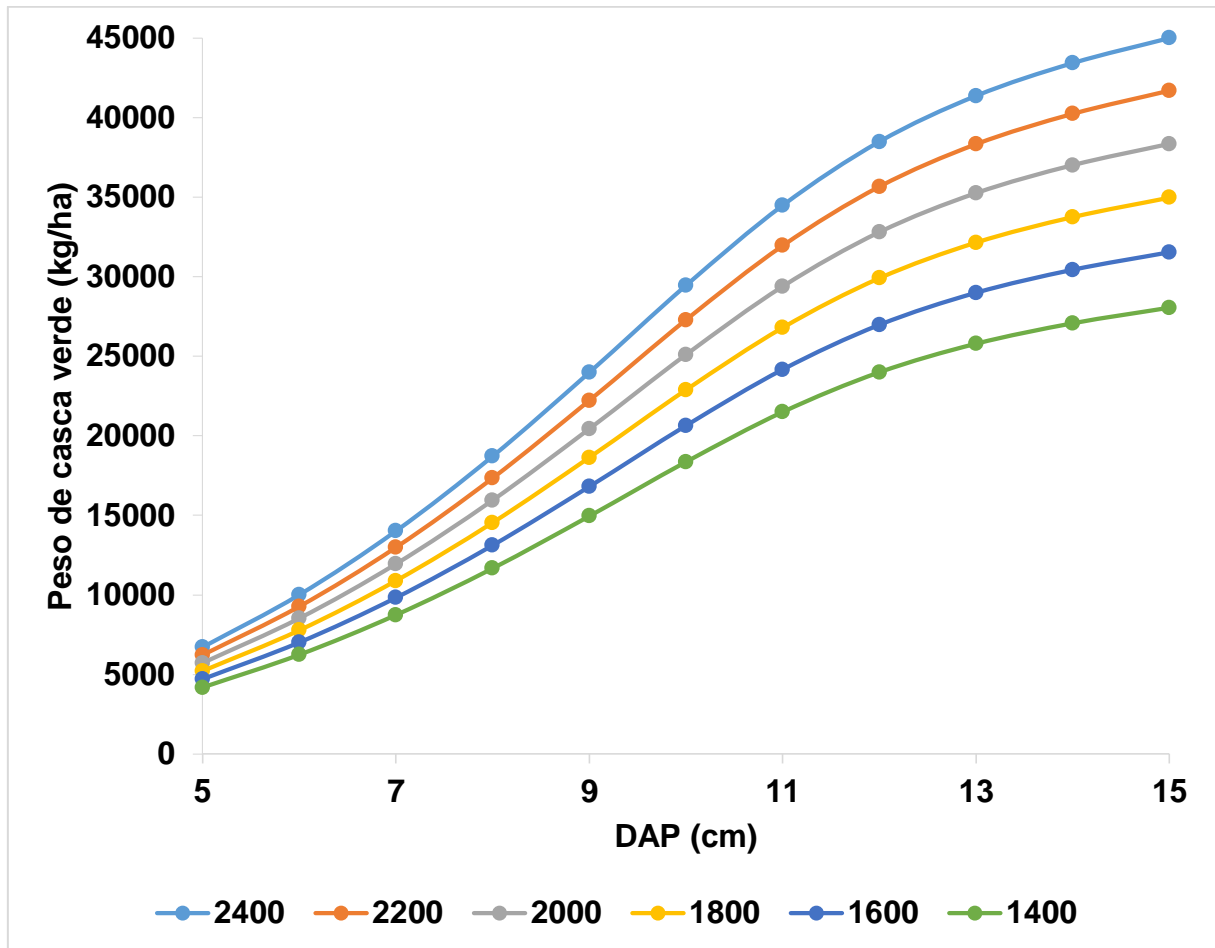
Tabela 13 - Peso de casca verde (kg/ha) por diâmetro médio e índice de densidade do povoamento.

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento					
	2400	2200	2000	1800	1600	1400
5	6708,3	6215,6	5717,4	5212,9	4701,5	4182,2
6	10002,0	9267,5	8524,6	7772,5	7010,0	6235,6
7	14009,7	12980,8	11940,3	10886,8	9818,8	8734,2
8	18709,6	17335,6	15946,0	14539,2	13112,8	11664,3
9	23974,4	22213,7	20433,1	18630,4	16802,7	14946,5
10	29443,2	27280,8	25094,1	22880,1	20635,5	18356,0
11	34475,8	31943,8	29383,3	26790,9	24162,7	21493,5
12	38479,8	35653,8	32795,9	29902,4	26968,9	23989,8
13	41359,5	38322,0	35250,2	32140,3	28987,2	25785,1
14	43418,5	40229,8	37005,1	33740,3	30430,3	27068,7
15	44990,7	41686,5	38345,0	34962,0	31532,2	28048,9

Fonte: O autor, 2016.

Da mesma forma que o volume, o peso de casca verde cresceu com o aumento do diâmetro e do IDP, não tendo até a presente dimensão de diâmetro médio sido observado sua redução decorrente da mortalidade.

Figura 13 - Peso de casca verde por hectare em função do diâmetro médio e índice de densidade do povoamento.



Fonte: O autor, 2016.

#### 4.5.5 Variação da relação do peso de casca verde pelo volume

A razão entre o peso de casca verde em toneladas pelo volume, ambos estimados para um diâmetro médio, mostrou para todos os IDPs a redução do índice com o aumento do diâmetro (Tabela 14), indicando que proporcionalmente é encontrado maior proporção de casca verde nos menores diâmetros médios.

Tabela 14 - Variação da relação do peso de casca verde (T/ha) pelo volume (m<sup>3</sup>).

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento					
	2400	2200	2000	1800	1600	1400
5	0,5000	0,5212	0,5453	0,5734	0,6064	0,6462
6	0,4073	0,4245	0,4442	0,4670	0,4940	0,5263
7	0,3426	0,3571	0,3737	0,3929	0,4155	0,4427
8	0,2954	0,3078	0,3221	0,3387	0,3582	0,3817
9	0,2601	0,2711	0,2837	0,2983	0,3155	0,3361
10	0,2343	0,2442	0,2555	0,2686	0,2841	0,3027
11	0,2163	0,2255	0,2359	0,2481	0,2624	0,2796
12	0,2050	0,2136	0,2235	0,2350	0,2486	0,2648
13	0,1981	0,2065	0,2160	0,2271	0,2402	0,2560
14	0,1939	0,2020	0,2114	0,2223	0,2351	0,2505
15	0,1910	0,1991	0,2083	0,2190	0,2316	0,2468

Fonte: O autor, 2016.

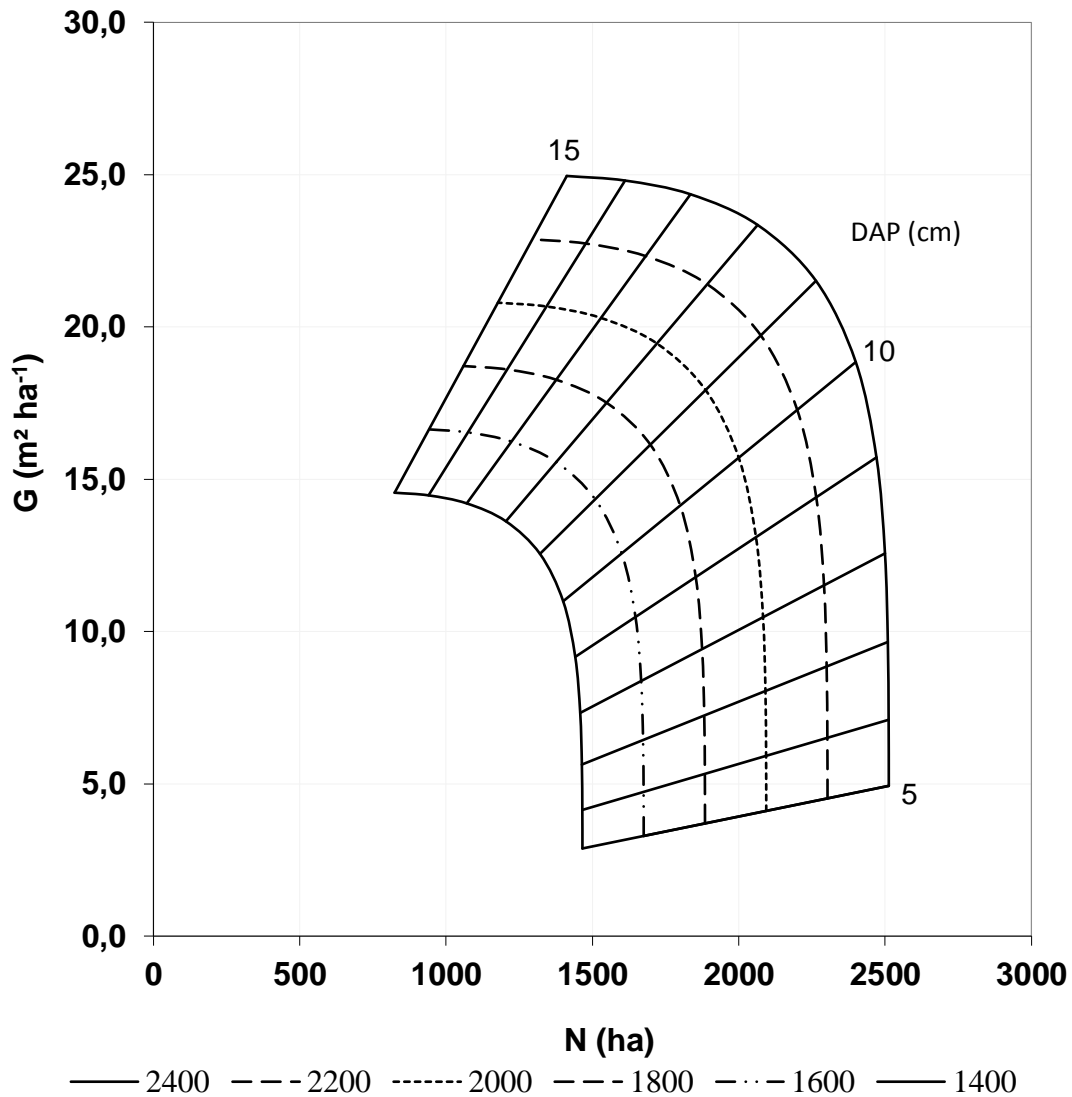
## 4.6 DIAGRAMAS DE MANEJO DA DENSIDADE

### 4.6.1 Construção dos Diagramas de Manejo da Densidade do Povoamento

Os dendrogramas foram construídos com duas variáveis de entrada: no eixo da abscissa encontra-se o número de árvores por hectare (N/ha) e no eixo da ordenada a variável de interesse (área basal por hectare (m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>), volume por hectare (m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>) e peso de casca verde por hectare (kg ha<sup>-1</sup>)). O diâmetro da árvore média (d) foi representado pelas linhas de orientação vertical inclinadas à direita; os IDPs foram representados pelas linhas curvas pontilhadas transversalmente.

A confecção do DMD possibilitou analisar a correspondência de cada IDP com sua respectiva área basal, número de árvores por hectare e diâmetro médio (Figura 14).

Figura 14 - Diagrama de Manejo da Densidade com variável área basal ( $\text{m}^2\text{ha}^{-1}$ ) para povoamentos de *Acacia mearnsii*.



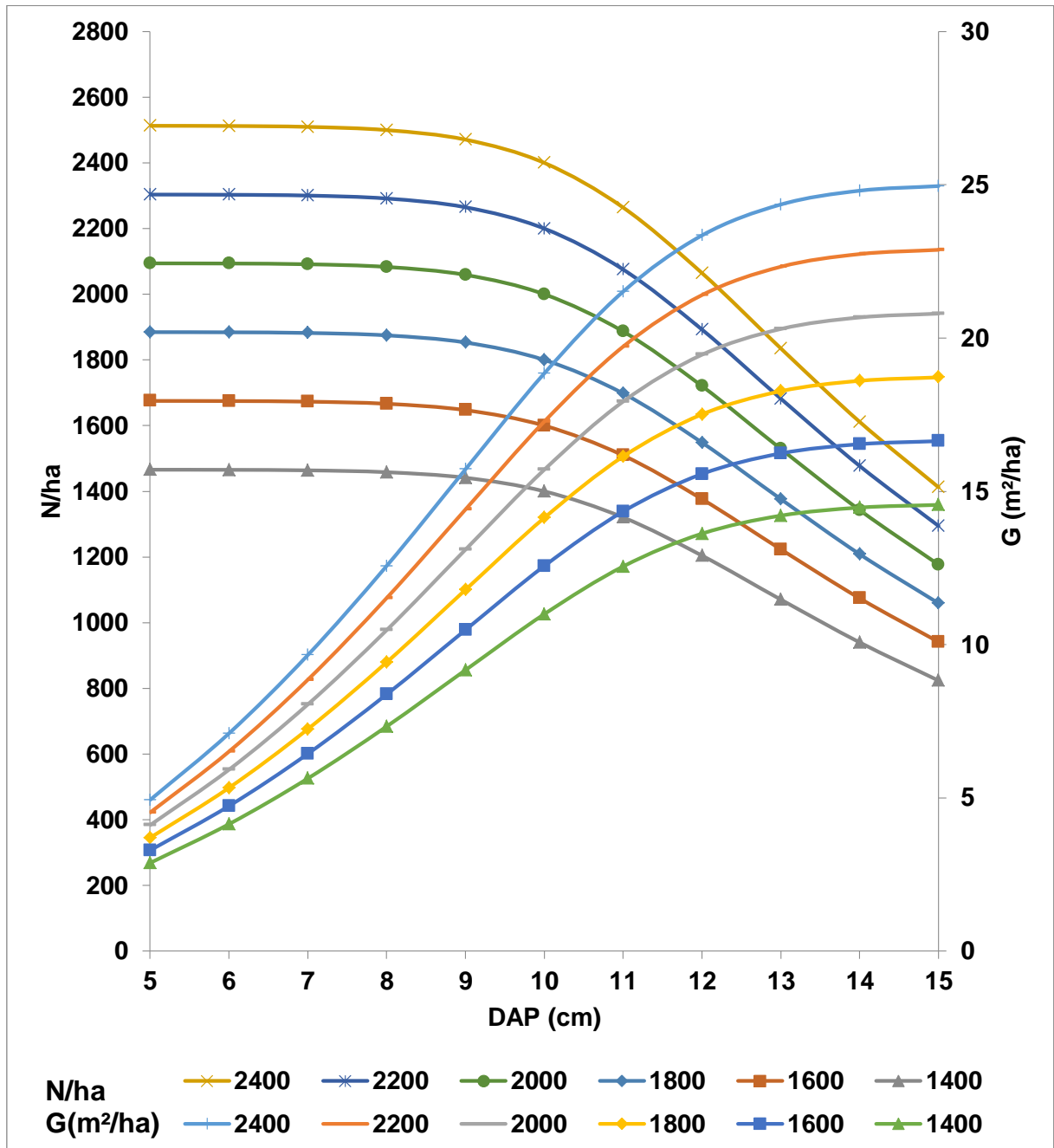
Fonte: O autor, 2016.

A utilização dos Diagramas de Manejo da Densidade é realizada conhecendo o número de árvores por hectare e o diâmetro médio da população alvo. Neste estudo, para um povoamento que apresenta um diâmetro médio de 5cm e 2.513 árvores por hectare no IDP 2400, sua área basal correspondente será de  $4,9\text{m}^2\text{ha}^{-1}$ .

Os diagramas de manejo de densidade são uma forma prática e eficiente de demonstrar a densidade populacional e também, são de grande importância na orientação para a intervenção de desbastes, se fosse o caso. O mesmo é uma

ferramenta de fácil entendimento e a densidade pode ser lida tanto em área basal, quanto em número de árvores (Figura 15).

Figura 15 - Diagrama de manejo da densidade por índice de densidade de povoamento (relação entre número de árvores e área basal com o diâmetro médio)

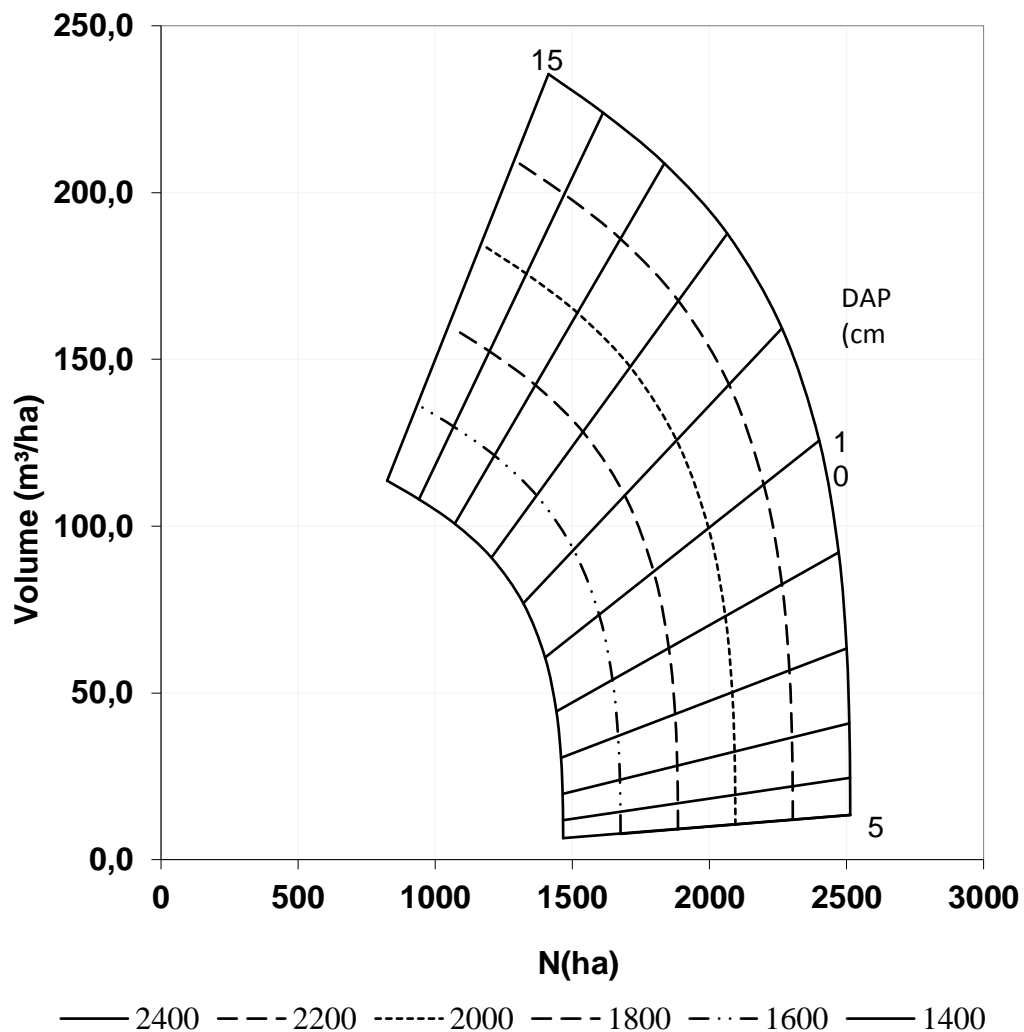


Fonte: O autor, 2016.

Fazendo uma analogia com povoamentos de araucária, Loureiro (2013) concluiu que no IDP 1400 o número máximo de árvores por hectare corresponde a 5.895, com um dg de 10cm, alcança uma área basal de  $46,3\text{m}^2\text{ha}^{-1}$ , valor este considerado baixo em níveis de produção quando foi comparado com diâmetros superiores (22 e 23cm) para o mesmo IDP representando 1.436 e 1.314 árvores por hectare e  $68,91\text{ m}^2/\text{ha}$  de área basal.

O dendrograma construído para o volume seguiu o mesmo princípio de utilização, porém tendo como variável resposta o volume por hectare para os povoamentos de acácia-negra (Figura 16). Como exemplo de aplicação, o IDP 2000 em um povoamento com diâmetro médio de 11cm e 1.887 árvores por hectare terá volume de  $124,5\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ .

Figura 16 - Diagrama de Manejo da Densidade com variável volume ( $\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$ ) para povoamentos de *Acacia mearnsii*.

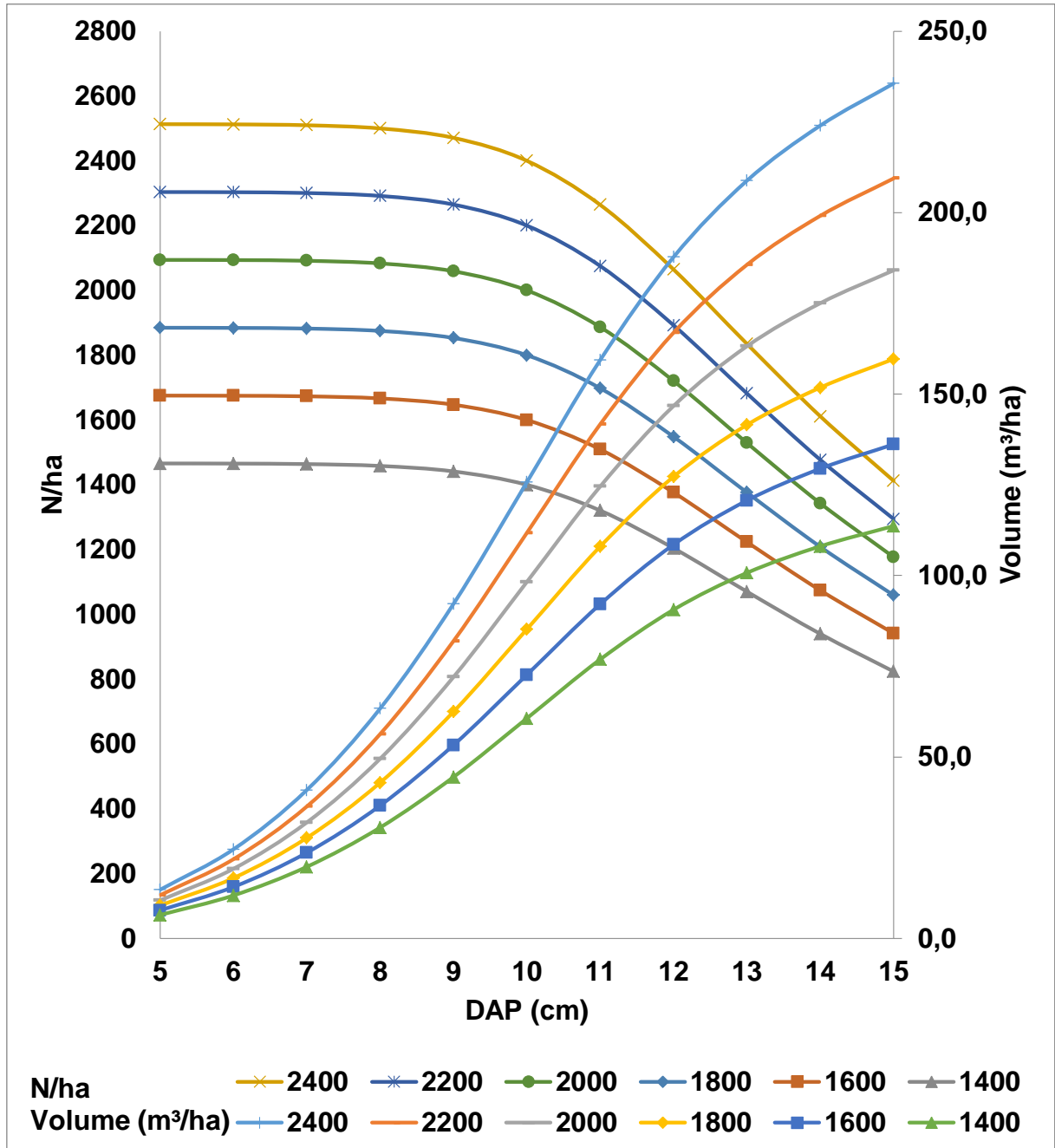


Comparativamente, estudos realizados por Rebottaro et al. (2007) em povoamentos de *P. elliotii*, sugerem que as populações sejam manejadas entre os IDPs de 500 e 800 (com um IDP máximo de 1500), onde o limite máximo a ser adotado dependerá do objetivo de produção. Caso seja buscado uma produção de grandes escalas de volume, deve-se utilizar IDPs mais elevados e, para pequenas escalas de volume IDPs mais baixos.

Combinando as variáveis dendrométricas: número de árvores por hectare, volume por hectare e diâmetro médio, separados por índice de densidade de povoamento foi desenvolvida a Figura 17. A utilização deste DMD para estimativa do volume tem como variáveis de entrada o diâmetro e o número de arvores por hectare.



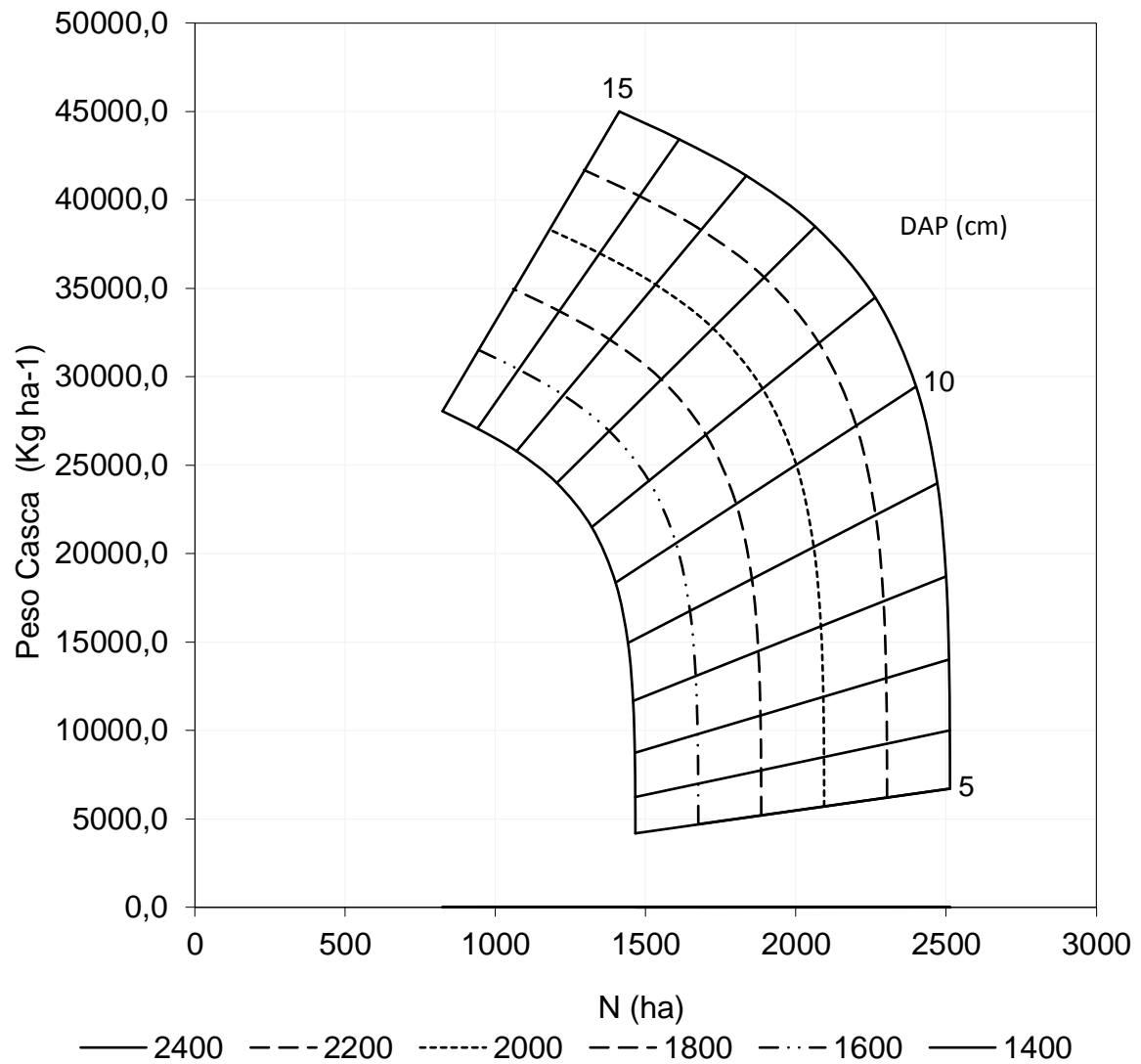
Figura 17 - Diagrama de manejo da densidade por índice de densidade de povoamento (relação entre número de árvores e volume com o diâmetro médio).



Fonte: O autor, 2016.

O desenvolvimento do DMD para a estimativa do peso de casca verde foi gerada tendo como variável de controle inicialmente o número de árvores por hectare (Figura 18). Nesta pode-se determinar para um IDP de 1400 e 1.446 árvores por hectare com 6cm de diâmetro médio tem-se  $6.235,6\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

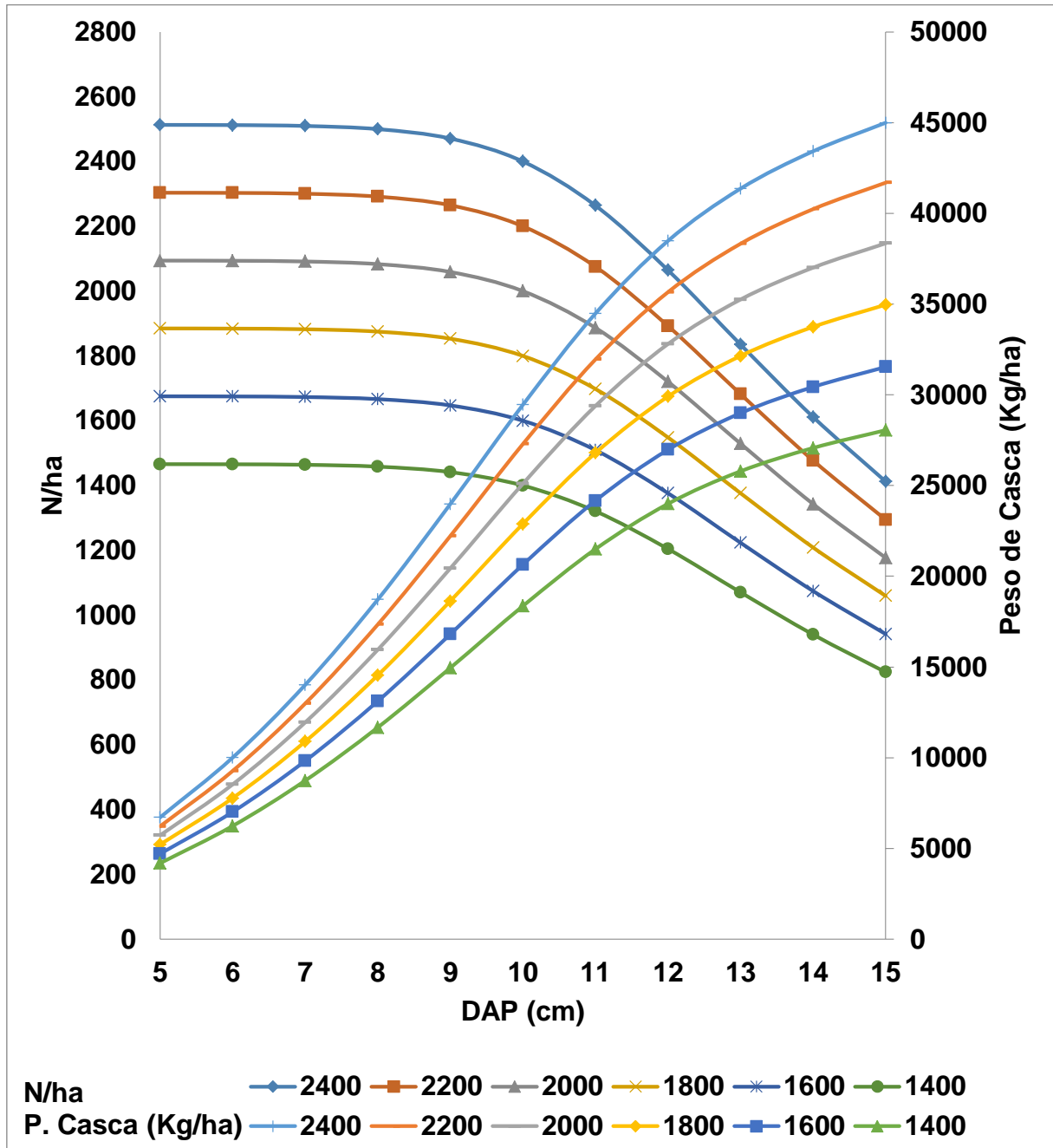
Figura 18 - Diagrama de Manejo da Densidade com variável peso de casca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para povoamentos de *Acacia mearnsii*.



Fonte: O autor, 2016.

Da mesma forma, pela combinação das variáveis: número de árvores por hectare, peso de casca verde e diâmetro médio, discriminados pelos diferentes IDPs, foi possível gerar o DMD para essas variáveis com o peso de casca verde (Figura 19).

Figura 19 - Diagrama de manejo da densidade por índice de densidade de povoamento (relação entre número de árvores e peso de casca verde com o diâmetro médio).



Fonte: O autor, 2016.

Neste DMD, para um diâmetro de referência de 12cm, encontramos um total de 23.989kg/ha de peso de casca verde com 1.204 árvores por hectare para o IDP 1400.

Por meio dos Diagramas de Manejo da Densidade obtidos, conhecendo o número árvores por hectare e o diâmetro médio pode-se determinar o índice de densidade do povoamento a que determinada população pertence. Considerando esses resultados é possível afirmar que o DMD pode ser utilizado para a prognose da produção de volume, área basal, diâmetro médio, peso de casca verde e número de árvores, a fim de estabelecer estratégias para o planejamento florestal.

#### **4.6.2 Diagrama de Manejo da Densidade do Povoamento (DMDPs) com altura dominante**

Devido a influência da capacidade produtiva do sitio sobre a produtividade por unidade de área, que pode ser expressa pelo desenvolvimento da altura dominante no tempo, ou pelo diâmetro médio, foi introduzida a altura no Diagrama de Manejo da Densidade do Povoamento (DMDP), com o objetivo de proporcionar uma correção direta da estimativa do volume médio para uma determinada densidade populacional específica.

Os Diagramas de Manejo da Densidade do povoamento (DMDPs) são dendrogramas de desenvolvimento dos povoamentos que ilustram as interações entre a densidade de árvores por hectare e outros parâmetros de interesse como: diâmetro médio, volume médio e altura dominante.

Na representação do dendrograma, foram relacionadas as variáveis diâmetro médio, altura e densidade populacional para obtenção do volume médio, tendo sido obtidas as curvas inter-relacionadas.

A linha de máxima densidade populacional foi obtida através da relação do volume médio com o número de árvores por hectare, sendo expressa pelo modelo:

$$\ln \bar{v} = 21,77519 - 3,39468 \cdot \ln N \quad (25)$$

Em que:  $v$  = volume médio ( $m^3$ ); e  $N$  = número de árvores ( $ha^{-1}$ ).

Este modelo apresentou um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) igual a 0,7499, erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) de 0,4144 e coeficiente de variação (CV%) igual a -19,312%.

Para a determinação da série de linhas isométricas inclinadas para cima, da esquerda para a direita, foi relacionado o número de árvores por hectare e o diâmetro médio, tendo sido utilizado o seguinte modelo:

$$\ln \bar{v} = -13,50078 + 0,47143 \cdot \ln N + 3,14325 \cdot \ln DAP \quad (26)$$

Em que:  $\bar{v}$  = volume médio ( $m^3$ ); N = número de árvores ( $ha^{-1}$ ); e DAP = diâmetro médio (cm).

A equação apresentou um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) igual a 0,9935, erro padrão da estimativa (Syx) de 0,0669 e coeficiente de variação (CV%) igual a -3,1199%.

Para obtenção da série das linhas isométricas que se inclinam para baixo, da esquerda para direita, onde o volume médio foi relacionado com as variáveis altura e número de árvores, foi utilizado o modelo:

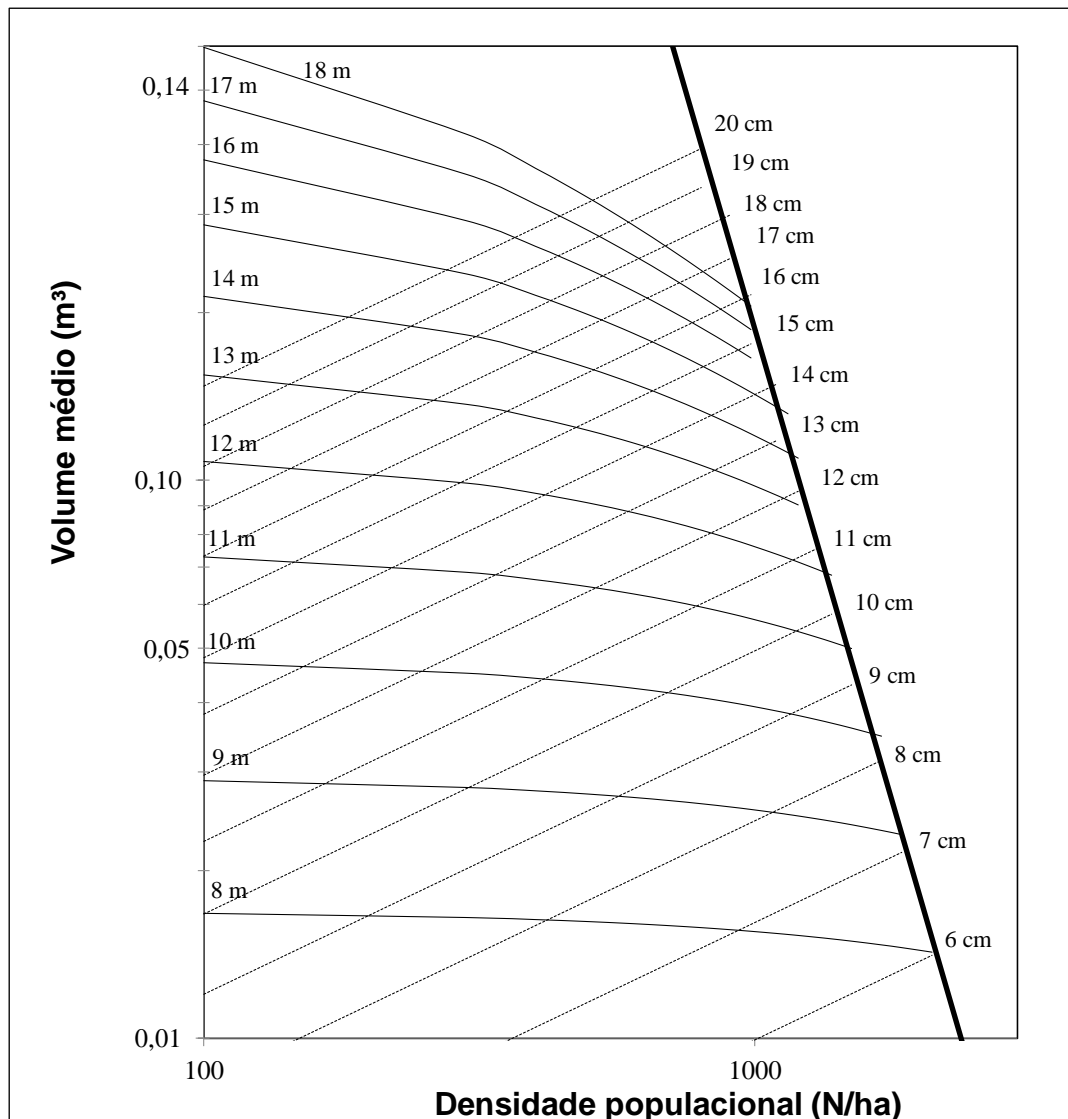
$$\bar{v} = \frac{1}{1030788 \cdot h^{-4,69606} + 0,013122 \cdot N \cdot h^{-0,44632}} \quad (27)$$

Em que:  $v$  = volume médio ( $m^3$ ); N = número de árvores ( $ha^{-1}$ ) e h = a altura total (metros).

Este modelo evidenciou um  $R^2_{aj}$  igual a 0,9750 erro padrão da estimativa de 0,0139 e CV de 9,25%.

A partir destas equações foi possível estimar o volume médio, o diâmetro médio e a altura dominante para uma determinada densidade de árvores por hectare, em determinado momento de desenvolvimento populacional (Figura 20). Com a introdução da altura dominante no DMDP foi possível exercer um controle da influência da capacidade produtiva do sítio sobre a produção volumétrica da população.

Figura 20 - Diagrama de Manejo da Densidade para Povoamentos de *Acacia mearnsii*.



Fonte: O autor, 2016

A construção dos DMDPs permite obter respostas para o desenvolvimento do povoamento e conhecer: o número de árvores por hectare, o volume médio e o diâmetro médio para uma altura dominante; e, por meio destes, determinar a produção e os incrementos alcançados para uma determinada idade. Em um exemplo de utilização do DMDP para um povoamento com 1000 árvores por hectare, altura dominante de 13m e diâmetro médio de 12,5cm, é possível estimar um volume médio de 0,1m³. Assim, pode-se estimar a produção pelo produto do volume médio pelo número de árvores por hectare, o que totaliza um volume de 100m³/ha.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e análises efetuadas, pode-se concluir que:

- a) O modelo de Tang apresentou melhor desempenho quando ajustado em densidades em que o povoamento encontra-se em autodesbaste;
- b) O coeficiente angular encontrado para o modelo de Reineke (-1,8533) diferiu ao coeficiente inicialmente postulado por este (-1,605), indicado para uso universal em várias espécies;
- c) Os modelos de Reineke e Zeide caracterizaram-se por apresentar valores extremos de densidade de árvores por diâmetro médio;
- d) Para um diâmetro médio de referência de 10cm, os índices de densidade do povoamento variam de 2400 a 1400 em intervalos de classe de 200;
- e) Para a estimativa de volume médio, o modelo  $\ln\bar{v} = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G$  foi selecionado para a construção do DMD;
- f) O modelo de estimativa para peso de casca verde foi expresso por  $\ln c = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln G$ , sendo selecionado para a construção do DMD;
- g) A dimensão do diâmetro médio que o autodesbaste se inicia varia com a densidade de árvores implantadas por hectare;
- h) Os Diagramas de Manejo da Densidade construídos com as variáveis diâmetro médio, área basal, volume por hectare e peso de casca verde por índice de densidade de povoamento, mostraram-se eficientes;
- i) A introdução da altura dominante no Diagrama de Manejo da Densidade, permite exercer um controle sobre a variação da capacidade produtiva dos sítios.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013, ano base 2012** / ABRAF. – Brasília: 2013. 148p.
- ARCHIBALD, D. J.; BOWLING, C. **Jack Pine density management diagram for Boreal Ontario**. Northeast Science and Technology, Technical note, TN 31, 1995.
- ASSMANN, E. **Principles of forest yield study**. New York: Pergamon Press, 1970. 506p.
- BARROSO, G. M. **Sistemática de angiospermas no Brasil**. Viçosa: Imprensa da Universidade Federal de Viçosa, v. 2, p. 15-70, 1991.
- BOLAND, D. J. et al. Black Wattle. In: \_\_\_\_\_. **Forest trees of Australia**. Melbourne: Thomas Nelson/CSIRO, 1984. p. 162-163.
- CARPANEZZI, A. A. Espécies para a recuperação ambiental. In: GALVÃO, A. P. M. **Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais**. Colombo: Embrapa Florestas, 1998. p. 43-53.
- CELLINI, J. M.; PASTEUR, G. M.; WADO, E.; LENCINAS, M. V. Modelos de perfil de tronco em *Nothofagus pumilio* (Polpp. Et Endl.) Krasser y su utilización en el calculo del volumen total. **Invest. Agr. Sist. Recr. For.** v. 11, n. 2, p. 245-261, 2002.
- COSSALTER, C. Introduction of Australian acacias into dry tropical West Africa. **Forest Ecology and Management**, v. 16, p. 367-389, 1987.
- CRECHI, E. H. **Efeitos da densidade da plantação sobre a produção, crescimento e sobrevivência de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. Em Missiones, Argentina**. 172f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.
- DANIEL, T. W.; HELMS, J. A.; BAKER, F. S. **Principles of Silviculture**. 2. ed. New York, McGraw Hill, 1979.
- DEAN, T. J.; BALDWIN, V. C. **Using a stand density management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations**. USDA Forest Service. 1993 (Research Paper, SO 275).
- DEDECEK, R. A.; HIGA, R. C. V. (Resp.). **Cultivo da Acácia-negra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. Versão eletrônica. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/AcaciaNegra/CultivodaAcaciaNegra/index.htm> Acesso em 17 Mar. 2015.
- DREW, T. J.; FLEWELLING, J. W. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. **Forest Science**, v. 25, n. 3, 1979. p. 518-532.



ENDRESS, P. K. **Diversity and evolutionary biology of tropical flowers**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 284, 1994.

EVANS, J. **Plantation Forestry in the Tropics**, 2<sup>nd</sup> ed., Clarendon Press, Oxford, p. 403, 1992.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria, UFSM, CEPEF-FATEC, 1992. 269p.

FLEIG, F. D. **Análise econômica dos sistemas de produção com acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. (Dissertação de Mestrado), Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria, 1993.

GAUTO, O. A. **Análise da dinâmica e impactos da exploração sobre o estoque remanescente (por espécies e grupos de espécies similares) de uma Floresta Estacional Semidecidual em Misiones, Argentina**. 1997, 133f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

GEZAN, S. A.; ORTEGA, A.; ANDENMATTEN, E. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. **Revista Bosque**, Valdivia, v. 28, n. 2, p. 97-105, jul./dez., 2007.

GINRICH, S. R. Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forests in the central states. **Forest Science**, Bethesda, v. 13, n. 1, p. 28-53, Feb.1967.

GRIFFIN, A. R.; MIDGLEY, S. J.; BUSH, D.; CUNNINGHAM, P. J.; RINAUTO, A. T. Global uses of Australian acacias – recent trends and future prospects. **Diversity and Distribution**. v. 17, p. 837-847, 2011.

LOUREIRO, G. H. **Diagrama de manejo da densidade para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 71f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

HARRINGTON, T. B. **Silvicultural approaches for thinning Southern Pines: method, intensity and timing**. School of Forest Resources, Geórgia, EUA, 1997. Disponível em: [www.gfc.state.ga.us/Resources/Publications/ForestManagement/SilviculturalApproaches.pdf](http://www.gfc.state.ga.us/Resources/Publications/ForestManagement/SilviculturalApproaches.pdf) Acesso em 18 de dez. de 2015.

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

HUSCH, B.; MILLER, I. C.; BEERS; T. W. **Forest mensuration**. New York: John Wiley & Sons, 1982. 402p.

KANNEGIESSER, U. Apuntes sobre algunas acacias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciencia y Investigación Forestal**, v. 4, n. 2, p. 198-212, 1990.

KRAMER, P. J.; KOSLOWSKI, T. T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1960.

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.

MARANGON, G. P. **Otimização bioeconômica do regime de manejo para *Eucalyptus grandis* W. Hill no estado do Rio Grande do Sul**. 196p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MEYER, E. A. **Densidade de árvores por diâmetro na floresta estacional decidual no Rio Grande do Sul**. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 34p.

OLIVEIRA, H. A. **Acácia negra e tanino no Rio Grande do Sul**. Canoas: La Salle, v. 2, 1968, 121p.

ORTEGA, A.; MONTEIRO, G. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. **Ecologia**, Madri, n. 2, p. 155-184, 1988.

PALAHÍ, M.; MIIMA, J.; MONTERO, E. Stand-level yield model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Northeast 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, 14p.

PIETERSE, P. J.; BOUCHER, C. Is burning a standing population of invasive legumes a viable control method? Effects of a wildfire on an *Acacia mearnsii* population. **Southern African Forestry Journal**, n. 180, p. 15-21. 1997.

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

RICHARDSON, D.M.; REJMANEK, M. Trees and shrubs as invasive alien species – a global review. **Diversity and Distribution**. v.17, p. 788-809, 2011.

SAS. **A simple regression model with correction of heterocedasticity**. Cary: SAS Institute, 2004.

SAUNDERS, M. R.; PUETTMANN, K. J. **A preliminary white spruce density management diagram for the lake states**. University of Minnesota. Department of Forest Research, 2000, p. 13.

- SCHNEIDER, P. R. **Modelos de equação e tabelas para avaliar o peso de casca de acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild.** (Dissertação de Mestrado), Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 1978.
- SCHNEIDER, P. R. **Manejo Florestal: Planejamento da produção florestal**, Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM. 2002. 492p.
- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. FACOS: UFSM, 2008, 566p.
- SCHNEIDER, P. R.; HOSOKAWA, R. Estudo de equações volumétricas para tabelas de volume com e sem casca para acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). In: Congresso Florestal Brasileiro, 3, Manaus, 4 a 7 de dezembro, 1978. **Anais... Silvicultura**, p.90-95, 1978.
- SCHNEIDER, P. S. P. **Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade em povoamentos de *Pinus taeda* L.** 94f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008 b.
- SELLE, G. L. **Guias de densidade e índices de sitio para *Hovenia dulcis* Thunberg na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.** 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- SHERRY, S. P. **The Black Wattle (*Acacia mearnsii* De Wild.)**. Pietermaritzburg: University of Natal Press, 1971.
- SPIECKER, H. **Análise do crescimento florestal: a concorrência e sua importância no desbaste.** Curitiba: FUPEF, Série técnica, n. 8, 1981, 62p.
- TANG, S.; MENG, C. H.; MENG, F. R. A growth and self-thinning model for pure even-age stands: theory and applications. **Forest Ecology and Management**, n. 70, p. 67-73, 1994.
- THOMAS, C. **Dendrograma de manejo da densidade para povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. na região central do Rio Grande do Sul.** 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- VANDERSCHAAF, C. L. **Modeling maximum size-density relationships of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations.** 157f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2006.
- YODA, K.; KIRA, T.; OSAWA, H.; HOZUMI, K. Self-thinning in over crowded pure stands under cultivated and natural conditions. **Journal Biology Osaka City University**, v. 14, p. 107-129, 1963.

ZANON, M. L. B. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. diferenciada por dioicia.** 108f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

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