

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NAIARA TEODORO ZAMIN

MODELAGEM DA PRODUÇÃO MENSAL DE INDIVÍDUOS DE  
*Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda* COM INCLUSÃO  
DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS



CURITIBA  
2013

NAIARA TEODORO ZAMIN

MODELAGEM DA PRODUÇÃO MENSAL DE INDIVÍDUOS DE  
*Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda* COM INCLUSÃO  
DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Co-Orientadores: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Prof. Dr. Henrique Soares  
Koehler

CURITIBA  
2013

Ficha catalográfica elaborada por Deize C. Kryczyk Gonçalves – CRB 1269/PR

Zamin, Naiara Teodoro

Modelagem da produção mensal de indivíduos de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* com inclusão de variáveis meteorológicas / Naiara Teodoro Zamin - 2013.

100 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Co-orientadores: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Prof. Dr. Henrique Soares Koehler

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 28/02/2013

Inclui bibliografia

Área de concentração: Manejo florestal

1. Povoamento florestal - Crescimento. 2. Árvores - Crescimento. 3. Pinheiro-do-Paraná. 4. *Pinus taeda*. 5. Teses. I. Machado, Sebastião do Amaral. II. Figueiredo Filho, Afonso. III. Koehler, Henrique Soares. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. V. Título.

CDD – 634.9  
CDU - 634.0.56




Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

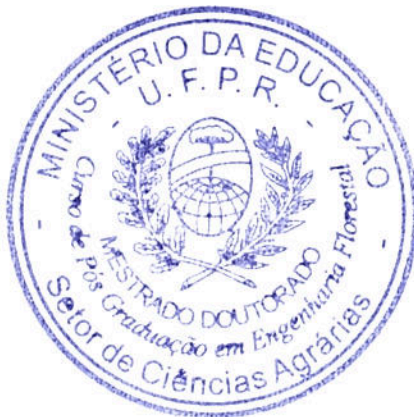
## PARECER


Defesa nº. 966

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Naiara Teodoro Zamin* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**MODELAGEM DA PRODUÇÃO MENSAL DE INDIVÍDUOS DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda* COM INCLUSÃO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS**", é de parecer favorável à do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.

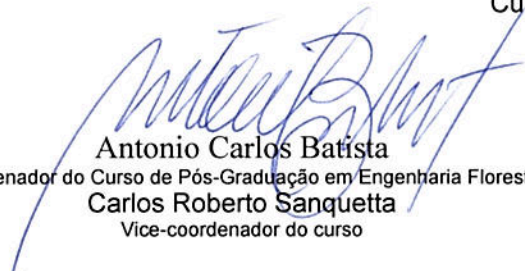
  
Dr. Mauricio Romero Gorenstein  
UTFPR - Dois Vizinhos  
Primeiro examinador

  
Dr. Ana Paula Dalla Corte  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Segundo examinador



  
Dr. Sebastião do Amaral Machado  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 28 de fevereiro de 2013.

  
Antonio Carlos Batista  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Carlos Roberto Sanquetta  
Vice-coordenador do curso

Aos meus pais, Paulo Roberto Zamin e Sandra Mara Teodoro Zamin,  
A minha irmã Naiana Teodoro Zamin.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas graças que tem dado a mim e a minha família e pela sabedoria concedida no decorrer desse desafio.

Aos meus pais, pela criação fantástica que me deram sempre primando por bons preceitos, pela luta árdua e diária para garantir minha educação e acima de tudo por toda confiança depositada em mim. À minha irmã, pelo convívio diário aqui em Curitiba, sempre me apoiando nos momentos de desânimo e também crescendo comigo frente aos desafios.

À Bruno Henrique Czelusniak, meu namorado e amigo, por ser meu companheiro, sempre com suas palavras de motivação que me ajudam em cada etapa, e ainda, por todo cuidado e amor dedicados a mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado, por esses anos de sábia orientação e árdua dedicação, despertando em mim o gosto pela pesquisa florestal e sendo um grande exemplo de comprometimento e atuação profissional.

Aos Co-orientadores, Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho e Prof. Dr. Henrique Soares Koehler pelo apoio e dedicação na orientação e pelas considerações feitas para o enriquecimento desta pesquisa.

Ao Prof. M.sc Décio José de Figueiredo, por ter despertado meu interesse pelo Manejo Florestal, pela amizade, momentos de descontração e acima de tudo pelo aprendizado repassado ao longo desses anos de convívio.

Aos amigos da Família Dendrometria e agregados: Luis César Rodrigues da Silva, Rodrigo Geroni Mendes Nascimento, Marco Aurélio Figura, Angelo Alberto Pacheco dos Santos, Ronan Felipe de Souza, Alan Lessa Derci Augustynczyk e Timni Vieira. Pela parceria no desenvolvimento de projetos, auxílio em temas desconhecidos, e motivação desde a Iniciação Científica. Pelos momentos de descontração vivenciados nos cafezinhos no LADEN e *happy hours*, quando nos divertimos ou até mesmo brigamos como uma verdadeira família.

Ao meu grande amigo Tomaz Longhi Santos, que desde a graduação dividiu os desafios de cada etapa comigo, sendo sempre um grande inspirador como caráter e competência. Pelos momentos de alegria e até mesmo de angústia que compartilhamos durante toda essa caminhada, incluindo risadas e desabafos ocorridos entre um chimarrão e outro.

Ao colega do Laboratório de Ecologia Florestal, Bruno Palka Miranda, pela prontidão e desenvolvimento do mapa dessa pesquisa.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR.

Aos demais familiares, amigos e colegas que contribuíram de forma direta e indireta no desenvolvimento desse trabalho.

*"A natureza, ao fazer-nos crescer, não só nos favorece em forças e tamanho, mas, à medida que o tempo vai passando, dilata com ele o espaço interno da inteligência e da alma."*

William Shakespeare

## RESUMO GERAL

O objetivo desse trabalho foi analisar e modelar, em um período de seis anos, o crescimento juvenil mensal e anual em diâmetro e altura de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L. e correlacioná-los com fatores climáticos. Para tanto, foram selecionadas aleatoriamente 30 árvores de *P. taeda* e 30 de *A. angustifolia*, as quais se localizam em plantios nos municípios de Curitiba e Campina Grande do Sul, respectivamente. No início de cada mês, no período de junho de 2006 a agosto de 2012, foram medidas as variáveis diâmetro e altura. Foram ajustados modelos biológicos para a produção mensal dos seis anos vegetativos e também para a produção anual. Uma análise de agrupamentos foi realizada para determinar a presença de grupos com padrão de crescimento semelhantes ao longo do ano. As variáveis climáticas foram obtidas de duas estações meteorológicas do SIMEPAR próximas aos plantios monitorados. Para determinar o efeito das variáveis climáticas sobre o crescimento foi feita uma matriz de correlação. Posteriormente, fez-se a Análise de Componentes Principais (ACP) para determinar as variáveis climáticas a serem inclusas no ajuste do modelo de produção de Chapman-Richards. Os resultados indicaram que as curvas de produção mensal de ambas as espécies e variáveis apresentaram forma sigmoideal, demonstrando o mesmo comportamento das curvas de produção ano a ano. Os modelos biológicos apresentaram estatísticas de ajuste e precisão satisfatórias, tendo sido selecionado o de Chapman-Richards como o mais apropriado para moldar-se aos dados. Pode-se verificar por meio das curvas de produção mensal e anual que o plantio de *A. angustifolia* ainda encontra-se em fase juvenil de desenvolvimento, não sendo observado o mesmo para *P. taeda* que já atingiu a fase adulta. A análise de agrupamento mostrou a formação de três grupos, que representam padrões distintos de incremento durante o ano. O maior incremento durante o período vegetativo ocorreu em média de setembro a abril para as duas espécies, com menores taxas, e até cessação do crescimento (dormência) ocorrendo entre os meses de maio e agosto. As variáveis climáticas que apresentaram maior correlação com o crescimento mensal em diâmetro e altura das espécies foram temperatura, fotoperíodo e pressão atmosférica, além da precipitação para alguns anos da análise. Os ajustes do modelo biológico com a inclusão de variáveis climáticas apresentaram redução do erro padrão de estimativa em cerca de 0,8%, comparativamente ao modelo biológico tradicional. Entretanto, a ANOVA mostrou não haver diferença estatística entre as estimativas da produção obtidas por ambos os modelos.

Palavras-chave: crescimento mensal, modelos biológicos, efeito climático, análise de componentes principais



## GENNERAL ABSTRACT

The objective of this research was to analyze and to model, the monthly and annual young growth in diameter and height of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze and *Pinus taeda* L. and correlate them with climatic factors, in a period of six years. For this, they were randomly selected 30 trees of *P. taeda* and 30 of *A. angustifolia*, which are located in plantations in Curitiba and Campina Grande do Sul, respectively. In the beginning of each month, during June of 2006 and August of 2012, they were measured the diameter and height. Biological models were adjusted for the monthly yield of six vegetative years and also for the annual yield. A Cluster analysis was carried out to define the presence of groups with similar growth pattern over the years. Climatic variables were obtained from two SIMEPAR's meteorological stations near the monitored plantations. A matrix of correlation was done to determinate the effect of the climatic variables on the growth. A Principal Component Analysis (PCA) was made to determine the climatic variables to be included in the adjustment of the yield model of Chapman-Richards. The results indicated that the monthly yield curves of both species and variables showed the sigmoidal form, which demonstrated the same comportment of annual yield curves. The biological models showed satisfactory statistics of adjustment and precision, and the Chapman-Richards was selected as the most appropriated to fit to the data. It was possible to verify through the monthly and annual growth yield that *A. angustifolia* plantation are still in the young stage of development and the *P. taeda* plantation already reached the adult stage. The Cluster analysis showed the formation of three groups which represent distinct patterns of growth during the year. The higher growth during the vegetative period occurs in average from September to April for both species with lower rates, and even cessation of growth (dormancy) occurring between May and August. The climatic variables that show greatest correlation with monthly growth of diameter and height were temperature, photoperiod and atmospheric pressure, and precipitation for several years of analysis. The adjustment of biological models with the inclusion of climatic variables showed reduction in the standard error of estimate at about 0.8%, compared to the traditional biological model. However, the ANOVA showed no statistical difference between production estimates obtained by both models.

Key-words: monthly growth, biological models, climatic effect, principal component analysis

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3. 1 – RELAÇÕES ENTRE AS CURVAS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	19
FIGURA 4. 1 – LOCALIZAÇÃO DOS PLANTIOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> EM CAMPINA GRANDE DE SUL E DE <i>Pinus taeda</i> EM CURITIBA, ESTADO DO PARANÁ. ....	43
FIGURA 4. 2 – COLETA DE DADOS, ONDE: A) MARCAÇÃO DAS ÁRVORES COM PLAQUETA METÁLICA; B) MARCAÇÃO DO LOCAL DE MEDIÇÃO DO DIÂMETRO COM TINTA SPRAY; C) MEDIÇÃO DO DIÂMETRO COM PAQUÍMETRO; D) MEDIÇÃO DA ALTURA COM RÉGUA ALTIMÉTRICA. ....	45
FIGURA 4. 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS BIOLÓGICOS DE CHAPMAN-RICHARDS E GOMPERTZ PARA AJUSTE DA VARIÁVEL DIÂMETRO A 10 CM E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> , PARA AS IDADES DE 1 A 6 ANOS E PARA O TOTAL.....	53
FIGURA 4. 4 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS BIOLÓGICOS DE CHAPMAN-RICHARDS E GOMPERTZ PARA AJUSTE DA VARIÁVEL DIÂMETRO A 1,30 M E ALTURA DE <i>Pinus taeda</i> , PARA AS IDADES DE 2 A 7 ANOS E PARA O TOTAL. ....	55
FIGURA 4. 5 – CURVAS DE PRODUÇÃO E INCREMENTO MENSAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> , NOS SEIS ANOS AVALIADOS, CONSTITUÍDAS COM O MODELO DE CHAPMAN-RICHARDS AJUSTADO. ....	59
FIGURA 4. 6 – CURVAS DE PRODUÇÃO E INCREMENTO MENSAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Pinus taeda</i> , NOS SEIS ANOS AVALIADOS, CONSTITUÍDAS ATRAVÉS DO MODELO DE CHAPMAN-RICHARDS AJUSTADO. ....	62
FIGURA 4. 7 – CURVA DE PRODUÇÃO E INCREMENTO ANUAL EM DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	65
FIGURA 4. 8 – CURVA DE PRODUÇÃO E INCREMENTO ANUAL EM DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Pinus taeda</i> . ....	66
FIGURA 4. 9 – DENDROGRAMAS DE WARD PARA O INCREMENTO CORRENTE MENSAL AO LONGO DE SEIS ANOS VEGETATIVOS NOS PLANTIOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> . ....	68
FIGURA 4. 10 – INCREMENTO CORRENTE MENSAL MÉDIO EM DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> , DURANTE OS SEIS ANOS AVALIADOS. ....	70
FIGURA 5. 1 – CORRELAÇÃO ENTRE OS INCREMENTOS CORRENTES MENSAIS (ICM) EM DIÂMETRO (cm) E ALTURA (m) COM A	

VARIÁVEL CLIMÁTICA PRECIPITAÇÃO (Pp) NOS PLANTIOS DE ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA E PINUS TAEDA.....	87
FIGURA 5. 2 – INCREMENTO CORRENTE MENSAL EM DIÂMETRO NO PRIMEIRO ANO DE MEDIÇÃO PARA <i>Araucaria angustifolia</i> E NO SEXTO ANO DE MEDIÇÃO PARA <i>Pinus taeda</i> .....	89

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4. 1 – MODELOS BIOMATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA O AJUSTE DA PRODUÇÃO MENSAL EM DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> , PARA OS SEIS ANOS AVALIADOS. ...	46
TABELA 4. 2 - EQUAÇÕES DE PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> . ....	49
TABELA 4. 3 – COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE CHAPMAN-RICHARDS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> .....	57
TABELA 5. 1 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE O INCREMENTO CORRENTE MENSAL EM DIÂMETRO E ALTURA DAS ESPÉCIES <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> AO LONGO DOS SEIS ANOS DE AVALIAÇÃO.....	85
TABELA 5. 2 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS DADOS METEOROLÓGICOS DE PINHAIS, PARA <i>Araucaria angustifolia</i> , REFERENTE AO QUARTO ANO DE AVALIAÇÃO (AGO/2009 A JUL/2010). ....	91
TABELA 5. 3 – VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SELECIONADAS PELA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA OS SEIS ANOS DE AVALIAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE CURITIBA E DE PINHAIS. ....	91
TABELA 5. 4 – PARÂMETROS E COEFICIENTES DE AJUSTE E PRECISÃO DO MODELO DE CHAPMAN-RICHARDS PARA O AJUSTE DA PRODUÇÃO MENSAL EM DIÂMETRO (D) E ALTURA (H) DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> , SEM (SVC) E COM (CVC) A INCLUSÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS. ....	93

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
3.1. CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	18
3.2. FATORES QUE AFETAM O CRESCIMENTO .....	22
3.3. MODELAGEM BIOLÓGICA .....	24
3.4. MODELOS MECANÍSTICOS .....	26
3.5. ANÁLISE MULTIVARIADA.....	28
3.5.1 Análise de Componentes Principais.....	30
3.5.2 Análise de Agrupamento ( <i>Cluster Analysis</i> ) .....	32
3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
<b>4. AVALIAÇÃO E MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE POVOAMENTOS JUVENIS DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i></b> .....	<b>39</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	41
4.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	43
4.2.1 Área de estudo .....	43
4.2.2 Coleta de dados .....	44
4.2.3. Modelagem biológica.....	45
4.2.4. Análise do crescimento mensal e anual .....	47
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.3.1. Modelagem Biológica .....	48
4.3.2. Avaliação das curvas de produção e incremento mensal e anual.....	58
4.3.3. Avaliação da dinâmica do incremento corrente mensal nos seis anos vegetativos .....	67
4.4. CONCLUSÃO.....	72
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
<b>5. EFEITO DAS VARIÁVEIS CLIMATICAS NO CRESCIMENTO MENSAL E NA MODELAGEM BIOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE <i>Araucaria angustifolia</i> E <i>Pinus taeda</i> na fase juvenil</b> .....	<b>77</b>
5.1. INTRODUÇÃO.....	79
5.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	80

5.2.1 Área de estudo .....	80
5.2.2. Variáveis Climáticas .....	81
5.2.3. Modelagem biológica incluindo as variáveis climáticas .....	82
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	84
5.3.1. Efeito das variáveis climáticas no crescimento mensal .....	84
5.3.2. Modelagem biológica da produção mensal com inclusão de variáveis climáticas.....	90
5.4. CONCLUSÃO.....	95
5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

As espécies *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L. são de grande importância na região sul do país. A *A. angustifolia*, conhecida popularmente como pinheiro-do-paraná, possui uma grande função ecológica, sendo a principal componente da Floresta Ombrófila Mista e, além disso, foi o baluarte da indústria madeireira durante muito tempo no país, visto a elevada qualidade da madeira desta espécie.

O *P. taeda* tem sido uma das espécies mais plantadas no sul do país desde a década de 1960, devido sua ampla capacidade de adaptação às condições climáticas, à sua diversidade de uso e ao seu rápido crescimento, abrangendo uma área de cerca de um milhão de hectares plantados no Brasil (BOGNOLA, 2007).

Estudos sobre crescimento e produção destas e de outras espécies vêm sendo realizados a muitos anos no setor florestal, uma vez que permitem o planejamento da atividade florestal como um todo. Apesar disso, pouco se sabe a respeito da curva de produção dentro de um ano vegetativo da árvore, e com a redução crescente nas rotações dos povoamentos a modelagem do crescimento biológico mensal seria de grande auxílio aos gestores florestais.

A princípio, pressupõe-se apenas que o crescimento mensal responde aos estímulos ambientais no decorrer do ano, uma vez que no inverno o ritmo de crescimento decresce e no verão este se apresenta de forma acelerada podendo, portanto, estar correlacionado com o comportamento do crescimento biológico durante toda a vida do indivíduo.

Tendo sido evidenciada essa tendência no comportamento do crescimento mensal, torna-se importante quantificar o real efeito das variáveis climáticas sobre o padrão de crescimento ao longo do ano e, até mesmo, incluir essas variáveis na modelagem do crescimento e produção, uma vez que é crescente a demanda por modelos de crescimento que incluam fatores ambientais como variáveis independentes.

Desta forma, visando melhor entender esses processos, essa dissertação foi dividida em capítulos. O primeiro apresenta a avaliação e a modelagem biológica do crescimento mensal e anual de *A. angustifolia* e *P. taeda*; já o segundo contempla

uma avaliação dos efeitos climáticos no crescimento mensal dessas espécies e na modelagem biológica do crescimento e produção.



## 2. OBJETIVOS

Analisar e modelar, em um período de seis anos, o crescimento juvenil mensal e anual em diâmetro e altura de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* e correlacioná-lo com fatores climáticos.

- Determinar o início e o fim do período de crescimento ao longo do ano vegetativo;
- Verificar se o crescimento mensal acumulado possui a mesma forma sigmoidal apresentada pela produção anual ao longo da vida dos indivíduos;
- Acompanhar a evolução das curvas de produção mensal com o avanço da idade;
- Ajustar modelos biológicos da produção mensal e anual;
- Identificar o efeito das variáveis climáticas no incremento corrente mensal do diâmetro e altura;
- Ajustar modelos biológicos com a inclusão de variáveis climáticas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

O crescimento de árvores consiste no acréscimo de camadas celulares na raiz, tronco e galhos modificando o tamanho e a forma dessas plantas (HUSCH *et al.*, 1982). Esse crescimento se dá de forma diferenciada no decorrer da vida dos vegetais, sendo mais acelerado na juventude, o que possibilita a capacidade de competição e estabelecimento da planta na população e mais lento com o passar dos anos, até atingir-se uma taxa mínima de incremento e a planta alcançar seu tamanho máximo.

Segundo Zeide (1993) o crescimento acumulado das árvores é resultante de duas forças opostas que interagem entre si. A curva de produção se caracteriza inicialmente por uma forma côncava (anabolismo) e a medida que a árvore envelhece, com o passar dos anos, ela se torna convexa (catabolismo), até atingir um ponto máximo de crescimento. Segundo esse autor, a fase de anabolismo, ou componente positivo, representa a tendência natural para a multiplicação exponencial de um organismo (potencial biótico, atividade fotossintética, absorção de nutrientes, entre outros), enquanto a fase do catabolismo representa as restrições impostas por fatores internos (mecanismo de auto-regulação e idade) e externos (competição, recursos limitados, respiração e estresse).

A curva de produção ainda pode ser denominada de curva integral e segundo Assmann (1970) apresenta características como um crescimento inicial moderado, ascendendo convexamente até atingir o ponto de inflexão, onde passa a crescer de forma côncava para o eixo x passando pelo ponto de máxima tangência, seguindo seu crescimento a pequenas taxas com o avanço da idade até atingir o crescimento máximo ou valor assintótico. Segundo Pienaar (1965) apesar desse padrão geral prevalecer, diferenças podem ocorrer de acordo com espécies e locais onde estão estabelecidas (sítios).

A curva de incremento corrente anual é obtida com os valores correspondentes ao crescimento de cada ano da árvore e pode ser chamada de curva diferencial, ou primeira derivada da curva de produção. Essa curva apresenta

dois pontos de inflexão e um ponto de máximo incremento que coincide com o ponto de inflexão da curva de produção (TURNBULL, 1963; ASSMANN, 1970).

Segundo Prodan *et al.* (1997) pode-se diferenciar vários tipos de crescimento, de acordo com o período de tempo determinado. Dentre eles estão o incremento corrente anual (ICA), descrito anteriormente como a curva diferencial da produção, o incremento periódico anual (IPA), o qual é definido como taxa de crescimento para um período maior que um ano e ainda o incremento médio anual (IMA) determinado por meio da produção de determinado período, dividido por esse período. As curvas que caracterizam essas taxas possuem formas semelhantes e estão diretamente correlacionadas com a curva de produção, conforme apresentado na FIGURA 3.1.

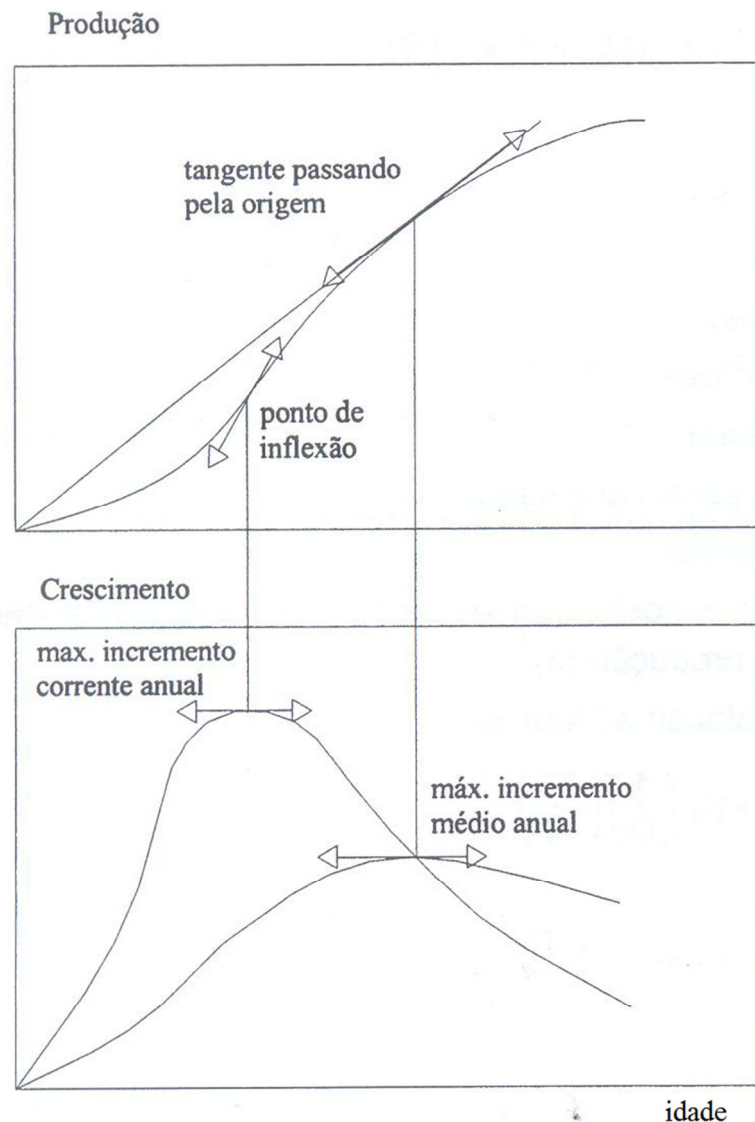


FIGURA 3. 1 – RELAÇÕES ENTRE AS CURVAS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO  
 FONTE: SCOLFORO, 2006.

Pode-se perceber que o valor de máximo ICA coincide com o ponto de inflexão da curva de produção. Além disso, no momento em que as curvas de ICA e IMA se cruzam, onde o ICA torna-se igual ao IMA tem-se o valor máximo de IMA e também o ponto de máxima tangência na curva de produção, sendo que a partir deste a produção da árvore tende ao valor assintótico (ASSMANN, 1970; PRODAN *et al.*, 1997).

Estudos de Assmann (1970), Fritz (1976), Zanon (2007) e Machado *et al.* (2010) demonstraram que estes tipos de curva não ocorrem somente durante toda a vida da árvore, mas ocorrem também quando se avalia o crescimento mês a mês, ou seja, dentro de cada período vegetativo. Esses autores observaram que esse comportamento é evidenciado, principalmente, em locais com climas bem definidos por invernos rigorosos ou ainda pelo déficit hídrico ocorrente em parte do ano, em que o crescimento alterna em períodos de elevadas e baixas taxas ao longo do ano.

Turnbull (1963) definiu a assíntota como sendo o nível de saturação do crescimento de uma população ou indivíduo na relação entre o espaço, nutrientes, água e luz disponível no ambiente e a demanda total do organismo. Esse valor é atingido quando a árvore ou povoamento chegam a fase senil de seu desenvolvimento. Nas curvas de produção mês a mês, essa característica também pode ser observada, uma vez que ao final de cada período vegetativo a árvore atinge uma produção máxima e tende a assíntota, a qual é causada pela diminuição e/ou cessação da atividade cambial (ZANON, 2007) ou ainda dormência da gema apical (MACHADO *et al.*, 2010), para crescimento em diâmetro e altura.

Procurando entender a variação do crescimento das árvores em períodos sazonais, Assmann (1970) correlacionou o crescimento anual com a curva de incremento em função da idade, concluindo que o padrão sazonal de crescimento é muito semelhante ao padrão do crescimento ao longo da vida da árvore, uma vez que o ritmo do crescimento no decorrer de um ano vegetativo é caracterizado pela ocorrência de um máximo incremento mensal seguido de taxas decrescentes de incremento, assim como ocorre na curva de crescimento em função da idade. Esse autor também verificou que as taxas de incremento no decorrer do ano vegetativo não estão relacionadas apenas com as condições climáticas, mas também com as reservas energéticas que a planta acumulou no último período de crescimento.

Assmann (1970) também observou, para algumas espécies europeias, que tanto o crescimento em altura quanto em diâmetro apresentaram esse período de máximo incremento nos meses mais quentes do ano, referente à época de verão. Esse autor constatou ainda que a curva de produção de diâmetro correspondente ao período vegetativo (período de formação de um anel anual) apresenta a mesma forma sigmoidal assim como acontece com a curva de produção ao longo de toda a vida da árvore.

Pélissier e Pascal (2000) estudaram o crescimento diamétrico mensal de 24 espécies no Ghats Ocidental da Índia durante o período de 1980 a 1982, com uso de cintas dendrométricas. Esses autores observaram variações de crescimento durante o ano, com fases de incremento rápido e fases de estagnação ou regressão. A análise gráfica da curva de produção média das espécies apresentada pelos autores, evidencia a clara forma sigmoidal no padrão de crescimento ao longo do ano desses indivíduos.

Machado *et al.* (2010) também observaram que as curvas de crescimento acumulado mês a mês para plantios de *Pinus taeda* apresentaram forma sigmoidal dentro de um ano vegetativo, característica típica do crescimento das variáveis biológicas em relação ao fator tempo. Isto evidencia que este crescimento segue os princípios teorizados na Lei dos Rendimentos Decrescentes, ocorrendo dentro do ano vegetativo (mês a mês), devido às estações do ano, o mesmo que acontece ao longo da vida da árvore (ano a ano).

Zanon (2007) analisando o crescimento ao longo de três anos vegetativos de *Araucaria angustifolia* verificou um comportamento sigmoidal da curva de produção anual, com crescimento no início do mês de setembro, apresentando taxas elevadas nos meses de janeiro e fevereiro, sendo os meses de setembro a março os responsáveis em média por 74,5% do crescimento anual dessa espécie. Já entre os meses de abril e agosto, quando as temperaturas diminuem, verificou-se uma diminuição da atividade cambial, momento em que as árvores atingem seu valor assintótico para aquele ano, sendo essa redução variável de 5 a 6 meses por ano, dependendo das variáveis meteorológicas, posição sociológica e vitalidade da árvore. Essa autora também observou um incremento médio de 2,70 mm para indivíduos de povoamentos com idade de 40 anos e de 2,17 mm para 60 anos de idade, com incremento máximo variando de 4,88 a 6 mm.

### 3.2. FATORES QUE AFETAM O CRESCIMENTO

O crescimento das árvores é influenciado pelas características da espécie em interação com o meio ambiente, tais como os fatores climáticos e os pedológicos, as características topográficas e a competição entre as árvores, sendo esse último um fator muito importante, contudo facilmente controlado pelo manejo silvicultural (PIENAAR, 1965; HUSCH *et al.*, 1982; PRODAN *et al.*, 1997).

Fatores do meio físico como clima, fisiografia e solos são os que mais afetam a capacidade produtiva de uma floresta em um determinado local. Sendo assim, o crescimento e a produtividade, no caso de florestas plantadas, dependem de respostas fisiológicas à interação de fatores biofísicos e abióticos do meio ambiente (BOGNOLA, 2007).

Campos (1970) descreveu que a ação dos fatores climáticos sobre as plantas arbóreas é notada inicialmente no aspecto geográfico. Segundo esse autor, esses fatores se relacionam com a atmosfera em que a parte aérea da planta cresce e então surtem efeito no desenvolvimento desses indivíduos.

Brown (1974) descreveu algumas influências ambientais no crescimento das árvores tais como, a luz, a água e a temperatura. Segundo esse autor a luz é um dos maiores constituintes do ambiente que apresenta influência sobre o desenvolvimento das árvores, uma vez que o crescimento e a forma da árvore são diretamente afetados pela intensidade, qualidade e duração da luz.

O comportamento de crescimento específico para cada região, aliado à integração com fatores selecionados do ambiente, possibilita ao silvicultor/manejador reconhecer e visualizar em conjunto, características distintas da floresta, permitindo relacioná-las com a capacidade produtiva da espécie, bem como com o zoneamento (da produtividade, dos atributos da espécie, do solo e/ou do relevo), possibilitando o desenvolvimento de ferramentas para a tomada de decisão da intervenção nos povoamentos (HESS *et al.*, 2009).

Desta forma, as mudanças do ambiente caracterizam fatores importantes que afetam o crescimento das árvores. Contudo, isto não é refletido pelos modelos biológicos de crescimento, os quais consideram apenas o crescimento presente das árvores como função do tamanho e da idade desses indivíduos. Desta maneira, para decidir se as equações de crescimento devem conter um termo responsável pelas

mudanças do meio, é necessário que se investigue esse efeito no crescimento das árvores (ZEIDE, 1993).

Para Turnbull (1963) embora as hipóteses do modelo de crescimento baseiem-se em proposições biológicas, há relativamente poucas investigações da relação real entre valores estimados dos parâmetros do modelo de crescimento e os fatores do ambiente e do metabolismo. Além disso, Korol *et al.* (1997) destacaram que, com a possibilidade de mudanças significativas no clima em escala global, é necessário desenvolver modelos de crescimento e produção, incluindo uma variável climática, que possa responder potencialmente a essas mudanças.

Segundo Puchalski *et al.* (2006) a estrutura demográfica da araucária está associada às condições de clima e de solo encontrados nos seus locais de ocorrência. Desta maneira, esses autores observaram que os descritores climáticos mais importantes na variação total entre os locais de ocorrência desta espécie foram as temperaturas médias, o número de geadas, a umidade relativa do ar e o número de horas de sol (fotoperíodo).

Zanon (2007) realizou estudo na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, no município de São Francisco de Paula, RS a fim de analisar o crescimento de indivíduos de povoamentos adultos de *Araucaria angustifolia* e correlacionar esse crescimento com variáveis climáticas. Com isso, a autora concluiu que as variáveis meteorológicas temperatura e precipitação estão diretamente correlacionadas com o crescimento, sendo que a ocorrência de precipitação acompanhada de baixas temperaturas colabora para a redução nas taxas de crescimento.

Em estudo sobre manejo de *Pinus taeda* baseado em características do meio físico, Bognola (2007) observou grande participação da variável climática precipitação média nas diferenças de crescimento dessa espécie, seguida de temperatura mínima média e máxima médias.

Ferreira e Couto (1981) estudando a influência de variáveis ambientais no crescimento em altura de oito espécies de *Eucalyptus* nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, concluíram que a altitude do local foi a variável que mais influenciou o crescimento em altura, sendo o déficit hídrico pouco representativo, influenciando apenas *E. urophylla*; já as variáveis temperatura média e precipitação anual não apresentaram influência no crescimento em altura das espécies analisadas.

### 3.3. MODELAGEM BIOLÓGICA

A estimativa do crescimento e da produção presente e futura de árvores e povoamentos florestais é uma etapa essencial para viabilizar o planejamento da atividade florestal (PRODAN *et al.*, 1997). Neste contexto, a modelagem da relação biológica entre crescimento e produção é uma ferramenta útil para a determinação do crescimento e da produção, ressaltando a necessidade de se obter relações cada vez mais eficientes na representação da realidade (SCOLFORO, 1998).

Segundo Turnbull (1963) e Prodan *et al.* (1997) um modelo é uma forma de simplificar um processo natural, permitindo seu estudo e análise. Para esses autores a aplicação de modelos biológicos é de grande importância nos estudos de crescimento, sendo a principal diferença entre um modelo empírico e um biológico é que o primeiro é apenas uma expressão matemática de uma relação entre as variáveis, já um modelo biológico é a expressão precisa de uma hipótese sobre a biologia do processo de crescimento.

Apesar de atualmente existirem métodos mais compreensíveis e flexíveis de modelagem computadorizada, os quais utilizam ferramentas como programação dinâmica, equação de base diferenciada e redes neurais, o uso de equações de crescimento é cada vez mais usual, visto que além do seu papel independente de descrever tendências de longo tempo como o envelhecimento, essas equações servem como base para a construção de modelos de computador (ZEIDE, 1993).

Campos e Leite (2006) afirmaram que modelos com relações funcionais  $Y = f(I)$  possuem aplicação limitada, porém, quando aplicados em populações homogêneas e de pequenas áreas apresentam resultados satisfatórios. Além disso, Scolforo (2006) afirmou que apesar da desvantagem da estimativa dos parâmetros desses modelos se dar pelo ajuste não-linear, eles possuem grande potencial e eficiência em suas estimativas. Para Zeide (1993) uma equação de produção adequada é aquela que define corretamente a tendência de crescimento ao longo dos dados observados, além de separar o essencial do acidental.

Vários modelos biológicos vêm sendo utilizados no setor florestal ao longo dos anos, dentre eles pode-se citar os modelos de Chapman-Richards, Gompertz, Logística e Monomolecular. Turnbull (1963) foi o primeiro a aplicar os modelos biológicos no âmbito florestal. Segundo esse autor, as formas matemáticas das



funções utilizadas em florestas convencionais até então eram empíricas, visto que a base dessas funções – linear, parabólica, etc. – é algébrica ou geométrica, não tendo relação imediata com o crescimento biológico.

Baseado nesse pressuposto e aliado ao fato de que a curva de produção representa a integral da curva de incremento, Turnbull (1963) aplicou os modelos biológicos desenvolvidos para estudos com diversos fins em dados de origem florestal, concluindo que o modelo de Chapman-Richards, por sua flexibilidade, poderia ser aplicado com sucesso em estudos de crescimento e produção na área florestal, como por exemplo, em dados de povoamentos de pinus. Machado (1978) foi o primeiro no Brasil a aplicar o modelo biológico de Chapman-Richards para ajustar o crescimento em área basal a partir de dados de parcelas permanentes de povoamentos de *Pinus taeda* no Paraná, obtendo bons resultados de ajuste.

Segundo Zeide (1993) a equação de crescimento e produção de Chapman-Richards possui grande flexibilidade de aplicação. Essa função é valorada por sua acurácia e é mais usada que qualquer outra função em estudos de crescimento de árvores. O modelo de Chapman-Richards possui as características adequadas para o ajuste do crescimento de qualquer variável biológica, descrevendo o início de crescimento na origem, acelerado ritmo inicial de crescimento, um ponto de inflexão e a partir deste, o ritmo de crescimento decresce e, finalmente, tende a um valor assintótico (TEMPS, 2005). Além disso, Piennar e Turnbull (1973) já haviam constatado em seu estudo que este modelo é capaz de descrever, adequadamente, o crescimento individual de árvores.

O modelo de produção e crescimento de Gompertz teve como primeira aplicação a descrição da distribuição de idades da população humana. Contudo em 1978 esse modelo foi aplicado em um estudo com três espécies de árvores, demonstrando flexibilidade suficiente para justificar seu uso (ZEIDE, 1993).

A equação Logística é largamente utilizada em estudos ecológicos. Isto se deve a características tais como, o ponto de inflexão da equação corresponder à metade do tamanho final da curva e do crescimento relativo da equação decrescer linearmente com o tamanho (ZEIDE, 1993).

Piennar (1965) afirmou que os modelos Logístico, Gompertz e Monomolecular representam na verdade um caso específico do modelo de Chapman-Richards uma vez que este último apresenta o coeficiente “m” variável, tornando-se bastante flexível para estudos de crescimento e produção e ainda

sendo o mais adequado para estudos onde a densidade inicial do povoamento é variável, uma vez que o valor de “m”, ou ainda ponto de inflexão da curva de produção, é menor a medida que a densidade inicial do povoamento é maior.

Para a modelagem do crescimento de candeia, Silva (2009) testou os modelos biomatemáticos, Monomolecular, Logístico, Gompertz e Chapman-Richards. Esse autor concluiu que o modelo que representou melhor a projeção do diâmetro, da altura total, da área de cobertura da floresta e do volume ao longo do tempo foi o Monomolecular, pois os outros modelos analisados tenderam a estabilizar o crescimento do diâmetro a partir dos 8 anos. Outro ponto que refletiu a escolha do modelo monomolecular segundo esse autor, foi a ausência do ponto de inflexão da curva, presente nos outros modelos, sendo a circunferência mínima de medição de 9,0 cm, onde o ponto de inflexão já havia ocorrido ou era inexistente.

Cruz (2005) utilizou o modelo de Chapman-Richards para estudar o crescimento em diâmetro médio, altura total, altura dominante, área basal e volume de *Tectona grandis* Linn. F. na região de Tangará da Serra, MT, obtendo bons resultados de estimativa. Essa autora concluiu que o realismo biológico e qualidade do ajuste obtido, permitem inferir que o modelo de Chapman-Richards é adequado para descrever o crescimento de teca.

Floriano *et al.* (2006) aplicaram modelos de diferentes naturezas para o ajuste do crescimento em altura de 64 árvores de *Pinus elliottii* Engelm. Com o auxílio dos critérios qualitativos de seleção e levando em conta a ligação do modelo com o processo estudado, sua interpretabilidade e compreensibilidade, esses autores definiram o modelo de Chapman-Richards como o mais adequado na estimativa do crescimento e produção em altura da espécie estudada.

### 3.4. MODELOS MECANÍSTICOS

A modelagem de crescimento somente é possível se uma perfeita adequação entre as medições dos povoamentos num inventário florestal e as variáveis ambientais, for criteriosamente providenciada em termos espaciais e temporais. Os modelos mecanísticos têm sido desenvolvidos na área florestal desde a década de 1970 e contribuem para a compreensão de como os fatores ambientais

afetam o crescimento, podendo auxiliar na definição da produtividade potencial em área sem histórico de cobertura florestal (MAESTRI, 2003).

Silva (2009) afirmou que, nas últimas décadas, mudanças básicas vêm ocorrendo na determinação dos estimadores da produção, e dentre essas mudanças observadas encontra-se a necessidade de se obter relações cada vez mais eficientes na representação da realidade, o que tem motivado inúmeras tentativas de inclusão de fatores ambientais, tais como fatores climáticos e edáficos em associação aos fatores biológicos na modelagem do crescimento e produção.

Para Johnsen *et al.* (2001) a modelagem do crescimento em florestas é a representação matemática de sistemas biológicos que incorporam o entendimento fisiológico e ecológico em algoritmos previsíveis. Segundo esses autores, o desenvolvimento de modelos que envolvam esses conceitos é uma atividade difícil, devido à variação das condições do clima, aos diferentes estágios de crescimento das árvores e à mudança na disponibilidade de recursos para o desenvolvimento destas. Contudo a importância no ajuste de tais modelos se dá à medida que se comprova que as mudanças climáticas podem impactar as florestas em diferentes aspectos, já que as mudanças no crescimento de florestas podem diferir na dinâmica esperada para os povoamentos, como competitividade e mortalidade (SOUZA, 2004).

Modelos baseados no clima sugerem que a mudança climática global pode influenciar o crescimento das árvores, tornando-se necessário desenvolver modelos de crescimento e produção, incluindo variáveis climáticas, que possam responder a essas mudanças (TEMPS, 2005). Estudos que avaliem a influência das variáveis ambientais no crescimento de indivíduos de *Araucaria angustifolia*, bem como o comportamento da distribuição do crescimento durante o ano vegetativo de crescimento são muito importantes, visto a necessidade de preservação desse genótipo florestal, que requer informações básicas passíveis de serem utilizadas em planos de manejo para a recuperação desse ecossistema (ZANON, 2007).

Com o objetivo de definir um modelo de crescimento para o Ipê-felpudo em função das variáveis do povoamento e climáticas em Linhares, no Espírito Santo, Souza (2004) desenvolveu modelos para seis experimentos com diferentes espaçamentos de plantio, os quais contem como variáveis climáticas mais frequentes, o inverso da deficiência hídrica acumulada, a precipitação acumulada e

o logaritmo natural da precipitação acumulada, sendo os coeficientes de determinação dessas equações superiores a 0,93.

Silva *et al.* (2004) relacionaram as variáveis de crescimento com as variáveis bioclimáticas para espécies do cerrado na Fazenda Experimental da UFMT, por meio de análise de regressão linear para ajuste de modelos de crescimento. De um modo geral, esses autores observaram baixa correlação entre as variáveis de crescimento e as variáveis climáticas. Segundo esses autores, esse resultado normalmente ocorre em condições tropicais, onde as variações da temperatura, precipitação, radiação solar e outros fatores climáticos são considerados como de menor significância ecológica que em regiões temperadas.

Temps (2005) utilizou o procedimento da eliminação das variáveis “backward” a fim de ajustar modelos de incremento corrente anual de altura dominante de *Pinus taeda*. Desta maneira, esse autor verificou que a precipitação média foi a variável que melhor explicou a variável dependente, a qual apresentou um coeficiente de determinação entre 0,51 e 0,53. Além disso, esse autor fez análise gráfica com o objetivo de confirmar a relação observada na regressão, obtendo comportamento semelhante para ambas as técnicas de análise. Temps (2005) ainda observou que com a inclusão da variável climática no modelo de crescimento e produção, os dados ajustados apresentaram um ganho significativo na prognose da altura dominante, atingindo uma redução do erro padrão da estimativa absoluta de 0,53 m para 0,49 m, o que representou um ganho de 7,5% em precisão.

Maestri (2003) também obteve resultados positivos com a inclusão de variáveis ambientais na determinação do crescimento em altura dominante para povoamentos clonais de híbridos naturais de *Eucalyptus grandis* implantados no norte do Espírito Santo e Sul da Bahia. Segundo esse autor, a redução no erro padrão da estimativa pela incorporação de variáveis do ambiente no modelo de altura dominante alcançou 30,4%, qualificando a metodologia desenvolvida.

### 3.5. ANÁLISE MULTIVARIADA

A análise de fenômenos físicos, muitas vezes complexos, requer a coleta e análise simultânea de observações de muitas variáveis diferentes, as quais ao longo do processo interativo são adicionadas e removidas do estudo gerando uma análise

modificada do fenômeno em estudo (JOHNSON e WICHERN, 2007). Neste contexto, os métodos de estatística multivariada são utilizados com o propósito de simplificar ou facilitar a interpretação do fenômeno que está sendo estudado por meio da construção de índices ou variáveis alternativas que sintetizem a informação original dos dados (BOGNOLA, 2007).

Segundo Mingoti (2005) a análise multivariada também consiste de métodos utilizados para a construção de grupos de elementos amostrais que possuam similaridade entre si, possibilitando a segmentação do conjunto de dados originais, e viabilizando a investigação das relações de dependência entre as variáveis respostas associadas ao fenômeno e outros fatores (variáveis explicativas), muitas vezes, com objetivos de predição. Adicionalmente, essa estatística ainda se mostra útil para comparar populações ou validar suposições com testes de hipóteses.

Quando um conjunto de dados é composto de inúmeras variáveis, a identificação de quais são as mais expressivas para a explicação das variações do sistema, recai em um problema típico tratado pelas técnicas de estatística multivariada. Os dados de variáveis aleatórias, por meio de procedimentos de álgebra matricial, são explorados de forma a se conhecer melhor sua capacidade de representação de um sistema aleatório qualquer (MAESTRI, 2003).

Na área florestal, comumente ocorre a medição de diversas variáveis por unidade amostral o que, segundo Queiroz (1984), se justifica pelo fato de que na maioria dos casos, nenhuma delas consegue caracterizar individualmente de maneira adequada essa unidade. Nos últimos anos, com a crescente demanda de pacotes estatísticos computacionais mais refinados, tem aumentado de um modo geral, o número de trabalhos publicados no Brasil usando as técnicas multivariadas (LIMA JUNIOR, 2006). Neste contexto, Ferreira e Souza (1997) descreveram as potencialidades do uso das técnicas multivariadas para fins de manejo florestal, utilizando a análise fatorial, componentes principais, discriminante, agrupamento, entre outros.

Segundo Burton *et al.*<sup>1</sup> (1991, citado por LIMA JUNIOR, 2006), as técnicas estatísticas multivariadas têm sido amplamente empregadas em estudos envolvendo simultaneamente variáveis de clima, solo, relevo, vegetação e geologia na

---

<sup>1</sup> BURTON *et al.* Use of multivariate methods in forest research site selection. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v.21, p.1573-1580, 1991.

classificação de áreas com cobertura florestal. Essas técnicas são utilizadas com objetivos básicos de ordenamento, visando determinar a influência de fatores do meio na composição e produtividade do local, e de agrupamento, com o propósito de classificação.

Scolforo (1997) enfatizou a análise multivariada como uma ferramenta eficiente na estimativa da qualidade de sítio, no entanto, pela sua complexidade, não tem sido implementada pelos pesquisadores de forma geral. Neste procedimento, faz-se uso de estatística multivariada, a qual possibilita interpretar um conjunto de vários fatores ao mesmo tempo. Identificados os fatores que melhor explicam a produtividade, pode-se então promover a classificação do mesmo. Além disso, ao identificar os fatores limitantes do sítio para determinada espécie, surgem as oportunidades ao silvicultor para intervir no manejo desde o plantio até a colheita.

Dentre os diversos objetivos de investigação das técnicas de análise multivariada, podem-se identificar dois principais, são eles: técnicas exploratórias de sintetização (simplificação) ou de unificação da estrutura de variabilidade dos dados; e técnicas de inferência estatística (MINGOTI, 2005). Fazem parte do primeiro objetivo, métodos como a Análise de Componentes Principais e a Análise de Agrupamento (*Cluster Analysis*).

### 3.5.1 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é um método exploratório para avaliação da variabilidade de um conjunto de variáveis (JOHNSON e WICHERN, 2007) que tem o objetivo de reduzir a dimensionalidade do banco de dados, capturando num pequeno número de componentes principais a maior parte da variação das variáveis originais, facilitando a interpretação de dados multivariados, principalmente na sua visualização (NUNES, 2011). Em síntese, a ACP é um método que tem, por finalidade básica, a redução de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais.

A ACP frequentemente revela relacionamentos que não são previamente suspeitos e permite interpretações que poderiam não ocorrer ordinariamente (JOHNSON e WICHERN, 2007). Segundo Maestri (2003) a ACP é um potente

auxílio na formulação de hipóteses a serem testadas quando associada a outras técnicas estatísticas tais como análise de regressão.

Scheeren e Finger (1998) estudaram o efeito dos nutrientes do solo e da copa no crescimento de um povoamento de *A. angustifolia* na Floresta Nacional de Canela, RS. Por meio da Análise de Componentes Principais, esses autores reduziram a dimensão da matriz de 54 variáveis (altura dominante, teores de nutrientes do solo e das acículas) para nove fatores comuns, que explicam 97% da variância total, verificando a existência do efeito das variáveis químicas do solo no crescimento em altura em diferentes locais, para a espécie estudada.

Carvalho *et al.* (1999) estudaram a influência das características do solo no crescimento e produção de *P. taeda*, por meio de técnicas estatísticas multivariadas como a “Análise de Componentes Principais – ACP”, e concluíram que o teor de argila do solo é um fator determinante no estabelecimento das classes de sítios.

Maestri (2003) utilizou a técnica de estatística multivariada de Análise de Componentes Principais – ACP para analisar o conjunto de todas as variáveis ambientais, obtendo tantas componentes (autovalores) quantas eram o número de variáveis. Assim, dentro de cada componente principal, a variável que apresentou o maior coeficiente (valor modular) foi escolhida e, na sequência, seguiu para o procedimento de modelagem do crescimento e produção.

Bognola (2006) utilizou a ACP para examinar as correlações entre as variáveis climáticas e identificar e ou eliminar aquelas que pouco contribuíram para o total da variação deste grupo, avaliando desta forma, as variáveis que possuem relação com a produtividade de *P. taeda* nas três áreas pilotos desse estudo.

Para determinar a relação entre os grupos fitossociológicos, características químicas do solo e declividade, Almeida (2010) utilizou o método multivariado de Análise de Componentes Principais (ACP). Com isso, esse autor classificou os grupos fitossociológicos encontrados em 3 intervalos de declividades: baixa ( $1 \geq 10^\circ$ ); média ( $15 \geq 30^\circ$ ); e alta ( $35 \geq 45^\circ$ ).

Nunes (2011) realizou uma análise de componentes principais para avaliar se florestas em distintos estágios sucessionais se separam em grupos distintos quanto às variáveis selecionadas no estudo (nº indivíduos; nº famílias; nº gêneros; nº espécies; H'; DAP; altura; classificação de cipós: ausência de cipós, poucos cipós e indivíduo coberto por cipós; classificação de luz: luz direta em toda copa, luz direta

em um dos lados e luz difusa; e hábitos de vida: árvore, cipós e palmeiras), obtendo bons resultados na utilização dessa estatística multivariada.

### 3.5.2 Análise de Agrupamento (*Cluster Analysis*)

A análise de agrupamento ou *Cluster Analysis* tem por finalidade reunir, por algum critério de classificação as unidades amostrais em grupos, de tal forma que exista homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre grupos (JOHNSON e WICHERN, 2007). Dentre as técnicas de agrupamento, a desenvolvida por Ward (1963) é fundamentada na “mudança de variação” entre os grupos e dentro dos grupos que estão sendo formados em cada passo do agrupamento (BOGNOLA, 2007). Com isso, o algoritmo segue até que se encontre a menor variação possível dentro dos grupos e haja a maior variação entre eles.

Gerhardt *et al.* (2001) estudaram a influência dos fatores físicos e morfológicos do solo e da qualidade de nutrientes da serapilheira, na classificação de sítios em um povoamento de *A. angustifolia* no Rio Grande do Sul. Para isto esses autores utilizaram a análise de agrupamento, onde obtiveram a formação de três grupos.

Zanon (2004) utilizou a análise de agrupamentos para diferenciar as 96 árvores amostradas de *A. angustifolia* de acordo com seus padrões de crescimento. Essa autora verificou a formação de dois grupos distintos, o G1 reuniu as árvores de maior incremento, maior vitalidade, e conseqüentemente árvores dominantes e co-dominantes. Já o G2 foi caracterizado por árvores de menor incremento, menor vitalidade, e pertencentes à classe das dominadas ou suprimidas. Partindo dessa separação, fez-se a modelagem do incremento em área basal de cada grupo, obtendo-se melhores estatísticas de ajuste e precisão do que se o modelo tivesse sido ajustado para o total do banco de dados.

Lima Junior (2006) fez a classificação do crescimento em diferentes idades para *Leucena leucocephala* (Lam.) de Wit., por meio da análise de agrupamentos, obtendo diferentes grupos que classificaram árvores com maiores e menores taxas de crescimento ao longo da variação da idade. Essa classificação ainda foi feita para dois tratamentos diferenciados pela presença ou não de composto de resíduo orgânico no solo.



Almeida (2010) realizou a classificação da vegetação, por meio do agrupamento de unidades (subparcelas) e espécies semelhantes. A análise de agrupamento foi realizada para cada estrato da vegetação, individualmente, e se mostrou uma eficiente ferramenta para essa finalidade.

Machado *et al.* (2010) verificaram por meio de análise de agrupamento a existência de diferentes grupos de acordo com a variação do crescimento mensal de altura e diâmetro de *P. taeda* e *A. angustifolia* no período de um ano vegetativo. Foi observado que a análise de agrupamento distinguiu os períodos de rápido e de lento crescimento, sendo em alguns casos identificado também um grupo que representa a fase intermediária de crescimento ao longo do período vegetativo.

### 3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. M. **Relação Solo-fitossociologia em um Remanescente de Floresta Estacional Decidual**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFSM, Santa Maria, RS, 2010. 74p.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study – Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands**. Oxford/ New York/ Toronto/ Sydney/ Braunschweig. Pergamon press, 1970. 506p.

BOGNOLA, I. A. **Unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico**. Tese (Doutorado). Setor de ciências Agrárias, UFPR. Curitiba, 2007. 180p.

BROWN, C. L. Growth and Form. In: ZIMMERMANN, M. H.; BROWN, C. L. (Ed.) **Trees Structure and Function**. Nova York: Spring-Verlag, 1974. 336p.

CAMPOS, J. C. C. Principais fatores do meio que afetam o crescimento das árvores, **Revista Floresta**, v. 2, n. 3, p.45-52, 1970.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas – 2. ed. rev. E ampl. – Viçosa: Ed. UFV, 2006. 470p.**

CARVALHO, A. P.; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E. B.; MACHADO, S. A.; POTTER, R. O.; FASOLO, P. J.; FERREIRA, C. A.; BARTOSZECK, A. C. P. S. Efeito de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim da Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 51-66, 1999.

CRUZ, J. R. da M. S. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* na região de Tangará da Serra - Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFV, Viçosa, MG, 2005. 45 p.

FERREIRA, C. A.; COUTO, H. T. Z. A influência de variáveis ambientais no crescimento de espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. **Boletim da Pesquisa Florestal**, Colombo, n.3, p. 9-35, dez. 1981.

FERREIRA, R. L. C.; SOUZA, A. L. **Técnicas de análise multivariada aplicadas ao manejo florestal no Brasil**. Sociedade de Investigações Florestais. Viçosa, MG: SIF, 1997. 21p.

FLORIANO, E. P.; MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Ajuste e seleção de modelos tradicionais para série temporal de dados de altura de árvores. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 177-199, 2006.

FRITZ, H. C. **Tree rings and climate**. Academic Press inc., Nova York, 1976. 567 p.

GERHARDT, E. J.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. J.; SCHUMACHER, M. V. Contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 41-57, 2001.

HESS, A. F.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em função da idade, em três regiões do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.19, n.1, p. 7-22, jan-mar., 2009.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest Mensuration**. 3a ed., John Wiley & Sons. New York: 1982. 402p.

JOHNSON, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; MCNULTY, S.; FOX, T. Process models as tools in forestry research and management. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 1, p. 2-8, 2001.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6a ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey: 2007. 773p.

KOROL, R. L.; MILNER, K. S.; RUNNING, S. W. Testing a mechanistic model for predicting stand and tree growth. **Forest Science**, Bethesda, v. 42, n. 2, p. 139-153, 1997.

LIMA JUNIOR, L. M. **Utilização de técnicas multivariadas na classificação de fases de crescimento da leucena**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Estatística e Informática. UFRPE. Recife. 2006. 78p.

MACHADO, S. A. **Studies in growth and yield estimation for *Pinus taeda* L. plantations in the State of Paraná.** Tese (Doutorado). University of Washington, 1978. 170 p.

MACHADO, S. A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R.; NASCIMENTO, R. G. M; QUIRINO, S. M. S; TEO, S. J. Dinâmica de crescimento de plantios jovens de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 165-170, mai/jul. 2010.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais.** Tese (Doutorado). Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Curitiba. 2003. 143p.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297p.

NUNES, S. S. S. **Estimativas de biomassa e carbono e indicadores para restauração de florestas secundárias em Paragominas, Pará.** Dissertação (Mestrado). Programa Recursos Florestais, USP. Piracicaba. 2011. 126p.

PÉLISSIER, R.; PASCAL, J. P. Two-year tree growth patterns investigated from monthly girth records using dendrometer bands in a wet evergreen forest in India. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, p. 429-446, 2000.

PIENAAR, L. V. **Quantitative theory of forest growth.** Tese (Doutorado). University of Washington, 1965.167p.

PIENAAR, L. V.; TURNBULL, K. J. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. **Forest Science**, v. 19, n. 1, p. 2-22, 1973.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal.** San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1997. 586p.

PUCHALSKI, A.; MANTOVANI, M.; REIS, M. S. Variação em populações naturais de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. associada a condições edafo-climáticas. **Scientia forestalis**, Piracicada, n.70, p. 137-148, abril 2006.

QUEIROZ, W. T. O uso da análise multivariada nos levantamentos florestais. In: **II Simpósio sobre Inventário Florestal**, 1984, São Paulo. II Simpósio sobre Inventário Florestal. PIRACICABA-SP: Gráfica da ESALQ/USP, 1984. v. Único. p. 103-106.

SCHEEREN, L. W.; FINGER, C. A. G. Efeito dos elementos químicos do solo e da copa no crescimento em altura de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., na região de Canela, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, n.29, out-1998.

SILVA, G. J.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; BRAUWERS, L. R.; DURAN, J. A. R. Avaliação de plantas adultas de espécies arbóreas do cerrado em função do clima. **Revista Agricultura Tropical**, Cuiabá, v.8, n.1, p.43-56, 2004.

SILVA, C. P. de C. **Crescimento e produção da candeia em plantio sujeito a diferentes espaçamentos e podas**. Dissertação (Mestrado). Lavras, MG: UFLA, 2009. 131p.

SOUZA, C. C. **Modelo de crescimento, com variáveis ambientais, para o ipê felpudo em diferentes espaçamentos**. Dissertação (mestrado), Mestrado em Recursos Florestais, Esalq, USP. Piracicaba, 2004. 96p.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 438p.

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

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

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** Dissertação (Mestrado), Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Curitiba, 2005. 117p.

TURNBULL, K. J. **Population dynamics in mixed forest stands. A system of mathematical models of mixed stand growth and structure**. Tese (Doutorado). University of Washington, 1963.186p.

ZANON, M. L. B. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. diferenciado por dioicia**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em

Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. 110p.

ZEIDE, B. Analysis of Growth Equation. **Forest Science**, Bethesda, v. 39, n. 3, p.594-616. August, 1993.

WARD, J. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **J. of Amer. Statistical Association**, n.58, p. 236-244, 1963.

#### 4. AVALIAÇÃO E MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE POVOAMENTOS JUVENIS DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*

##### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento da produção e do crescimento mensal de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L. no período de seis anos vegetativos, acompanhar a evolução do crescimento mensal com o avanço da idade e ajustar modelos biomatemáticos que representassem a produção mensal dessas espécies. Para tanto, foram selecionadas aleatoriamente 30 árvores de cada espécie, as quais se localizam em plantios nos municípios de Curitiba e Campina Grande do Sul. No início de cada mês, no período de junho de 2006 a agosto de 2012, foram medidas as variáveis diâmetro e altura. Foram ajustados os modelos biomatemáticos de Chapman-Richards, Gompertz, Logístico e Monomolecular para a produção mensal dos seis anos vegetativo e também para a produção total. A análise de agrupamentos foi utilizada para definição de grupos com períodos de crescimento semelhantes ao longo do ano. As curvas de produção de ambas as espécies e variáveis apresentaram forma sigmoideal, demonstrando o mesmo comportamento das curvas de produção ano a ano. Os modelos biológicos apresentaram estatísticas de ajuste e precisão satisfatórias, tendo sido selecionado o de Chapman-Richards como o mais apropriado para expressar os dados. Pode-se verificar por meio das curvas de produção mensal e anual que o plantio de *A. angustifolia* ainda encontra-se em fase juvenil de desenvolvimento, não sendo observado o mesmo para *P. taeda* que já encontra-se em fase adulta. A análise de agrupamentos mostrou a formação de três grupos, que representam padrões distintos de incremento durante o ano. A fase de maior incremento durante o período vegetativo ocorreu em média de setembro a abril para as duas espécies, seguindo com menores taxas até cessação do crescimento (dormência) que ocorreu entre os meses de maio e agosto.

**Palavras-chave:** incremento corrente mensal, modelagem biológica, estação de crescimento.

##### ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the behavior of the monthly growth and yield of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze and *Pinus taeda* L. in the period of six years, to monitor the evolution of the monthly growth with the increasing of age and to adjust biomathematics models that represent the monthly yield of these species. For this, they were randomly selected 30 trees of each specie, which are located in Curitiba and Campina Grande do Sul. In the beginning of each month, during June of 2006 and August of 2012, they were measured the diameter and height. Biological models of Chapman-Richards, Gompertz, Logístico and Monomolecular were adjusted for the monthly yield of the six vegetative years, and

also, for the annual yield. A Cluster analysis was carried out to define the presence of groups with similar growth pattern over the years. The results indicated that the monthly yield curves of both species and variables showed sigmoidal form, which demonstrated the same behavior of annual yield curves. The biological models showed satisfactory statistics of adjustment and precision, and the Chapman-Richards was the selected as the most appropriated to express the data. It was possible to verify through the monthly and annual growth yield that *A. angustifolia* plantation are still in young stage of development and *P. taeda* plantation already reached adult stage. The Cluster analysis showed the formation of three groups which represent distinct patterns of growth during the year. The phase of greatest growth during the vegetative period occurs, in average, from September to April for both species with lower rates, and even cessation of growth (dormancy) occurring between May and August.

**Key words:** current monthly growth, biological modeling, growing season.



## 4.1 INTRODUÇÃO

O crescimento das árvores consiste no acréscimo de camadas celulares na raiz, tronco e galhos, modificando o tamanho e a forma dessas plantas. Esse crescimento se dá de forma diferenciada no decorrer da vida dos vegetais, sendo mais acelerado na juventude, o que possibilita a capacidade de competição e estabelecimento da planta na população e mais lento com o passar dos anos, até atingir uma taxa mínima de incremento, quando a planta se aproxima de sua assíntota, ou seja, seu tamanho máximo de crescimento.

O comportamento do crescimento biológico das plantas no decorrer da vida, dá-se de acordo com a Lei dos Rendimentos Decrescentes, apresentando-se a curva de produção na forma sigmoideal. Entender esse comportamento, aliado a modelos biomatemáticos que o expressem de forma adequada, é fundamental para a aplicação de práticas de manejo convenientes, como desbaste, poda, tratos culturais e corte raso em povoamentos florestais. Além disso, com a redução do ciclo de rotação dos povoamentos florestais, decorrente do melhoramento genético e outras tecnologias, modelos matemáticos que expressem esse crescimento considerando o mês como unidade de tempo é uma demanda crescente e tem se tornado uma ferramenta importante no manejo florestal.

Desta forma, verificou-se que apesar do amplo e sólido conhecimento sobre o crescimento das árvores ao longo de sua vida, pouco se sabe a respeito do comportamento da curva de produção dentro de um ano vegetativo. Pressupõe-se apenas que no inverno o ritmo de crescimento decresce e no verão este se apresenta de forma acelerada podendo, portanto, estar correlacionado com o comportamento do crescimento biológico durante toda a vida do indivíduo.

Com isso, estudos sobre a maneira como a curva de produção se comporta no período de um ano vegetativo nos organismos, e se este comportamento se ajusta a modelos biomatemáticos de crescimento da mesma forma que relações ano a ano, tornam-se relevantes para o acréscimo de conhecimento científico sobre o assunto e viabilização da sua aplicabilidade no manejo florestal.

Desta forma, após evidenciada essa demanda e lacuna existente no conhecimento científico, o objetivo deste trabalho foi analisar e modelar o

comportamento do crescimento e da produção mensal e anual de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L. no período de seis anos vegetativos.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1 Área de estudo

Os dados utilizados foram provenientes de plantios de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* localizados, respectivamente, nos municípios de Campina Grande do Sul e Curitiba, estado do Paraná (FIGURA 4.1).

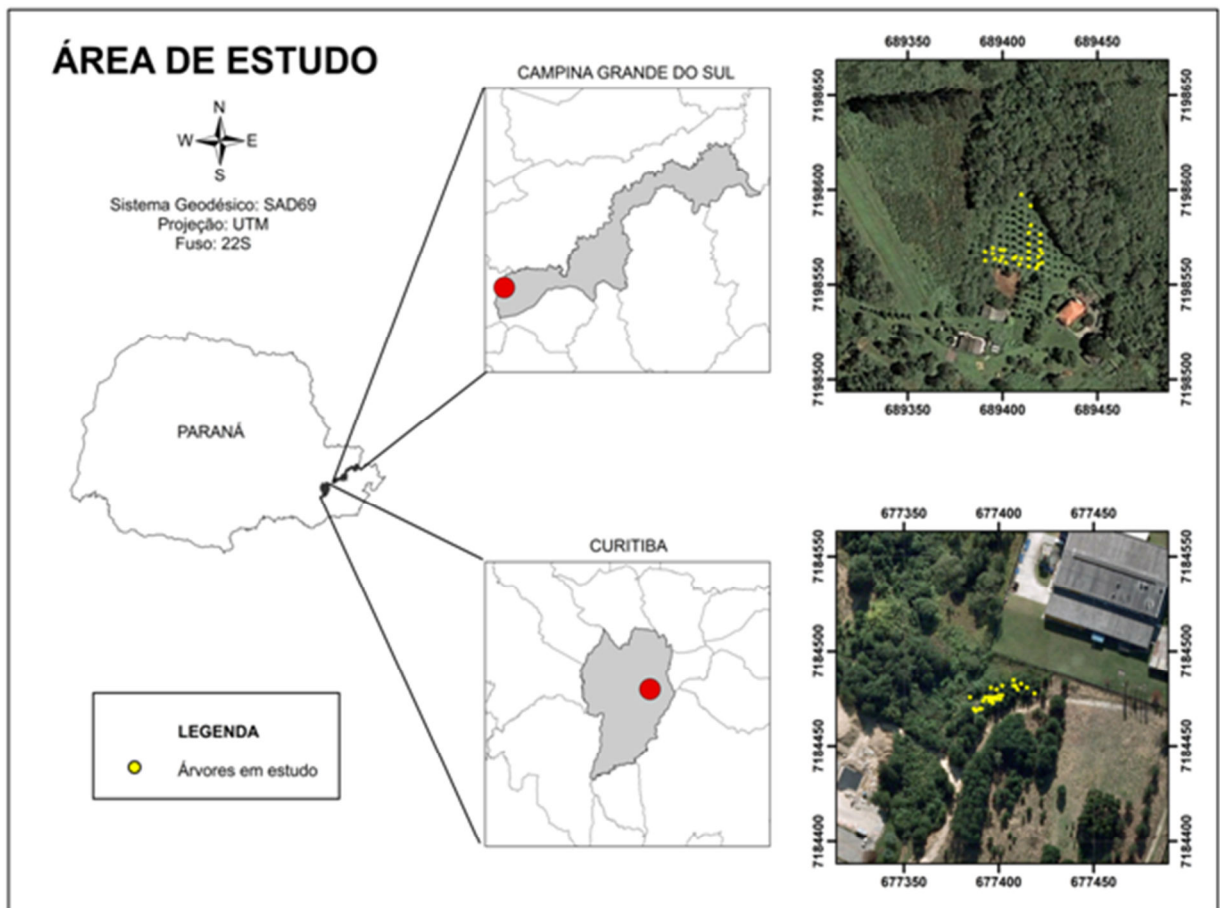


FIGURA 4. 1 – LOCALIZAÇÃO DOS PLANTIOS DE *Araucaria angustifolia* EM CAMPINA GRANDE DO SUL E DE *Pinus taeda* EM CURITIBA, ESTADO DO PARANÁ.

FONTE: O autor (2013).

O município de Campina Grande do Sul encontra-se localizado no primeiro planalto paranaense, a uma altitude de 918 metros s.n.m. Esse município está inserido na Região Metropolitana de Curitiba a aproximadamente 27 km da capital paranaense. O clima predominante da região é o tipo Cfb, segundo classificação de

Köppen, também denominado clima temperado subtropical, com temperaturas amenas e agradáveis ao longo do ano. De acordo com estações meteorológicas do SIMEPAR, no período de junho de 2006 a julho de 2012, a precipitação média anual do local foi de 1692,10 mm, com médias de temperatura máxima de 22,94°C e mínima de 12,75°C. As coordenadas geográficas do plantio de *A. angustifolia* alvo deste estudo são de 25°19,073'S e 49°07,123'W, local classificado como sítio bom (Sítio I, de um total de VII classes), de acordo com classificação de De Hoogh (1981).

O município de Curitiba, capital paranaense, também está localizado no primeiro planalto do estado do Paraná distando cerca de 90 km do Oceano Atlântico a uma altitude de 934 metros sobre o nível do mar (s.n.m). O clima do município é do tipo Cfb, de acordo com a classificação de Köppen, com verões amenos e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A precipitação média anual na região de Curitiba para os seis anos deste estudo foi de 1527,33 mm, com média de temperatura máxima de 23,66°C e mínima de 13,57°C de acordo com estações meteorológicas do SIMEPAR. O plantio de *P. taeda* estudado encontra-se sob as coordenadas geográficas de 25°14,568'S e 49°0,7555'W, tendo sido categorizado como sítio II de uma classificação de I a V realizada por Scolforo e Machado (1988).

#### 4.2.2 Coleta de dados

Foram selecionadas para realização deste estudo 30 árvores de *A. angustifolia* com espaçamento 4 x 4 m e 30 árvores de *P. taeda* com espaçamento 3 x 3 m. Estas árvores foram analisados, mensalmente, no período de 1 a 6 anos de idade para a primeira espécie e de 2 a 7 anos para a segunda.

A seleção das árvores ocorreu de forma aleatória cobrindo toda a distribuição de classes diamétricas, sempre analisando o estado fitossanitário dos indivíduos e características morfológicas desfavoráveis ao estudo como bifurcação, tortuosidade, fatores que as excluíram automaticamente da seleção. Todas as árvores selecionadas receberam uma plaqueta metálica com numeração distinta, permitindo, desta maneira, um melhor controle e individualização das árvores em análise.

Ao início de cada mês, no período de junho de 2006 a agosto de 2012, mediram-se o diâmetro a 10 cm do solo (D10cm) no plantio de *A. angustifolia* e diâmetro a 1,3 m do solo (DAP) no plantio de *P. taeda*, com uso de paquímetro até os diâmetros atingirem 6 cm e, posteriormente, com fita métrica graduada em milímetros. Na utilização do paquímetro eram feitas duas medidas ortogonais, das quais se extraiu a média aritmética. O local de medição do diâmetro foi marcado com um gabarito e tinta spray, de forma que todas as medidas fossem realizadas na mesma altura. O diâmetro da *A. angustifolia* foi tomado a 10 cm do solo pelo fato da altura das árvores ser inferior a 1,3 m por ocasião do início das medições em 2006, ao primeiro ano de idade. Para a mensuração da variável altura utilizou-se régua altimétrica com precisão de 1 cm, em ambos os plantios analisados. A FIGURA 4.2 apresenta a sistematização realizada para a obtenção dos dados em campo.

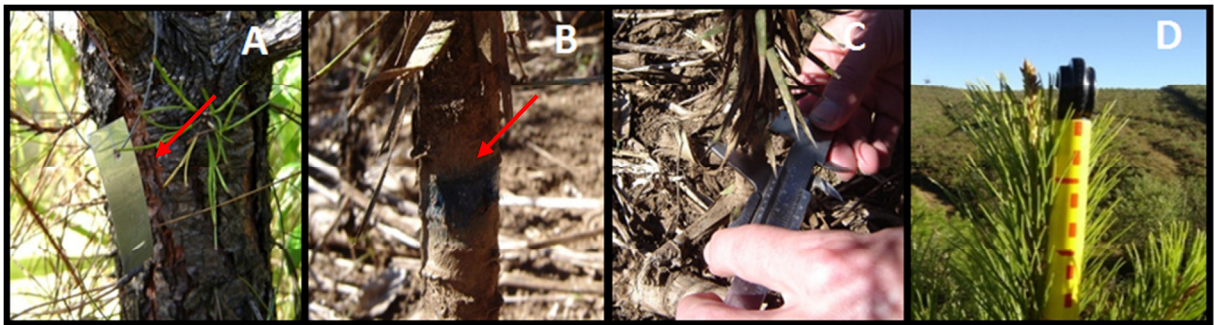


FIGURA 4. 2 – COLETA DE DADOS, ONDE: A) MARCAÇÃO DAS ÁRVORES COM PLAQUETA METÁLICA; B) MARCAÇÃO DO LOCAL DE MEDIÇÃO DO DIÂMETRO COM TINTA SPRAY; C) MEDIÇÃO DO DIÂMETRO COM PAQUÍMETRO; D) MEDIÇÃO DA ALTURA COM RÉGUA ALTIMÉTRICA.

FONTE: O autor (2013).

#### 4.2.3. Modelagem biológica

Os modelos biomatemáticos de crescimento e produção utilizados para ajuste do crescimento e produção mensal e anual foram os de relações funcionais  $Y = f(I)$  (Campos e Leite, 2006); dentre eles estão os modelos de Chapman-Richards, Gompertz, Logístico e Monomolecular (TABELA 4.1). Esses modelos foram ajustados minimizando a soma dos quadrados dos resíduos por meio do aplicativo SOLVER do *Microsoft Excel*® 2007.

TABELA 4. 1 – MODELOS BIOMATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA O AJUSTE DA PRODUÇÃO MENSAL EM DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*, PARA OS SEIS ANOS AVALIADOS.

Autor	Modelo biomatemático
Chapman-Richards	$Y = A(1 - e^{-kt})^{\frac{1}{1-m}}$
Gompertz	$Y = A(e^{-be^{-kt}})$
Logístico	$Y = \frac{A}{(1 + be^{-kt})}$
Monomolecular	$Y = A(1 - e^{-kt})$

ONDE: Y = DIÂMETRO (CM) OU ALTURA (M) DA ÁRVORE; T = TEMPO (MESES) CONTADO A PARTIR DO INÍCIO DO ANO VEGETATIVO; A, B, M, K = PARÂMETROS A SEREM ESTIMADOS; E = CONSTANTE DE EULER.

FONTE: O autor (2013)

A seleção do modelo mais eficiente para cada variável nos seis períodos vegetativos e para cada espécie foi baseada no coeficiente de determinação ajustado e corrigido ( $R^2_{aj}$ ), no erro padrão da estimativa em percentagem ( $Sy_x\%$ ) e na análise gráfica dos resíduos. Para o ajuste dos modelos, foram feitos testes para determinar o mês inicial da curva de produção ao longo de um ano vegetativo para cada espécie, onde avaliou-se a forma e padrão da curva de produção com a alteração do mês de início do crescimento. Desta forma, tomou-se como mês inicial o mês de julho para *A. angustifolia* e o mês de junho para *P. taeda*. Após definido o mês de início, foram atribuídos valores aos meses, variando de 0 a 12, sendo essas as variáveis independentes no ajuste dos modelos de produção mensal. Segundo Brown (1974) e Encinas *et al.* (2005) esse período é conhecido como estação ou época de crescimento. A estação de crescimento é um exemplo de ciclos de eventos, ou seja, eventos que se repetem em certos intervalos de tempo mais ou menos contínuos.

O ajuste dos modelos para a produção anual de diâmetro e altura das espécies analisadas foi realizado considerando a idade, em anos, como unidade de tempo, nesse caso foram selecionados apenas os valores acumulados do final de cada período vegetativo para determinação da produção anual e do incremento corrente e médio anual das espécies estudadas.

#### 4.2.4. Análise do crescimento mensal e anual

Para a análise do crescimento e produção mensal e anual, foram desenvolvidas curvas de produção e crescimento a partir do modelo biológico de melhor ajuste ao banco de dados, a fim de comparar a variação no comportamento do crescimento a cada ano e a cada mês de medição, assim como comparar o comportamento do crescimento mensal com a curva de produção anual dos indivíduos.

Adicionalmente, foi realizada a análise de agrupamentos pelo método de Ward (1963), utilizando o programa *Statistica 7.0*, onde foram inseridos os dados de incremento corrente mensal em diâmetro e altura de cada espécie separadamente, de forma a identificar, dentro do ano vegetativo, a existência de meses com crescimento homogêneo ao longo dos anos avaliados, além da construção de gráficos de incrementos correntes mensais médios (ICM) em percentagem, para interpretação dos períodos de maior e menor crescimento das espécies no decorrer de um ano.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. Modelagem Biológica

Os resultados de ajuste dos quatro modelos biomatemáticos aos dados de diâmetro e altura de *A. angustifolia* e *P. taeda* estão apresentados na TABELA 4.2. Nela podem-se observar os modelos ajustados para cada ano avaliado (1 a 7 anos de idade), considerando o mês como unidade de tempo, e, também, o ajuste para a produção total, ou seja, com a idade das árvores (em anos) como variável independente.

Foram observados, nos modelos testados para *A. angustifolia*, ajuste e precisão inferiores nos primeiros anos de medição, sendo que com o avanço da idade essas estatísticas apresentaram melhora. Segundo Brown (1974) e Fritz (1976) o período de crescimento cambial e em altura das árvores jovens ao longo do ano é maior do que o das árvores maduras. Dessa forma, o início e o final da curva de produção de um ano vegetativo, representado por menores taxas de crescimento, não ficam bem representados nos primeiros anos de vida da árvore, o que justifica a menor precisão dos modelos nessa fase.

Para o primeiro ano de medição de *A. angustifolia*, os indicadores de ajuste e precisão apresentaram-se inferiores, com  $R^2_{aj}$  por volta de 0,7 para diâmetro e 0,6 para altura, além de erros padrão da estimativa percentuais superiores a 35%. Isso pode estar relacionado ao fato de a planta ainda estar se estabelecendo ao local de plantio, e, dessa forma, apresentar um período crescente das taxas de crescimento muito curto (FRITZ, 1976), e com isso, não apresentar a característica forma sigmoideal nesse momento. Esses índices de ajuste no primeiro ano de medição não foram observados para o *P. taeda*, uma vez que esta espécie apresentava dois anos de idade no início das medições e, portanto, já havia se adaptado ao local de plantio, apresentando assim, um crescimento biológico padrão, com bons resultados no ajuste dos modelos.



TABELA 4. 2 - EQUAÇÕES DE PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*.  
Continua....

Idade	Variável	Modelo	<i>Araucaria angustifolia</i>			<i>Pinus taeda</i>			
			R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx%	R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx%	
1	D (cm)	Chapman-Richards	0,7388	0,1885	37,84	-	-	-	
		Gompertz	0,7399	0,1881	37,76	-	-	-	
		Logístico	0,7350	0,1899	38,11	-	-	-	
		Monomolecular	0,6809	0,2084	41,82	-	-	-	
	Ht (m)	Chapman-Richards	0,6412	0,2023	35,66	-	-	-	
		Gompertz	0,6447	0,2013	35,49	-	-	-	
Logístico		0,6638	0,1872	34,62	-	-	-		
2	D (cm)	Chapman-Richards	0,8852	0,2854	20,87	0,9659	0,3208	12,99	
		Gompertz	0,8801	0,2916	21,32	0,9667	0,3173	12,84	
		Logístico	0,8725	0,3007	21,98	0,9648	0,3261	13,20	
		Monomolecular	0,8860	0,2843	20,79	0,8451	0,6841	27,69	
	Ht (m)	Chapman-Richards	0,9475	0,1377	18,83	0,9312	0,2028	18,80	
		Gompertz	0,9481	0,1370	18,73	0,9326	0,2007	18,61	
		Logístico	0,9480	0,1371	18,75	0,9338	0,1988	18,43	
		Monomolecular	0,7635	0,2923	39,97	0,7975	0,3478	32,25	
	3	D (cm)	Chapman-Richards	0,9621	0,2216	11,85	0,9615	0,3575	13,46
			Gompertz	0,9624	0,2207	11,80	0,9610	0,3600	13,55
			Logístico	0,9588	0,2312	12,36	0,9568	0,3789	14,27
			Monomolecular	0,8919	0,3723	19,91	0,8594	0,6836	25,73
Ht (m)		Chapman-Richards	0,9367	0,1683	17,74	0,9519	0,1719	16,91	
		Gompertz	0,9374	0,1674	17,64	0,9520	0,1717	16,89	
		Logístico	0,9355	0,1699	17,91	0,9500	0,1752	17,23	
		Monomolecular	0,8169	0,2846	30,00	0,7809	0,3669	36,09	
4	D (cm)	Chapman-Richards	0,8858	0,3875	22,87	0,8968	0,4820	19,52	
		Gompertz	0,8872	0,3852	22,73	0,8945	0,4875	19,75	
		Logístico	0,8854	0,3883	22,91	0,8886	0,5009	20,30	
		Monomolecular	0,8088	0,5015	29,59	0,8451	0,5906	23,93	
	Ht (m)	Chapman-Richards	0,9552	0,1228	14,91	0,9606	0,1478	14,88	
		Gompertz	0,9552	0,1229	14,92	0,9613	0,1463	14,73	
		Logístico	0,9514	0,1279	15,52	0,9615	0,1460	14,70	
		Monomolecular	0,8294	0,2397	29,10	0,8042	0,3293	33,15	
5	D (cm)	Chapman-Richards	0,9174	0,3028	18,93	0,8723	0,5514	23,35	
		Gompertz	0,9180	0,3018	18,87	0,8714	0,5532	23,43	
		Logístico	0,9155	0,3063	19,15	0,8674	0,5619	23,80	
		Monomolecular	0,8345	0,4286	26,80	0,8042	0,6827	28,91	

TABELA 4. 3 - EQUAÇÕES DE PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*. Conclusão.

Idade	Variável	Modelo	<i>Araucaria angustifolia</i>			<i>Pinus taeda</i>		
			R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx%	R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx%
5	Ht (m)	Chapman-Richards	0,9509	0,1290	16,46	0,9681	0,1299	13,29
		Gompertz	0,9515	0,1283	16,37	0,9683	0,1296	13,26
		Logístico	0,9515	0,1283	16,37	0,9660	0,1341	13,72
		Monomolecular	0,7965	0,2626	33,51	0,8064	0,3201	32,75
6	D (cm)	Chapman-Richards	0,8365	0,5132	27,11	0,7791	0,5716	31,66
		Gompertz	0,8351	0,5154	27,22	0,7815	0,5684	31,49
		Logístico	0,8297	0,5237	27,66	0,7815	0,5685	31,49
		Monomolecular	0,7701	0,6085	32,14	0,7176	0,6463	35,80
	Ht (m)	Chapman-Richards	0,9467	0,1372	18,65	0,9191	0,1833	21,18
		Gompertz	0,9472	0,1366	18,56	0,9203	0,1819	21,02
		Logístico	0,9472	0,1367	18,57	0,9221	0,1799	20,78
		Monomolecular	0,7587	0,2926	39,75	0,7778	0,3038	35,10
7	D (cm)	Chapman-Richards	-	-	-	0,6992	0,4215	37,29
		Gompertz	-	-	-	0,6944	0,4249	37,59
		Logístico	-	-	-	0,6872	0,4298	38,03
		Monomolecular	-	-	-	0,6995	0,4213	37,27
	Ht (m)	Chapman-Richards	-	-	-	0,9296	0,1609	18,87
		Gompertz	-	-	-	0,9305	0,1599	18,75
		Logístico	-	-	-	0,9312	0,1591	18,66
		Monomolecular	-	-	-	0,8216	0,2562	30,05
Anual	D (cm)	Chapman-Richards	0,9317	1,7133	17,40	0,9398	2,2826	26,18
		Gompertz	0,9278	1,7889	18,17	0,9383	2,3109	26,50
		Logístico	0,9129	1,9648	19,95	0,9352	2,3681	27,16
		Monomolecular	0,8843	2,1040	21,36	0,9257	2,5366	29,09
	Ht (m)	Chapman-Richards	0,9723	0,5759	11,53	0,9803	0,7442	8,53
		Gompertz	0,9558	0,6601	13,22	0,9779	0,7885	9,04
		Logístico	0,9358	0,8762	17,55	0,9735	0,8643	9,91
		Monomolecular	0,9370	0,8611	18,51	0,9779	0,7884	9,04

FONTE: O autor (2013).

De maneira geral, a variável diâmetro apresentou estatísticas inferiores de ajuste e precisão em comparação à altura, para ambas as espécies, o que se justifica pelo fato de que a redução nas taxas de incremento da altura no final do período vegetativo é muito mais significativa do que para o diâmetro, caracterizando, desta forma, mais acentuadamente o valor assintótico da curva de produção mensal a cada ano para a variável altura. Nesse sentido, Koehler (2009) afirmou que o

gênero *Araucaria* apresenta uma redução quase absoluta da atividade mitótica e do alongamento da gema apical no final do período vegetativo.

De maneira geral, os modelos de crescimento e produção apresentaram ajustes satisfatórios para a curva de produção mensal de diâmetro e de altura de *A. angustifolia* e *P. taeda*, mostrando que o crescimento ao longo de um ano vegetativo (mês a mês) apresentou a forma do crescimento biológico (sigmoidal), assim como o crescimento ao longo da vida da árvore (ano a ano), conforme indicado por Assmann (1970); Fritz (1976); Zanon (2007); Machado *et al.* (2010). Adicionalmente, pode-se perceber que os modelos de Chapman-Richards e de Gompertz foram os que apresentaram melhor ajuste para todas as idades avaliadas, em ambas as variáveis dependentes. Já o modelo Monomolecular foi o de pior desempenho, apresentando valores de  $R^2_{aj}$  inferiores e de erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) superiores aos dos demais modelos ajustados.

Devido a grande similaridade entre as estatísticas obtidas para os modelos de diâmetro e altura de Chapman-Richards e Gompertz, foi feita a análise gráfica de resíduos para a seleção do melhor modelo (FIGURAS 4.3 e 4.4). Os modelos Logístico e Monomolecular apresentaram problemas de estimativa nos primeiros meses do ano vegetativo, onde o crescimento acumulado foi muito próximo de zero, com elevados percentuais de superestimativa nessas classes, além de apresentarem valores de  $R^2_{aj}$  e  $S_{yx}$  inferiores aos demais, por isso seus resíduos não foram representados. Já para os modelos de Chapman-Richards e Gompertz foi verificado que o mais homogêneo ao longo da linha estimativa foi o de Chapman-Richards, o qual apresentou estimativas superiores nos primeiros meses do ano vegetativo (FIGURAS 4.3 e 4.4). O modelo de Gompertz não se mostrou tão flexível, com problemas de superestimativas nos dois primeiros meses do ano, quando as taxas de crescimento são bastante baixas, principalmente para a variável altura.

Segundo Maestri (2003) o modelo de Chapman-Richards possui as características típicas para o ajuste do crescimento de qualquer variável biológica, sendo bastante flexível, uma vez que apresenta coeficientes que expressam um significado relacionado ao comportamento do crescimento biológico. Desta forma, segundo esse autor o bom ajuste obtido para a função de Chapman-Richards tanto para a produção mensal nos seis anos vegetativos avaliados, quanto para a produção anual, se deve a estrutura biológica do modelo que mantém um padrão de resposta biologicamente coerente.

Diferentemente do resultado obtido nesse estudo, Silva (2009) selecionou o modelo Monomolecular para estimar o crescimento do diâmetro, da altura total, da área de cobertura da floresta e do volume de candeia ao longo do tempo. Esse autor afirmou que o ponto que refletiu a escolha do modelo Monomolecular foi a ausência do ponto de inflexão da curva de produção, uma vez que a circunferência mínima de medição foi de 9,0 cm e então o ponto de inflexão já havia ocorrido ou era inexistente. No presente trabalho isso não foi observado, sendo o modelo Monomolecular o que apresentou estimativas mais distantes das observadas, principalmente nas primeiras classes, o que evidenciou a existência do ponto de inflexão nas curvas de produção mensal para todos os anos avaliados e também para a curva de produção anual, uma vez que as medidas foram tomadas desde o início do crescimento das espécies.

Floriano *et al.* (2006) obtiveram bons ajustes para a altura de *Pinus elliottii* Engelm com o modelo linear de Backman e o modelo não-linear de Chapman-Richards. Ambos apresentaram gráficos de resíduos semelhantes, valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) idênticos e valores de quadrados médios dos resíduos ( $QM_{res}$ ) muito próximos. Entretanto, esses autores consideraram que quando se aplicam os critérios qualitativos de interpretabilidade e compreensibilidade, o modelo de Chapman-Richards apresentou vantagem, até mesmo pelo amplo uso desse modelo na descrição do crescimento de árvores, possibilitando comparação com outros estudos.

Cruz (2005) optou pelo uso do modelo de Chapman-Richards na construção de curvas de índice de sítio para *Tectona grandis* Linn. F, na região de Tangará da Serra, MT, devido ao realismo biológico e a qualidade de ajuste apresentados por esse modelo biomatemático.

Elesbão (2008) também selecionou o modelo biológico de Chapman-Richards para determinar o crescimento e produção de diâmetro, altura e volume de *P. taeda* na região dos campos de cima da serra, Rio Grande do Sul, uma vez que os ajustes apresentaram  $R^2$  elevados ( $> 0,97$ ), Syx baixos e boa distribuição gráfica dos resíduos.

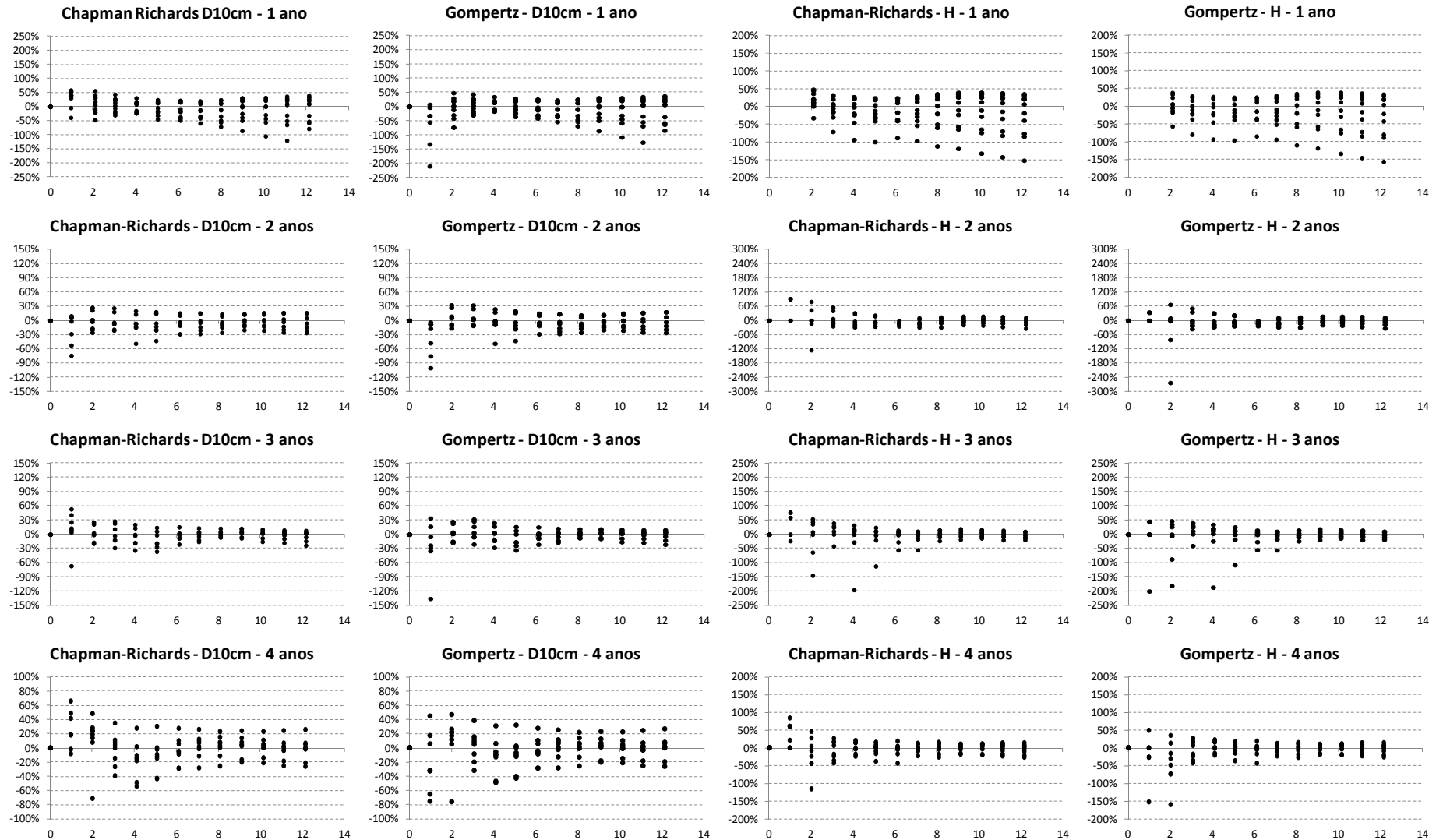


FIGURA 4.3 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS BIOLÓGICOS DE CHAPMAN-RICHARDS E GOMPERTZ PARA AJUSTE DA VARIÁVEL DIÂMETRO A 10 CM E ALTURA DE *Araucaria angustifolia*, PARA AS IDADES DE 1 A 6 ANOS E PARA O TOTAL.

FONTE: O autor (2013).

Continua

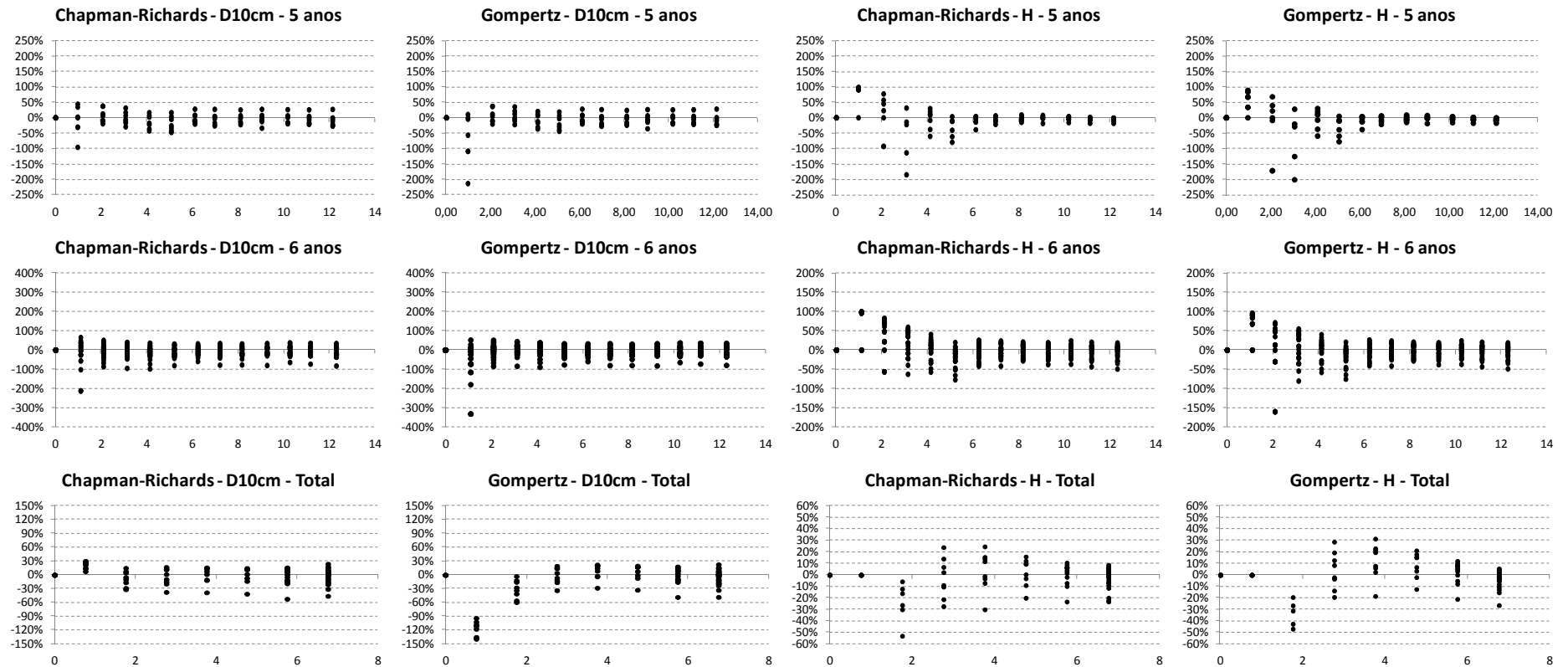


FIGURA 4.3 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS BIOLÓGICOS DE CHAPMAN-RICHARDS E GOMPERTZ PARA AJUSTE DA VARIÁVEL DIÂMETRO A 10 CM E ALTURA DE *Araucaria angustifolia*, PARA AS IDADES DE 1 A 6 ANOS E PARA O TOTAL. Conclusão FONTE: O autor (2013).

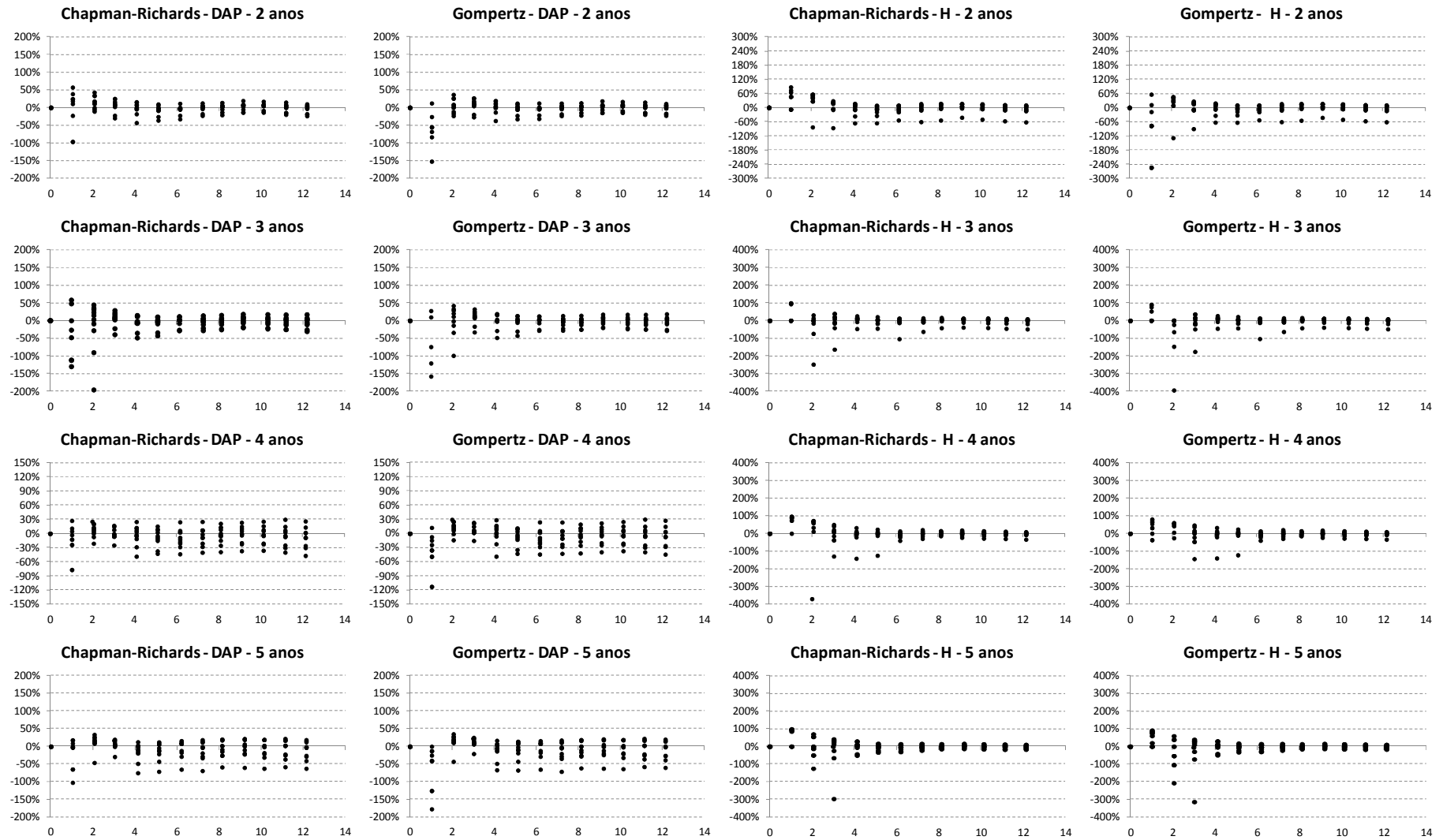


FIGURA 4. 4 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS BIOLÓGICOS DE CHAPMAN-RICHARDS E GOMPERTZ PARA AJUSTE DA VARIÁVEL DIÂMETRO A 1,30 M E ALTURA DE *Pinus taeda*, PARA AS IDADES DE 2 A 7 ANOS E PARA O TOTAL.

FONTE: O autor (2013).

Continua

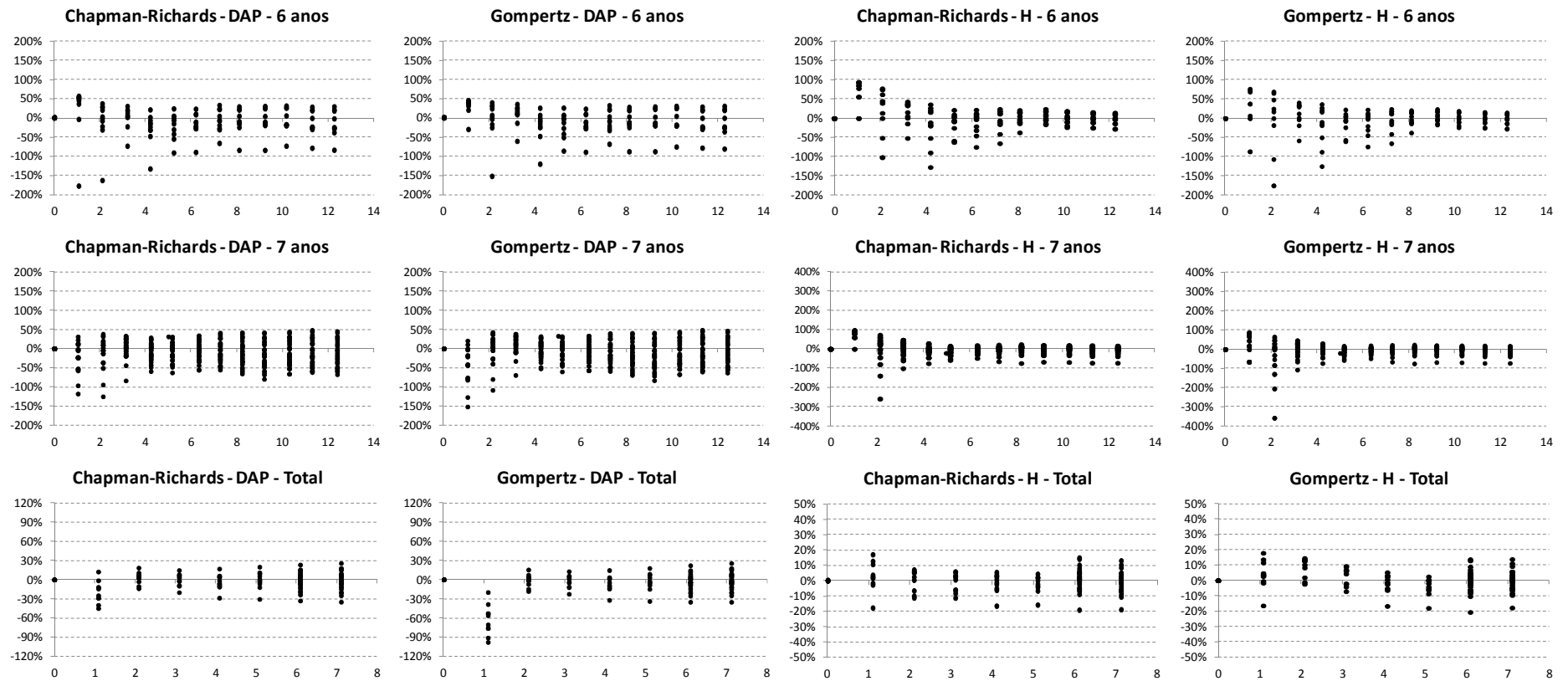


FIGURA 4.4 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS BIOLÓGICOS DE CHAPMAN-RICHARDS E GOMPERTZ PARA AJUSTE DA VARIÁVEL DIÂMETRO A 1,30 M E ALTURA DE *Pinus taeda*, PARA AS IDADES DE 2 A 7 ANOS E PARA O TOTAL. Conclusão FONTE: O autor (2013).



Tendo sido selecionado o modelo de Chapman-Richards, são apresentados na TABELA 4.3 os coeficientes das equações de produção para diâmetro e altura de *A. angustifolia* e *P. taeda*. O valor de “A” representa a máxima produção possível de ser atingida, “k” caracteriza a inclinação da curva, ou seja, expressa a taxa de crescimento, e “m” representa o ponto de inflexão da curva de produção (SCOLFORO, 2006).

Os valores assintóticos representados pelo coeficiente “A” no ajuste dos modelos (TABELA 4.3), em geral foram coerentes com os valores médios máximos atingidos pelos plantios ao fim do ano vegetativo, como pode ser observado nas Figuras 4.7 e 4.8 do tópico seguinte. O parâmetro estimado “k”, referente à velocidade de crescimento, seguiu um padrão semelhante entre o terceiro e o quinto ano avaliado, já nas idades de 1 e 2 anos de *A. angustifolia* e 6 e 7 anos de idade de *P. taeda*, foram observados valores inferiores do coeficiente, demonstrando menor velocidade de crescimento nesses períodos quando comparados aos demais.

TABELA 4. 4 – COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE CHAPMAN-RICHARDS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO MENSAL E ANUAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*

Var	Espécie	Coef.	Idade							Anual
			1	2	3	4	5	6	7	
D	<i>Araucaria angustifolia</i>	A	1,427	4,312	4,168	4,391	3,922	4,393	-	68,054
		k	0,128	0,077	0,173	0,152	0,164	0,169	-	0,0964
		m	0,390	0,093	0,394	0,434	0,444	0,427	-	0,456
	<i>Pinus taeda</i>	A	-	6,291	7,331	6,176	5,831	6,371	3,070	28,782
		k	-	0,193	0,151	0,120	0,146	0,076	0,097	0,398
		m	-	0,589	0,486	0,220	0,367	0,195	0,145	0,637
H	<i>Araucaria angustifolia</i>	A	1,002	1,744	2,087	1,623	1,564	1,655	-	33,867
		k	0,129	0,326	0,256	0,349	0,410	0,378	-	0,087
		m	0,000	0,831	0,665	0,765	0,849	0,871	-	0,401
	<i>Pinus taeda</i>	A	-	2,173	2,052	2,080	1,946	1,815	1,640	40,730
		k	-	0,339	0,424	0,365	0,413	0,341	0,386	0,069
		m	-	0,770	0,868	0,827	0,853	0,803	0,816	0,148

FONTE: O autor (2013)

Para o valor de “m”, que representa o ponto de inflexão das curvas de produção, pode-se verificar uma variação em seu valor com a alteração da idade. Pienaar (1965) determinou que o valor de “m” da equação de Chapman-Richards varia de acordo com a densidade inicial do povoamento, sendo que quanto maior a

densidade inicial do povoamento menor é o valor do coeficiente “m”. Entretanto, não se pode detectar um padrão acentuado da variação do valor de “m” da curva de produção mensal com a variação da idade, sendo apenas possível notar uma leve tendência desse coeficiente apresentar maiores valores para os anos em que as árvores apresentaram maiores valores assintóticos, ou seja, no período juvenil do desenvolvimento dos povoamentos, tendendo esse valor a uma queda com a redução da produção máxima mensal o que representa transição desse plantio para a fase adulta de desenvolvimento.

#### 4.3.2. Avaliação das curvas de produção e incremento mensal e anual

As curvas de produção e de incremento mensal ajustadas pelo modelo de Chapman-Richards das variáveis diâmetro e altura de *A. angustifolia* encontram-se na FIGURA 4.5. Nota-se que o ponto de início do crescimento do ano vegetativo teve como mês de referência o mês de julho, obtendo-se o primeiro valor de crescimento em agosto, seguido de valores de crescimento acumulado nos meses subsequentes. Pode-se observar que as curvas apresentaram forma sigmoideal dentro do período vegetativo, caracterizando o crescimento anual das espécies como um evento cíclico, o qual é assim formado devido às limitações externas (do ambiente) e internas (fisiológicas) às quais os organismos estão expostos ao longo do ano vegetativo ciclicamente (ASSMANN, 1970). Zanon (2007) também encontrou um comportamento sigmoideal da curva de produção mensal quando analisou o crescimento ao longo de três anos vegetativos de indivíduos adultos *A. angustifolia* (40 e 60 anos).

O crescimento de *A. angustifolia* apresentou um padrão crescente de produção mensal de 1 a 3 anos de idade, sendo que após esta idade a produção mensal apresentou valores semelhantes até os seis anos de idade. No primeiro ano as taxas de crescimento foram bastante pequenas, o que reflete a adaptação da espécie ao sítio. Já nos anos seguintes, percebe-se uma produção crescente que segue a tendência do crescimento biológico, onde os indivíduos quando jovens crescem a elevadas taxas (FIGURA 4.5).

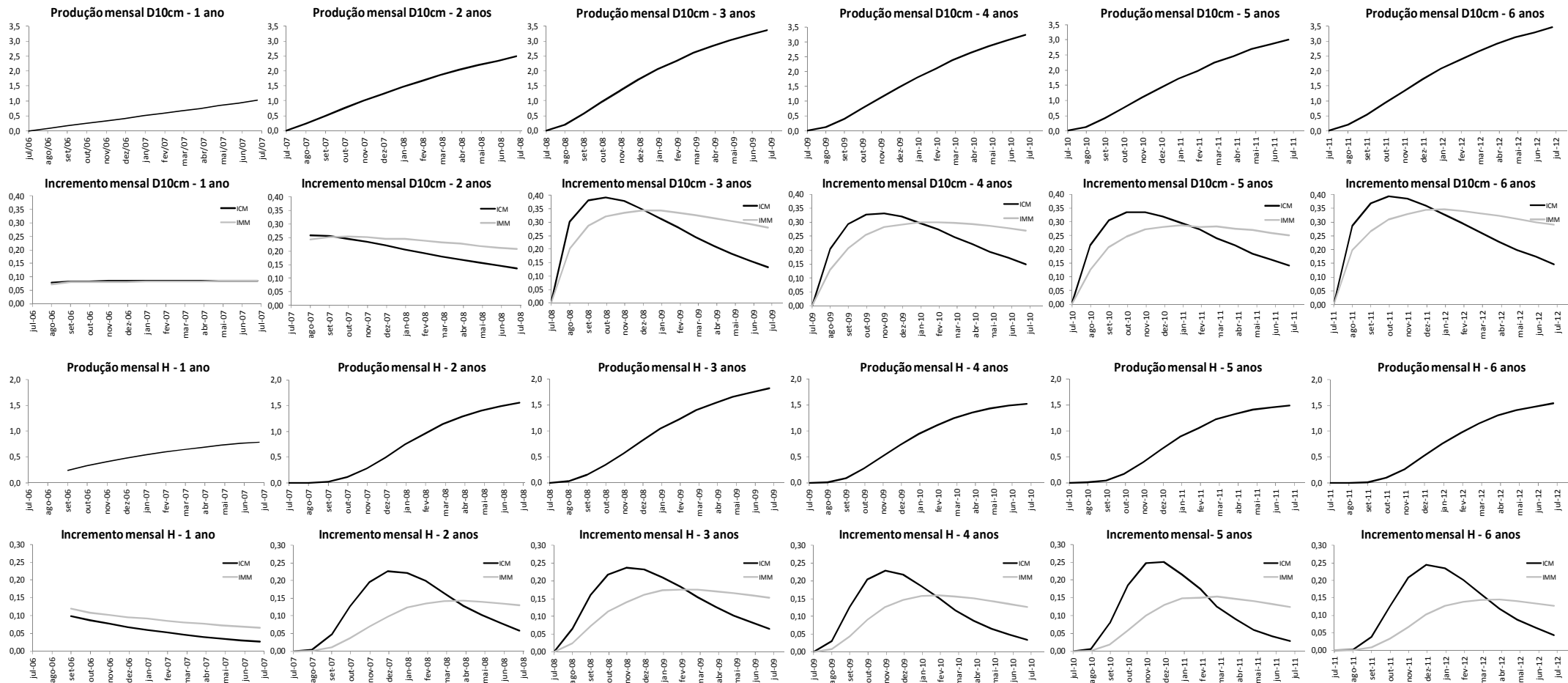


FIGURA 4. 5 – CURVAS DE PRODUÇÃO E INCREMENTO MENSAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia*, NOS SEIS ANOS AVALIADOS, CONSTITUÍDAS COM O MODELO DE CHAPMAN-RICHARDS AJUSTADO.

FONTE: O autor (2013).

O crescimento de *A. angustifolia* com um ano de idade apresentou uma tendência linear de crescimento, principalmente para a variável diâmetro, com pouca sinuosidade na curva de produção mensal. A linearidade da produção durante o primeiro ano de vida da espécie ficou bem representada na curva de incremento corrente mensal (ICM), a qual se apresentou praticamente constante ao longo de todo ano, para ambas as variáveis de crescimento. Isto se justifica pelo fato de árvores muito jovens (1 e 2 anos) apresentarem uma estação de crescimento ao longo do ano muito mais curta que os indivíduos maduros (FRITZ, 1976).

Nas curvas de incremento corrente mensal (ICM) e incremento médio anual (IMM) de *A. angustifolia* pode-se verificar por meio do valor máximo do ICM e do ponto de cruzamento entre as curvas de incremento, quando o ICM é igual ao IMM, que em todos os anos as árvores apresentam um ponto de inflexão (PI) e um valor assintótico. O PI ocorre nos meses entre setembro e dezembro e a assíntota foi atingida por volta de março.

Zanon (2007) observou que o incremento médio mensal (IMM) máximo da variável circunferência à altura do peito de *A. angustifolia* medida durante os três anos de avaliação (agosto de 2003 a agosto de 2006), em 96 árvores-amostras, ocorre entre os meses de janeiro a março, apresentando-se um pouco mais tardio que o apresentado nesta pesquisa (setembro a dezembro).

Para *P. taeda*, as curvas de crescimento e produção mensal em diâmetro e altura encontram-se na FIGURA 4.6, onde se verifica também a típica forma sigmoide da curva de produção ocorrendo dentro do período vegetativo, estando o ponto de máximo incremento corrente mensal (ICM) e o ponto de máxima tangência (ICM=IMM) presentes em todos os anos avaliados. Esse fato também foi constatado por Assmann (1970) com as espécies *Fagus sylvatica* e *Quercus* sp e por Pélissier e Pascal (2000) no estudo de 24 espécies na Índia.

Nas curvas de produção mensal de *P. taeda* o início do período se deu em julho, um mês antes da *A. angustifolia*. Isso foi determinado, pois se percebeu por meio da forma das curvas e das taxas de incremento, que a espécie *P. taeda* apresentou uma retomada do crescimento anterior a *A. angustifolia*. Zanon (2007) analisou a produção mensal em diâmetro de *A. angustifolia* ao longo de três anos e constatou que o início do crescimento ocorreu no mês de setembro, ainda mais tardio que o constatado nessa pesquisa.

A produção mensal de *P. taeda* (FIGURA 4.6) apresentou comportamento diferente do observado para *A. angustifolia* nos primeiros anos de medição. Pode-se observar que o primeiro ano de avaliação (2 anos de idade) já apresentou taxas de crescimento significativas e muito semelhantes às observadas ao longo dos quatro primeiros anos de medição, ou seja, até os cinco anos de idade do povoamento. Após esse período a produção mensal de ambas as variáveis começaram a apresentar decréscimos, significando perda no vigor de crescimento entre 5 e 6 anos de idade, principalmente para o diâmetro. Segundo Brown (1974) há um efeito da idade na periodicidade da atividade cambial ao longo do ano em muitas espécies, sendo que à medida que as árvores envelhecem o crescimento em diâmetro inicia sua atividade depois e cessa antes do observado em árvores de idade mais jovens.

O máximo valor de ICM ajustado foi encontrado predominantemente no mês de outubro para ambas as variáveis; já o valor de máxima tangência ocorre entre os meses de dezembro e fevereiro, mostrando que a partir desse período as árvores começam a reduzir as taxas de crescimento. Contudo para altura, pode-se perceber nas curvas que a estabilização do crescimento ocorre mais gradualmente e antes do diâmetro, seguindo a ordem de sequência clássica de culminação do incremento ao longo da vida de plantios comerciais dessa espécie (Machado *et al.*, 2010).

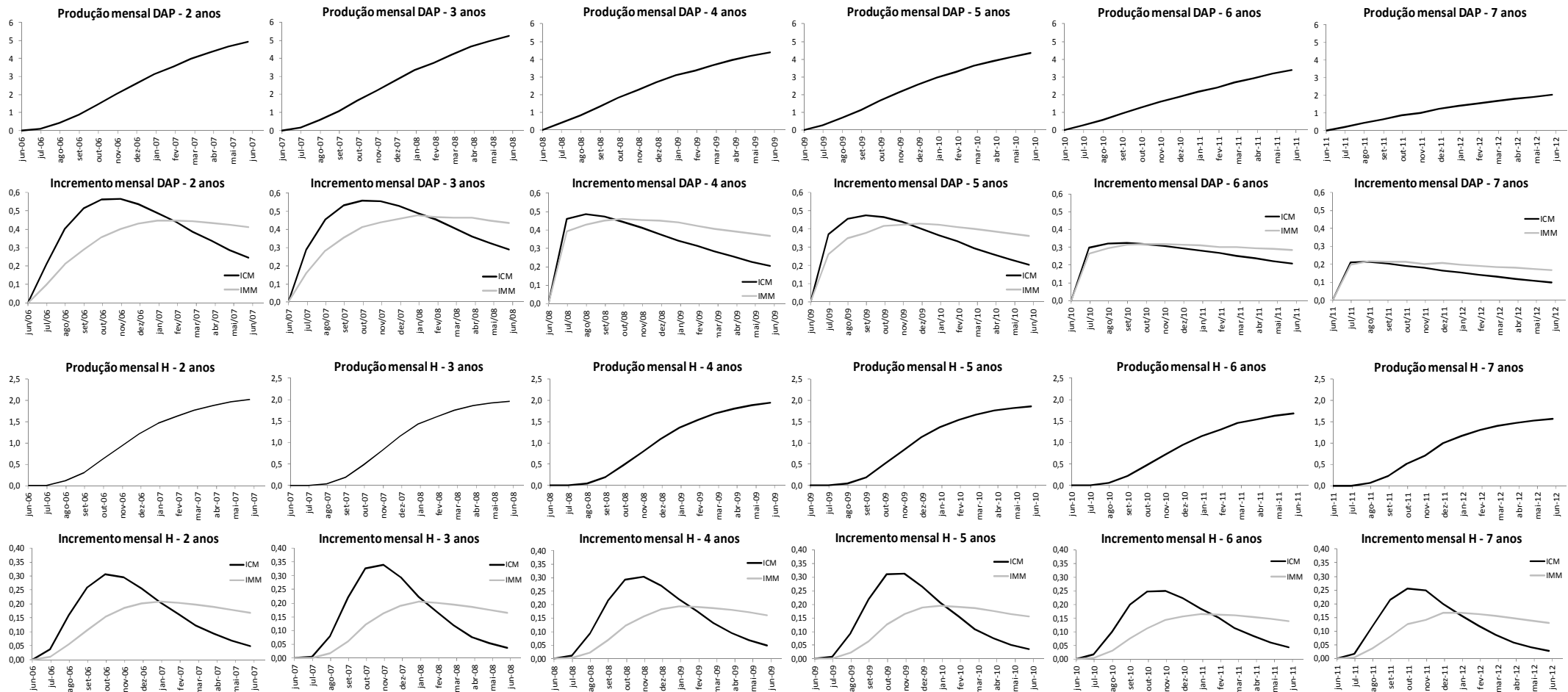


FIGURA 4. 6 – CURVAS DE PRODUÇÃO E INCREMENTO MENSAL DE DIÂMETRO E ALTURA DE *Pinus taeda*, NOS SEIS ANOS AVALIADOS, CONSTITUÍDAS ATRAVÉS DO MODELO DE CHAPMAN-RICHARDS AJUSTADO.

FONTE: O autor (2013).

Avaliando o comportamento das variáveis de crescimento estudadas, em ambas as espécies, observa-se que a variável diâmetro apresentou curva de produção mensal pouco sinuosa ao longo do período vegetativo em todas as idades. Desta maneira, pode-se perceber que no final do período vegetativo o valor assintótico, apesar de presente, não fica bem evidenciado, visto que a atividade cambial não apresenta dormência nesse período do ano, apenas mantém seu crescimento a menores taxas. Segundo Machado *et al.* (2010) a continuidade no crescimento dos meristemas secundários no final do período vegetativo poderia ser atribuída à sua maior proteção na árvore em relação aos agentes do clima, pois, enquanto as gemas apicais estão em contato direto com o ambiente externo, o câmbio possui a proteção da casca, permitindo que suas células não tenham necessidade de reduzir drasticamente seu processo de replicação nesse período.

Botosso e Vetter (1991), em estudo conduzido com oito espécies da Amazônia, em um período de 20 meses, observaram a diminuição ou parada completa da atividade cambial no período de julho a setembro, caracterizando o valor assintótico e o início gradual do crescimento representado nas curvas de produção mensal desse estudo. O fato de algumas das espécies estudadas por esses autores apresentarem até mesmo uma completa parada na atividade cambial está atrelado ao ambiente em que estas espécies estavam submetidas, onde a floresta encontrava-se em um estágio avançado de sucessão e os indivíduos já adultos apresentavam baixos valores de incremento. Ainda, segundo Zanon (2007), o período de paralisação cambial é função da espécie, das condições meteorológicas e, sobretudo do vigor das árvores, relacionado a idade e posição sociológica no povoamento.

Já para altura, a forma sigmoideal do crescimento acumulado durante o período vegetativo é nítida, sendo o valor assintótico atingido, anualmente, devido ao período de dormência das gemas apicais; analogamente, percebe-se que a curva de incremento corrente mensal cresce suavemente, a pequenas taxas, ocorrendo o mesmo a taxas decrescentes após o máximo ter sido atingido. Segundo Fritz (1976) a dormência apical no final do período vegetativo pode estar relacionada a algum fator limitante da própria árvore. Esse autor também afirmou que, geralmente, todas elas saem do período de dormência na mesma época, o que caracteriza, nas curvas de produção anual, o início do período de maior crescimento ao longo do ano, que ocorre até o ponto de inflexão ser atingido.

Ainda no que se refere ao valor assintótico, pode-se perceber que a definição de Turnbull (1963) de que a produção assintótica corresponde ao nível de saturação do crescimento de uma população ou indivíduo, se aplica também anualmente, como evidenciado nesta pesquisa, sendo que ao final de cada período vegetativo as plantas passam por limitações ambientais e fisiológicas que causam uma redução da divisão celular cambial e meristemática. Turnbull (1963) também definiu que a assíntota de um povoamento é constante, independente de seu regime de estoque inicial. Isso não pode ser verificado nas curvas de produção mensal, uma vez que com a evolução da idade, os valores assintóticos anuais apresentam variação, sendo crescentes nos primeiros anos de desenvolvimento, conforme verificado para *A. angustifolia* (entre 1 e 3 anos), passando por uma fase quase de assíntota constante (entre 3 e 5 anos de ambas as espécies), até atingir a fase madura de desenvolvimento, quando a assíntota anual tende a reduzir seus valores até chegar à senescência (5 e 6 anos de *P. taeda*).

Após a análise criteriosa da produção mensal dessas espécies, foi importante correlacionar o comportamento apresentado ao crescimento em função da idade dessas espécies, estabelecendo, dessa forma, em que fase do desenvolvimento esses povoamentos estavam e como isso foi expresso nas curvas mensais.

Na análise da produção mensal de *A. angustifolia*, pode-se perceber que em ambas as variáveis, diâmetro e altura, as taxas de crescimento apresentaram-se elevadas anualmente como afirmado anteriormente, estando a espécie em seu período de máximo vigor, pressupondo-se assim, que esse povoamento ainda está em sua fase juvenil de desenvolvimento. De forma a melhor avaliar esta informação, na FIGURA 4.7 são apresentadas as curvas de produção e incremento anual de diâmetro e altura de *A. angustifolia*. Nelas pode-se perceber que as crescentes taxas de produção anual nos três primeiros anos de idade deram sinuosidade à curva de produção de ambas as variáveis analisadas. O incremento corrente anual (ICA) apresentou aos seis anos de idade, seu máximo valor para diâmetro (3,36 cm) e aos cinco anos, o máximo valor em altura (1,59 m), desta forma, conclui-se que o PI está ocorrendo nesse período, e que a espécie está atingindo seu estágio maduro de desenvolvimento.

Plodowski *et al.* (2005) e Figueiredo Filho *et al.* (2003) apresentaram valores de ICA médio para a variável diâmetro inferiores aos desta pesquisa para os



indivíduos de *A. angustifolia* analisados por eles, com valores de 0,364 cm e 0,129 cm, respectivamente. O baixo incremento apresentado por esses autores pode decorrer da idade das plantas, uma vez que estudaram o incremento de árvores adultas de *A. angustifolia*, em ambiente de Floresta Ombrófila Mista, as quais apresentam menores taxas de incremento que árvores jovens e condições diferenciadas das apresentadas em um povoamento.

Hess *et al.* (2009) analisando a variação do crescimento em diâmetro de *A. angustifolia* para três regiões do Rio Grande do Sul, obtiveram um incremento médio anual de 0,98 cm.ano<sup>-1</sup>. Já para este estudo o incremento anual médio observado foi superior e igual a 2,53 cm.ano<sup>-1</sup>, o que pode ser explicado pela idade dos indivíduos analisados, visto que Hess *et al.* (2009) analisaram indivíduos de 22, 20 e 33 anos de idade, já neste estudo foram analisados indivíduos jovens (1 a 6 anos), portanto com maiores taxas de incremento.

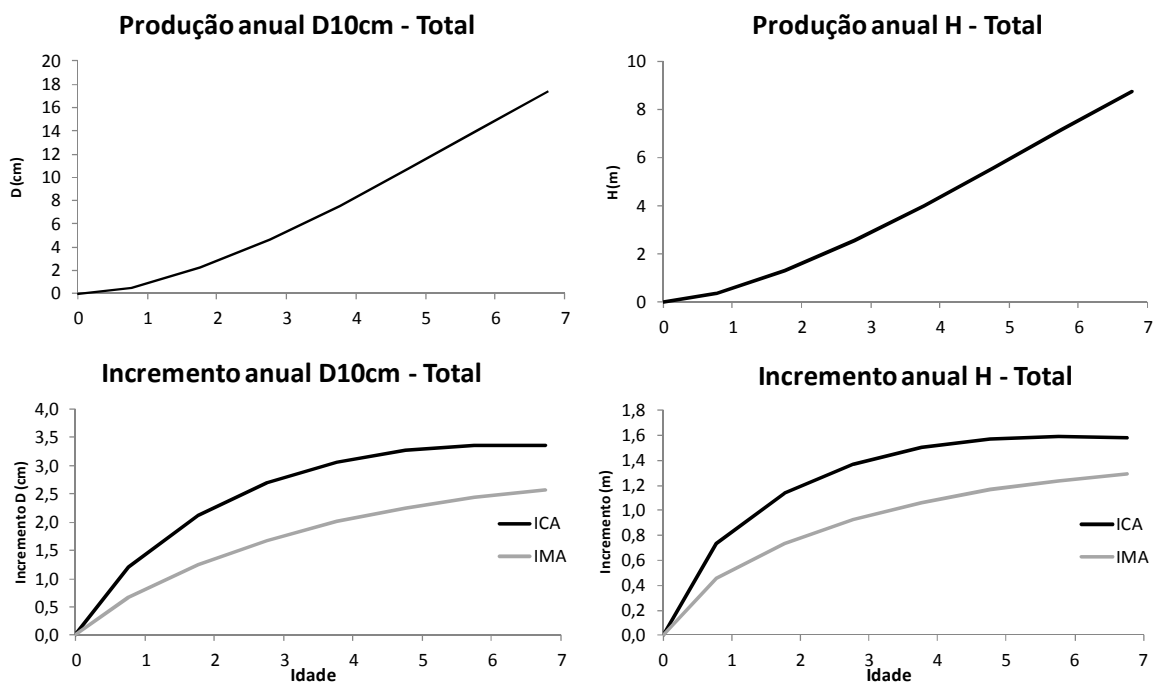


FIGURA 4. 7 – CURVA DE PRODUÇÃO E INCREMENTO ANUAL EM DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia*.

FONTE: O autor (2013)

Para *P. taeda* foi possível perceber por meio das curvas de produção mensal, uma redução nas taxas de crescimento acumulado nos dois últimos anos avaliados, principalmente para diâmetro, o que indicaria o alcance da fase madura de desenvolvimento nesse povoamento. A FIGURA 4.8 indica que o ponto de

inflexão já foi atingido para ambas as variáveis avaliadas aos dois anos de idade com valor de máximo ICA estimado de 5,03 cm para diâmetro e 2,00 m para altura. Pode-se visualizar também que já houve cruzamento do ICA e do IMA próximo aos cinco anos de idade do povoamento, evidenciando que a partir desse ponto, esta espécie reduz mais acentuadamente sua taxa de incremento, tendendo à assíntota.

Para altura, foi observado nas curvas de produção mensal (FIGURA 4.6) que o crescimento acumulado apresentou-se muito semelhante ao longo de todos os anos avaliados. Isso é evidenciado no formato da curva de produção anual (FIGURA 4.8), com uma tendência linear de crescimento também representada pela pouca variação nas taxas de ICA e IMA dessa variável ao longo da vida dos indivíduos.

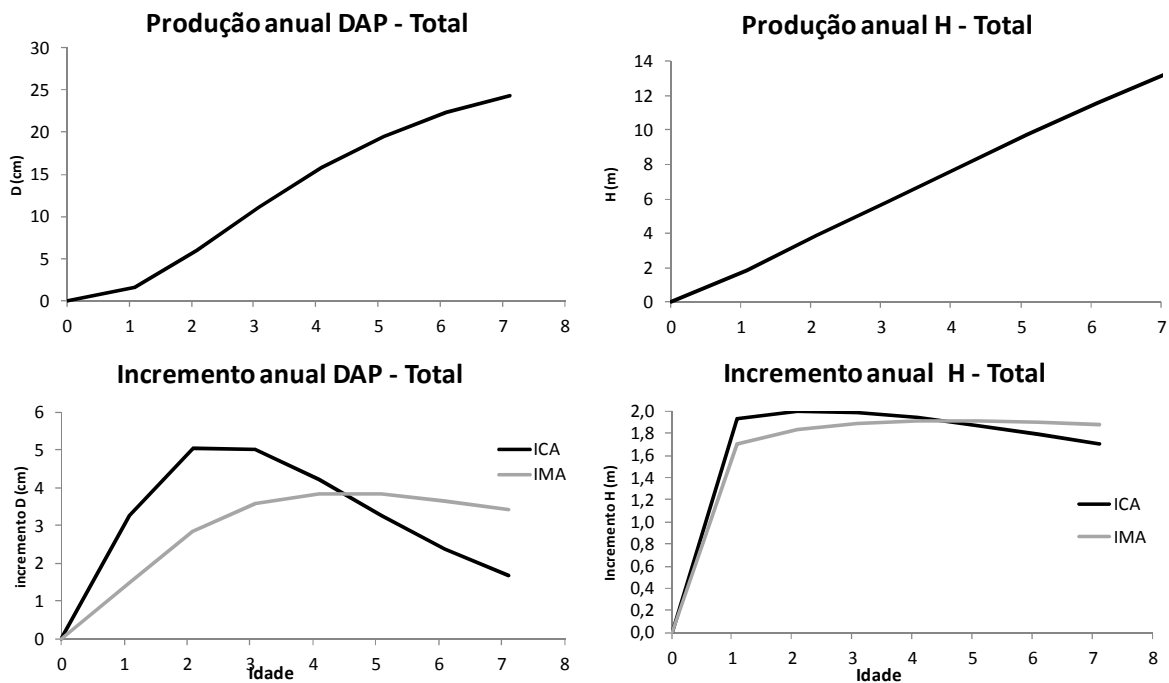


FIGURA 4. 8 – CURVA DE PRODUÇÃO E INCREMENTO ANUAL EM DIÂMETRO E ALTURA DE *Pinus taeda*.

FONTE: O autor (2013).

Em estudo realizado por Serpe e Watzlawick (2008) observou-se um incremento diamétrico anual em plantios de quatro anos de idade de aproximadamente 2,5 cm, sendo o incremento diamétrico anual médio observado nesse estudo para plantios de mesma idade superior e igual a 3,22 cm.

Pela análise das curvas de produção de diâmetro e altura apresentadas no trabalho de Elesbão (2008) pode-se perceber que aos sete anos de idade um plantio de *P. taeda* implantado em 1987, com espaçamento 2 x 3 m e localizado em Canela,

RS apresentou aproximadamente 15 cm de crescimento acumulado de diâmetro e 12 m de crescimento acumulado para altura. Neste estudo, mais uma vez, o crescimento foi superior tendo-se um diâmetro acumulado de 24,3 cm e produção em altura de 13,3 m também aos 7 anos. Este maior crescimento apresentado pode estar relacionado a qualidade genética das árvores, e também ao espaçamento superior de 3 x 3 m, permitindo assim um maior desenvolvimento em diâmetro, variável que apresentou maior diferença de produção.

#### 4.3.3. Avaliação da dinâmica do incremento corrente mensal nos seis anos vegetativos

Foi possível perceber nas curvas de incremento corrente e incremento médio mensal que o crescimento em diâmetro e em altura apresentaram oscilações ao longo do ano e entre os anos de medição. Desta forma, por meio da análise de agrupamento (*Cluster analysis*), buscou-se identificar dentro dos anos vegetativos analisados a existência de meses de crescimento semelhante. Esta análise permitiu a divisão do incremento corrente mensal em diâmetro e altura de ambas as espécies em dois grupos (FIGURA 4.9).

Os dendrogramas de Ward presentes na FIGURA 4.9 demonstram que houve a definição de grupo bem formados. Em ambos os plantios pode-se observar a formação de um grupo que representa os meses de desenvolvimento mais vigoroso onde ocorre a culminação do crescimento em diâmetro e altura (G1); Foi observado, também, um grupo responsável pelas menores taxas de crescimento no ano (G3), representando o período vegetativo onde ocorre a dormência das gemas apicais e de redução da atividade cambial. Houve também a formação de um grupo (G2) representando os períodos de crescimento intermediário ou de transição entre G1 e G3.

O grupo G1 apresentou-se nos meses entre fevereiro e março, para *A. angustifolia* e entre outubro e janeiro para *P. taeda*, demonstrando que o período de máximo incremento é mais tardio para *A. angustifolia*, o que pode ser justificado pela tardia retomada de crescimento dentro do período vegetativo, decorrente do repouso vegetativo (FRITZ, 1976; KOEHLER, 2009; MACHADO *et al.*, 2010).

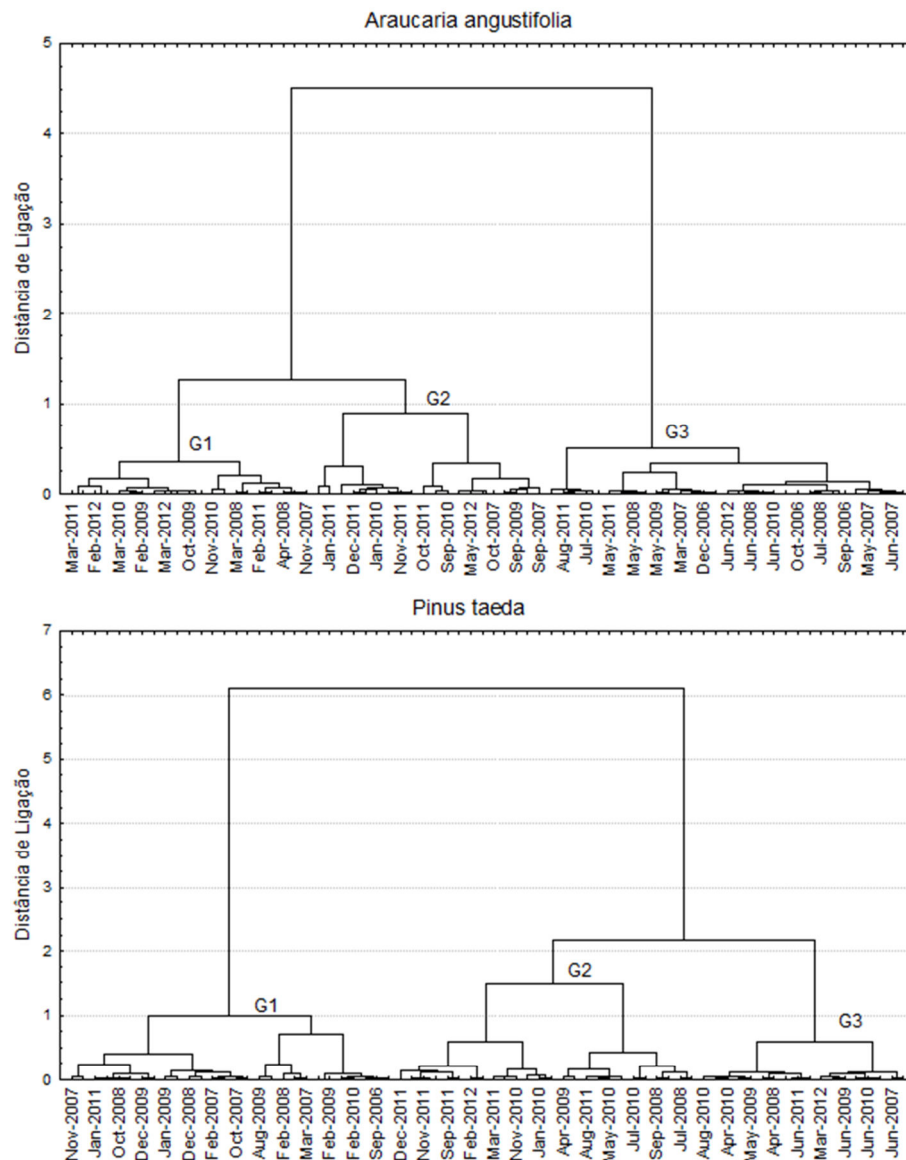


FIGURA 4. 9 – DENDROGRAMAS DE WARD PARA O INCREMENTO CORRENTE MENSAL AO LONGO DE SEIS ANOS VEGETATIVOS NOS PLANTIOS DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*.

FONTE: O autor (2013).

Avaliando a formação do G2, que representa a fase de transição dos ritmos de crescimento no período vegetativo pode-se perceber que para *A. angustifolia* ele se formou e ficou mais próximo do G1; já para *P. taeda* esse grupo se apresentou mais próximo ao G3, demonstrando que a redução do crescimento de *P. taeda* não foi tão significativa quando comparado à *A. angustifolia*. Esse grupo ocorre em dois momentos do ano, um anterior ao máximo crescimento mensal, observado entre setembro e outubro para *A. angustifolia* e entre julho e setembro para *P. taeda*. Já o segundo período de transição ocorreu após as máximas taxas terem sido atingidas,

constatando-se que isto ocorreu entre os meses de novembro e janeiro para *A. angustifolia* e entre dezembro a março para *P. taeda*.

Pode-se observar que o G3, período de baixas taxas de crescimento e quase repouso vegetativo (dormência), está concentrado entre os meses de maio a agosto para *A. angustifolia* e de abril a junho para *P. taeda*. Esse grupo está mais distante dos outros grupos (G1 e G2) para *A. angustifolia*, o que se reflete devido a elevada redução do crescimento apresentada por essa espécie por um maior período de tempo que para *P. taeda*.

Machado *et al.* (2010) também realizaram a análise de agrupamentos para distinguir grupos de crescimento em um ano vegetativo. Dos três povoamentos estudados, dois são coincidentes aos do presente estudo. Esses autores utilizaram a base de dados do primeiro ano de medição da presente pesquisa, de junho de 2006 a junho de 2007, e observaram a formação de dois a três grupos, corroborando com o apresentado anteriormente.

Zanon (2004) observou por meio da análise de agrupamentos a formação de dois grupos distintos de árvores de *A. angustifolia*, onde o G1 reuniu as árvores de maior incremento, maior vitalidade, e conseqüentemente árvores dominantes e co-dominantes e o G2 as árvores de menor incremento, com menor vitalidade, além de pertencerem à classe das dominadas ou suprimidas, mostrando ser esta uma ferramenta bastante interessante quando se tem uma série de dados onde se deseja buscar padrões de similaridade.

Posto a diferenciação do incremento corrente mensal em grupos, necessita-se analisar se houve alguma diferenciação desse incremento entre os anos de medição e o quanto os meses de maior crescimento contribuem para a produção anual. Desta maneira, uma vez que o crescimento ao longo do período vegetativo é caracterizado como um evento cíclico (ENCINAS *et al.*, 2005), são apresentados, na FIGURA 4.10, quatro gráficos demonstrando a distribuição circular do crescimento corrente mensal médio em percentagem ao longo dos seis anos vegetativos estudados, para as duas espécies objeto desta pesquisa.

Para *A. angustifolia* as seis estações de crescimento apresentam um padrão semelhante com um período de maior incremento entre setembro e abril para diâmetro, e um período um pouco menor para altura, que iniciou esse acréscimo apenas em novembro, seguindo também até o mês de abril; ambas as variáveis citadas crescem nesse intervalo de tempo, em média, 78% da produção total.

Zanon (2007) observou valores semelhantes aos dessa pesquisa também para *A. angustifolia*, identificando que o período de setembro a março mostrou ser responsável por 66,53% do incremento das árvores ao longo do ano no primeiro período de avaliação; para o segundo ano de avaliação, esse período foi responsável por 74,2%, e no terceiro ano foi de 82,7%.

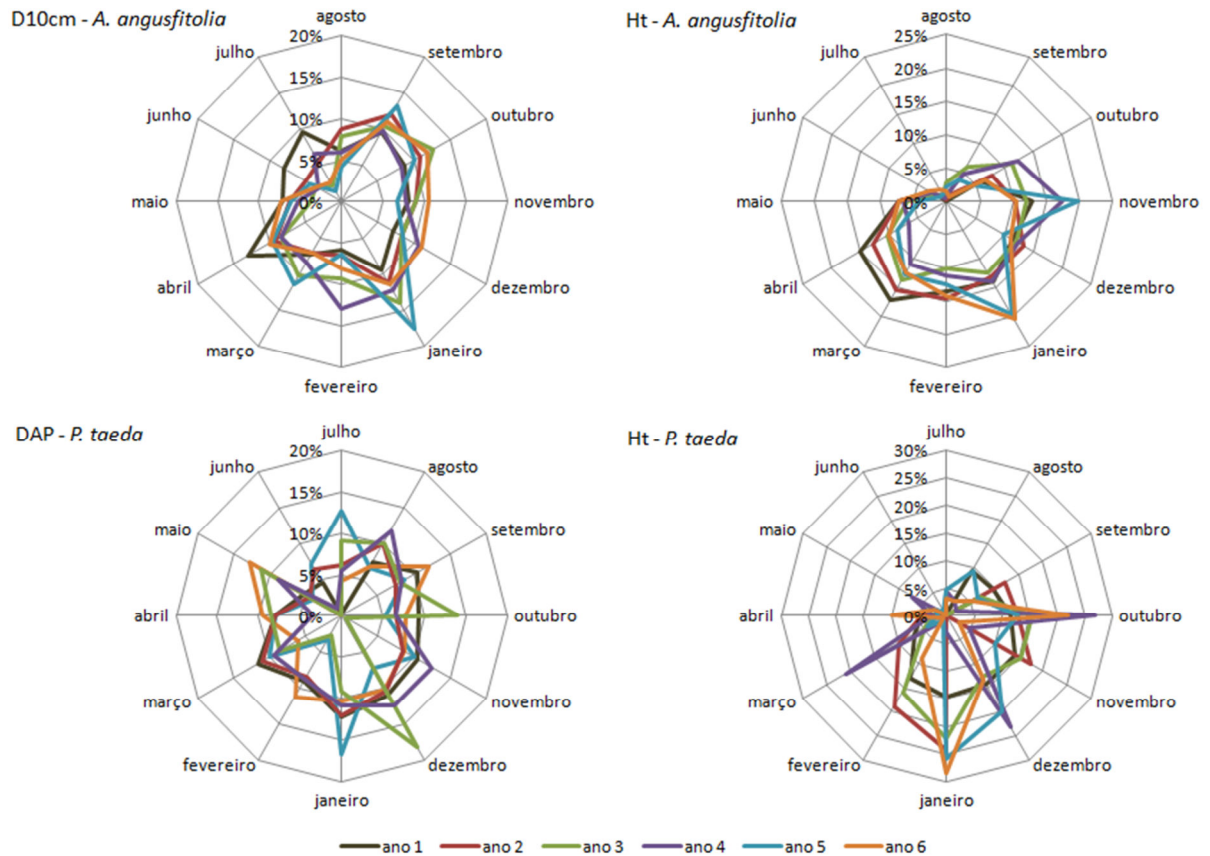


FIGURA 4. 10 – INCREMENTO CORRENTE MENSAL MÉDIO EM DIÂMETRO E ALTURA DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*, DURANTE OS SEIS ANOS AVALIADOS.

FONTE: O autor (2013).

A distribuição do crescimento em diâmetro de *A. angustifolia* mostrou-se bastante regular, sendo que os maiores incrementos foram atingidos em janeiro (~12%), com exceção do primeiro ano, com máxima em abril, que apresentou o máximo ICM médio tardiamente aos anos seguintes, o que evidencia o período de adaptação da espécie ao sítio no ano um, como já discutido. Diferentemente, desse comportamento, Zanon (2007), identificou que os maiores incrementos ocorreram em janeiro e fevereiro para o primeiro e terceiro ano de avaliação, os quais apresentaram taxas significativas em relação ao crescimento total, em torno de 30%.

A variável altura apresentou taxas de crescimento bastante homogêneas no período de maior incremento em todos os anos avaliados, com crescimento mensal próximo de 13%. Ainda vale ressaltar que o máximo ICM em altura também ocorreu tardiamente (março) no primeiro ano de vida do povoamento.

Pode-se perceber que a periodicidade de maior incremento de *P. taeda*, para diâmetro e altura está concentrada entre os meses de setembro a março, representando esse período em média 66% da produção para diâmetro e cerca de 86% da produção em altura dentro do ano vegetativo. Foi verificado que os meses de máximo incremento em altura podem apresentar um crescimento por volta de 25% do total, como é o caso do mês de janeiro para todos os anos avaliados com exceção do quarto, onde o máximo ocorreu em dezembro. A altura apresentou vários períodos de picos de incremento seguidos de acentuada redução nas taxas, principalmente observados nos três últimos anos de medição. Já para o diâmetro percebeu-se que a produção ocorre de maneira mais distribuída, com cerca de 12% de incremento corrente mensal médio no período de maior crescimento, o que conforme Machado et al. (2010) é comum uma vez que devido a proteção exercida pela casca no câmbio, este está menos vulnerável às alterações do meio.

#### 4.4. CONCLUSÃO

As curvas de produção mensal apresentam padrão biológico de crescimento, comprovadas pelas características das curvas de produção e incremento mensal apresentadas para ambas as espécies estudadas.

O período de crescimento mensal inicia em agosto para *A. angustifolia* e em julho para *P. taeda*. Nos meses entre outubro e novembro ocorrem os valores de máximo ICM ao longo do ano, já o ponto de máxima tangência ocorre entre dezembro e fevereiro e a assíntota é atingida por volta de março.

O primeiro ano de crescimento da *A. angustifolia* apresentou um padrão de crescimento próximo ao linear, o que foi expresso na pior qualidade do ajuste dos modelos nesse período, e nas curvas de produção e de incremento corrente mensal.

As curvas de produção mensal de diâmetro apresentaram-se pouco sinuosas, com redução nas taxas de crescimento no final do período vegetativo não tão significativa como o observado para altura, que apresentou típica forma sigmoidal do crescimento biológico.

Pode-se verificar que o valor assintótico é atingido anualmente, da mesma forma como ocorre na fase senil de desenvolvimento das árvores, o que é decorrente das limitações internas e externas sofridas pelas plantas nesse período do ano.

O povoamento de *A. angustifolia* apresentou um padrão crescente de produção ao longo dos anos, atingido estabilização entre os 5 e 6 anos de idade, mostrando que o ponto de inflexão está sendo atingido na curva de produção anual das variáveis estudadas.

O crescimento e produção mensais de *P. taeda* evidenciou que o povoamento já atingiu sua fase madura de desenvolvimento, apresentando redução nas taxas de produção mensal nos últimos dois anos avaliados.

Os modelos biológicos ajustados apresentaram boas estatísticas de ajuste e precisão, tendo sido o modelo de Chapman-Richards o de melhor ajuste, com bons valores de  $R^2_{aj}$ ,  $S_{yx}$  e boa distribuição no gráfico dos resíduos.

O valor do coeficiente “m” da função de Chapman-Richards apresentou uma leve tendência de variação ao longo das fases de desenvolvimento dos indivíduos, com valores menores nos primeiros anos de crescimento, até a adaptação da



espécie ao local de plantio, sendo praticamente constante nos anos de vigor do crescimento (fase juvenil) e decrescendo com a transição para a fase adulta.

A análise de agrupamento evidenciou a formação de três grupos distintos de ICM durante o período vegetativo, sendo dois deles formados pelos meses de maiores e menores incrementos mensais e ainda um grupo caracterizando o crescimento intermediário ou de transição entre os outros dois grupos.

O período de maior incremento do período vegetativo representa até 80% do crescimento do ano todo, sendo que para diâmetro esse crescimento ocorre distribuído de maneira mais homogênea por entre os meses do que para a altura, onde picos de até 25% de crescimento foram observados em alguns meses.

#### 4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study – Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands.** Oxford/ New York/ Toronto/ Sydney/ Braunschweig. Pergamon press, 1970. 506p.

BOTOSSO, P. C.; VETTER, R. E. Alguns aspectos sobre a periodicidade e taxa de crescimento em oito espécies arbóreas tropicais de floresta de terra firme (Amazônia). **Revista do Instituto Florestal**, v. 3, n. 2, p.163-180, 1991.

BROWN, C. L. Secondary Growth. In: ZIMMERMANN, M. H.; BROWN, C. L. (Ed.) **Trees Structure and Function.** Nova York: Spring-Verlag, 1974. 336p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas –** 2. ed. rev. E ampl. – Viçosa: Ed. UFV, 2006. 470p.

CRUZ, J. R. da M. S. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* na região de Tangará da Serra - Mato Grosso.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFV, Viçosa, MG, 2005. 45 p.

DE HOOG, R. J. **Site-nutrition-growth relationships of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. In Southern Brazil.** Tese (Doutorado) - Freiburg: Universität Freiburg, 1981. 161 p.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F. da; PINTO, J. R. R. Idade e Crescimento das Árvores. **Comunicações Técnicas Florestais.** v.7, n.1, Brasília, dezembro de 2005.

ESLESBÃO, L. E. G. **Crescimento e produção de *Pinus taeda* L. na região dos campos de cima da serra, Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008. 75p.

FIGUEIREDO FILHO, A.; HUBIE, S. do R.; SCHAAF, L. B.; FIGUEIREDO, D. J. de & SANQUETTA, C. R. Avaliação do incremento em diâmetro com o uso de cintas dendrométricas em algumas espécies de uma Floresta Ombrófila Mista localizada no sul do estado do Paraná. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, jan/ jun, 2003. 69-84 p.

FLORIANO, E. P.; MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Ajuste e seleção de modelos tradicionais para série temporal de dados de altura de árvores. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 177-199, 2006.

FRITZ, H. C. **Tree rings and climate**. Academic Press inc., New York, 1976. 567 p.

HESS, A.F.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C.A.G. Crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em função da idade, em três regiões do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.19, n.1, p. 7-22, jan-mar., 2009.

KOEHLER, A.B. **Modelagem biométrica e morfométrica em povoamentos jovens de Araucaria angustifolia (Bert.) KTZE., em Tijucas do Sul, estado do Paraná**. Tese (Doutorado). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009. 128p.

MACHADO, S. A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R.; NASCIMENTO, R. G. M; QUIRINO, S. M. S; TÉO, S. J. Dinâmica de crescimento de plantios jovens de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 165-170, mai/jul. 2010.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de Eucalyptus grandis considerando variáveis ambientais**. Tese (Doutorado). Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Curitiba. 2003. 143p.

PÉLISSIER, R.; PASCAL, J. P. Two-year tree growth patterns investigated from monthly girth records using dendrometer bands in a wet evergreen forest in India. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, p. 429-446, 2000.

PIENAAR, L. V. **Quantitative theory of forest growth**. Tese (Doutorado). University of Washington, 1965.167p.

PLADOWSKI, G.; et al. Crescimento sazonal do diâmetro com o uso de cintas dendrométricas de 16 espécies de uma Floresta Ombrófila Mista localizada na Floresta Nacional de Irati, PR. In: XIV Encontro Anual de Iniciação Científica - EAIC 2005, Guarapuava, PR. XIV EAIC. Guarapuava, PR: UNICENTRO, 2005.

SILVA, C. P. de C. **Crescimento e produção da candeia em plantio sujeito a diferentes espaçamentos e podas**. Dissertação (Mestrado). Lavras, MG: UFLA, 2009. 131p.

SCOLFORO, J. R. S. e MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* nos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 18, n.1/2, p. 159-173, 1988.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal: Modelos de crescimento e produção florestal**. UFLA/FAEPE, Lavras, 2006.

SERPE, E.L.; WATZLAWICK, L.F. Avaliação de incremento diamétrico inicial em diferentes espécies de *Pinus* na região de Santa Maria do Oeste (PR). **Revista Eletrônica lato Sensu – Unicentro**, INSS: 1980-6116, Ed. 6, 2008. Disponível em: [http://web03.unicentro.br/especializacao/Revista\\_Pos/P%C3%A1ginas/6%20Edi%C3%A7%C3%A3o/Agrarias/PDF/2-Ed6\\_CA-Avali.pdf](http://web03.unicentro.br/especializacao/Revista_Pos/P%C3%A1ginas/6%20Edi%C3%A7%C3%A3o/Agrarias/PDF/2-Ed6_CA-Avali.pdf). Acesso em: 01 ago 2010.

TURNBULL, K. J. **Population dynamics in mixed forest stands. A system of mathematical models of mixed stand growth and structure**. Tese (Doutorado). University of Washington, 1963.186p.

ZANON, M. L. B. **Crescimento da Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze. diferenciado por dioicia**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. 110p.

WARD, J. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **J. of Amer. Statistical Association**, n.58, p. 236-244, 1963.

## 5. EFEITO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NO CRESCIMENTO MENSAL E NA MODELAGEM BIOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda* na fase juvenil

### RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi verificar o efeito das variáveis climáticas no crescimento mensal em diâmetro e altura das espécies *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L., no período de seis anos, bem como, verificar a contribuição dessas variáveis na composição do modelo biológico de crescimento e produção de Chapman-Richards. Para tanto, foram selecionadas 30 árvores de cada espécie, nas quais foram medidas as variáveis diâmetro e altura no início de cada mês, entre junho de 2006 a agosto de 2012. As variáveis climáticas foram obtidas de duas estações meteorológicas do SIMEPAR próximas aos plantios monitorados. Para determinar o efeito das variáveis climáticas sobre o crescimento foi feita uma matriz de correlação. Posteriormente, fez-se a Análise de Componentes Principais (ACP) para determinar as variáveis climáticas a serem inclusas no ajuste do modelo de produção de Chapman-Richards. Os resultados indicaram que as variáveis climáticas com maior correlação (cerca de 0,6) com o crescimento mensal em diâmetro e altura das espécies foram temperatura, fotoperíodo e pressão atmosférica, além da precipitação para alguns anos da análise. A ACP selecionou duas variáveis climáticas com perda de apenas 10% na variabilidade total. O modelo biológico ajustado nas várias idades com a inclusão das variáveis climáticas apresentou redução do erro padrão de estimativa de cerca de 0,8% comparativamente ao modelo biológico tradicional. Entretanto, a ANOVA (valor de F e valor de p) mostrou não haver diferença estatística entre as estimativas da produção obtidas por ambos os ajustes.

**Palavras-chave:** matriz de correlação, efeito climático, análise de componentes principais

### ABSTRACT

The objective of this research was to analyse the effect of climatic variables on monthly growth in diameter and height of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L., during six years, as well as to verify the contribution of these variables in the composition of Chapman-Richards's model. For this, they were selected 30 trees of each species, in which they were measured diameter and height, at the beginning of each month, from June, 2006 to August, 2012. Climatic variables were obtained of two SIMEPAR's meteorological stations near the monitored plantations. A matrix of correlation was done to determinate the effect of climatic variables on the growth. A Principal Component Analysis (PCA) was done to determine the climatic variables to be included in the adjustment of the yield model of Chapman-Richards. The climatic variables that showed the greatest correlation (about 0.6) with monthly growth of diameter and height were temperature,

photoperiod and atmospheric pressure, and precipitation for several years of analysis. The PCA selected two climatic variables with a loss of only 10% of the total variability. The adjustment of biological models with the inclusion of climatic variables show reduction in the standard error of estimate at about 0.8%, compared to the traditional biological model. However, the ANOVA (value of F and p) showed no statistical difference between production estimates obtained by both models.

**Key words:** correlation matrix, climatic effect, component principal analysis

## 5.1. INTRODUÇÃO

Nas atividades de planejamento florestal, conhecer o crescimento e a produção presente e futura de árvores e de povoamentos florestais é fundamental, visto que auxilia na implementação de regimes de manejo adequados, visando à qualidade do produto final, de forma a atender as exigências do mercado consumidor de madeira.

Neste contexto, a modelagem biológica se torna uma ferramenta útil no planejamento da produção florestal. Além disso, Maestri (2003) ressaltou que a modelagem de crescimento somente é possível se uma perfeita adequação entre as medições dos povoamentos num inventário florestal e as variáveis ambientais, for criteriosamente providenciada em termos espaciais e temporais. Contudo, as características ambientais não são refletidas pelos modelos biológicos de crescimento, os quais consideram apenas o crescimento presente das árvores como função do tamanho e da idade desses indivíduos.

Nesse sentido, as metodologias estatísticas têm evoluído nos últimos anos, permitindo um grande avanço na modelagem de dados florestais, buscando, com isso, estimativas que representem cada vez mais a realidade, fato que tem motivado inúmeras tentativas de modelagem dos fatores ambientais em associação aos fatores biológicos de crescimento e produção. Esse fato sugere que o estabelecimento de um vínculo via modelagem, entre as variáveis ambientais e a capacidade produtiva do povoamento florestal, parece contribuir para a melhoria das estimativas volumétricas (MAESTRI, 2003).

Entretanto, para decidir se as equações de crescimento devem conter um termo responsável pelas mudanças do meio, é necessário que se investigue esse efeito no crescimento das árvores (ZEIDE, 1993).

Desta forma, o objetivo foi verificar o efeito das variáveis climáticas no crescimento mensal em diâmetro e altura das espécies *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e *Pinus taeda* L., no período de seis anos, bem como, verificar a contribuição dessas variáveis na composição do modelo biológico de crescimento e produção de Chapman-Richards.

## 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1 Área de estudo

Os dados utilizados foram provenientes de um plantio de *Araucaria angustifolia* presente no município de Campina Grande do Sul e outro de *Pinus taeda* localizado em Curitiba, PR. Os municípios de Curitiba e Campina Grande do Sul encontram-se localizados no primeiro planalto paranaense, a uma altitude de 934 metros e de 918 metros s.n.m., respectivamente.

O clima predominante da região é o tipo Cfb, segundo classificação de Köppen, também denominado clima temperado subtropical, com verões amenos e chuvas bem distribuídas ao longo do ano. De acordo com estações meteorológicas do SIMEPAR, no período de junho de 2006 a julho de 2012, a precipitação média anual do local foi de cerca de 1600 mm, com médias de temperatura máxima próxima de 23°C e mínima de 13°C.

#### 5.2.1. Coleta de dados

Foram selecionadas para realização deste estudo 30 árvores de *A. angustifolia* com espaçamento 4 x 4 m e 30 árvores de *P. taeda* com espaçamento 3 x 3 m, as quais receberam uma plaqueta metálica com numeração distinta, permitindo, desta maneira, um melhor controle e individualização das árvores em análise. Estes indivíduos foram analisados, mensalmente, no período de junho de 2006 a agosto de 2012, quando apresentavam de 1 a 6 anos de idade para a primeira espécie e de 2 a 7 anos para a segunda.

Durante o período de análise mediram-se o diâmetro a 10 cm do solo (D10cm) no plantio de *A. angustifolia* e diâmetro a 1,3 m do solo (DAP) no plantio de *P. taeda*, com uso de paquímetro até os diâmetros atingirem 6 cm e, posteriormente, com fita métrica graduada em milímetros. O local de medição do diâmetro foi marcado com um gabarito e tinta spray, de forma que todas as medidas fossem



realizadas no mesmo local. O diâmetro de *A. angustifolia* foi medido a 10 cm do solo devido à altura do povoamento ser inferior a 1,3 m por ocasião do início das medições em 2006. Para a mensuração da variável altura utilizou-se régua altimétrica com precisão de 1 cm, em ambos os plantios analisados.

### 5.2.2. Variáveis Climáticas

Dados climáticos mensais foram cedidos pelo Sistema de Meteorologia do Paraná – SIMEPAR, das estações meteorológicas de Curitiba e de Pinhais, as quais foram selecionadas pela proximidade com os plantios. A estação meteorológica de Pinhais dista em média 10 km do plantio de *A. angustifolia*, já a estação de Curitiba está localizada no mesmo local que o plantio de *P. taeda*, ou seja, o Campus III da UFPR.

As variáveis climáticas mensais analisadas nessa pesquisa foram: precipitação total (mm), média da temperatura mínima, média e máxima (°C), pressão atmosférica média (hPa), radiação média incidente na superfície ( $W/m^2$ ) e umidade relativa média (%). Adicionalmente, fez-se o cálculo do fotoperíodo mensal médio (h/dia) para a latitude de cada plantio.

Com isso, foram elaboradas matrizes de correlação entre o incremento corrente mensal (ICM) em altura e diâmetro frente às variáveis climáticas, a fim de identificar quais foram as mais relacionadas com o crescimento de *P. taeda* e de *A. angustifolia* nos seis anos de estudo. Para as variáveis que apresentaram maior correlação foram elaborados gráficos, tendo como variáveis do eixo x o diâmetro e a altura e no eixo y as variáveis climáticas correlacionadas. Esses gráficos foram elaborados de forma a representar a tendência do incremento mensal, e se as oscilações de crescimento ficaram bem representadas pela variável climática correlacionada.

### 5.2.3. Modelagem biológica incluindo as variáveis climáticas

Para complementar a análise do efeito das variáveis climáticas sobre o crescimento e produção mensal em diâmetro e altura para essas duas espécies foi ajustado o modelo biológico de produção de Chapman-Richards sem e com a inclusão dessas variáveis, comparativamente.

Antes do ajuste dessas equações de produção, o conjunto de variáveis climáticas mensais foi submetido a uma análise multivariada, denominada Análise de Componentes Principais (ACP). Esse procedimento permite a seleção de poucas variáveis que expressam grande parte da variabilidade de todas as variáveis incluídas na análise (JOHNSON e WICHERN, 2007).

A ACP foi realizada com o programa Statgraphics Centurion XVI, e o critério de Kaiser foi utilizado para a seleção das componentes principais. Nesse critério são selecionadas todas as componentes que possuem autovalor maior que um. Logo, apenas as variáveis climáticas resultantes da ACP foram inseridas nos modelos biológicos de produção.

Para incluir as variáveis climáticas no modelo biológico sem descaracterizá-lo, ou seja, não fazendo o modelo perder sua forma sigmoideal, característica do crescimento biológico, essas variáveis foram incluídas como modificadoras do coeficiente que representa a assíntota (A), conforme apresentado na equação (5.1). Segundo Maestri (2003), a capacidade produtiva das árvores está relacionada ao valor assintótico que a função pode alcançar, ou seja, possui estreita ligação com o coeficiente A do modelo de Chapman-Richards, por isso, um fator modificador desse coeficiente em função das variáveis ambientais foi inserido nos modelos de produção mensal da presente pesquisa.

$$Mod_A = \frac{A}{1 - [(c_1 * v_{c_1}) + (c_2 * v_{c_2}) + \dots + (c_n * v_{c_n})]} \quad (5.1)$$

Onde:

Mod<sub>A</sub> = fator modificador do coeficiente assintótico;

A = coeficiente assintótico do modelo de Chapman-Richards;

c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, ..., c<sub>n</sub> = coeficientes da regressão;

$vc_1, vc_2, \dots, vc_n$  = variáveis climáticas selecionadas pela ACP.

Com esse modificador da assíntota pode-se verificar pelos valores dos coeficientes ( $c_1, c_2, \dots, c_n$ ) o quanto cada variável climática inserida na equação colabora para a melhoria do ajuste, uma vez que se esses coeficientes forem iguais a zero, a assíntota não se altera e a equação biológica de produção permanece a mesma. Desta forma, a formulação do modelo de Chapman-Richards assumiu a seguinte forma:

$$Y = Mod_A * (1 - e^{-kt})^{\frac{1}{(1-m)}} \quad (5.2)$$

Onde:

Y= produção mensal em diâmetro e altura das espécies estudadas;

k, m= coeficiente do modelo de Chapman-Richards;

t= mês de medição (1 a 12).

Após os ajustes fez-se uma análise de variância (ANOVA) visando verificar se houve diferença estatística nas estimativas da produção mensal em diâmetro e altura com o modelo biológico de Chapman-Richards sem e com a inclusão das variáveis climáticas. Onde para a hipótese  $H_0$  não há diferença significativa de ajuste e precisão entre os modelos biológicos com e sem variáveis climáticas e para  $H_1$  há diferença significativa.

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1. Efeito das variáveis climáticas no crescimento mensal

Na TABELA 5.1, pode-se observar a correlação do incremento corrente mensal em diâmetro e em altura de *A. angustifolia* e *P. taeda* com as variáveis climáticas oriundas de estações climáticas próximas aos plantios. Nessa tabela, verifica-se os graus de correlação das variáveis climáticas com o crescimento das árvores, com valor de  $r$  variando de 0,4 a 0,8, aproximadamente. Segundo Machado *et al.* (2010) esses resultados indicam haver uma relação de moderada a forte, logo, existe uma tendência de que o crescimento em altura e em diâmetro ocorram quase que simultaneamente, variando sua sincronia de acordo com a influência diferenciada dos fatores ambientais sobre cada um dos incrementos.

Segundo Brown (1974a) os diferentes padrões de crescimento das árvores estão relacionados com as condições sazonais às quais estão expostas, uma vez que os indivíduos adaptam seu crescimento para suportar o estresse sazonal a que estão submetidos. Assmann (1970) também afirmou que as taxas de crescimento ao longo do ano flutuam de acordo com as condições do clima. Entretanto, ressaltou que o ritmo de crescimento não depende exclusivamente das condições climáticas do ano de avaliação, mas também das condições ocorrentes em anos anteriores, especialmente em meses onde os brotos apicais são formados.

Silva *et al.* (2004) relacionaram as variáveis de crescimento com as variáveis bioclimáticas para espécies do cerrado na Fazenda Experimental da UFMT e observaram baixa correlação entre as variáveis de crescimento e as variáveis climáticas. Acrescentaram que esse resultado normalmente ocorre em condições tropicais, onde as variações da temperatura, precipitação, radiação solar e outros fatores climáticos são considerados como de menor significância ecológica que em regiões temperadas, o que não representa a realidade do presente estudo, uma vez que as variações climáticas ao longo do ano são significativas, considerando-se que os locais onde os plantios estão inseridos se caracterizam pelo clima Cfb.

TABELA 5. 1 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE O INCREMENTO CORRENTE MENSAL EM DIÂMETRO E ALTURA DAS ESPÉCIES *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda* AO LONGO DOS SEIS ANOS DE AVALIAÇÃO.

Espécie	Variáveis	Ano 1		Ano 2		Ano 3		Ano 4		Ano 5		Ano 6	
		ICM D	ICM H	ICM D	ICM H	ICM D	ICM H	ICM D	ICM H	ICM D	ICM H	ICM D	ICM H
<i>Araucaria angustifolia</i>	ICM D	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
	ICM H	0,1150	1	0,0672	1	0,7531	1	0,5607	1	0,5228	1	0,4950	1
	Pp	0,2031	0,2171	0,3437	0,5635	-0,0063	-0,1714	0,7090	0,5204	0,3873	0,5259	-0,1757	-0,0631
	Pressão	0,1454	-0,6527	-0,2193	-0,8529	-0,5052	-0,8189	-0,6167	-0,9387	-0,5324	-0,8183	-0,5820	-0,7602
	Tmáx	-0,1328	0,8313	0,4327	0,6185	0,7604	0,8976	0,6609	0,8564	0,5972	0,8748	0,5337	0,8411
	Tmedia	-0,0793	0,8882	0,3899	0,8208	0,7857	0,9087	0,6954	0,8703	0,6056	0,8480	0,5334	0,8800
	Tmín	-0,0100	0,9138	0,3888	0,8762	0,7869	0,9055	0,7302	0,8802	0,6260	0,8093	0,5578	0,9001
	UR	0,3386	0,7236	0,5903	0,6330	0,1249	0,1930	0,2721	0,2299	0,4139	0,3805	-0,3104	-0,0505
	Rad	-0,3020	0,6537	0,3375	0,4895	0,5000	0,8341	0,4315	0,7371	-0,1420	0,2947	0,4974	0,5098
	Foto	-0,1184	0,5976	0,5067	0,6712	0,7631	0,8394	0,7952	0,9164	0,6173	0,8520	0,7516	0,8127
<i>Pinus taeda</i>	ICM D	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
	ICM H	0,9177	1	0,6618	1	0,4156	1	0,4266	1	0,5029	1	0,2410	1
	Pp	0,4367	0,2669	0,1971	0,4307	0,5352	0,4620	-0,0067	0,3746	0,3689	0,5446	0,0155	-0,2702
	Pressão	-0,8830	-0,8778	-0,3971	-0,6719	-0,1855	-0,7848	-0,6042	-0,8976	-0,3207	-0,8449	0,1402	-0,6805
	Tmáx	0,6711	0,5967	0,8023	0,8430	0,3132	0,5794	0,5003	0,6798	0,5104	0,7966	-0,1710	0,5963
	Tmedia	0,7076	0,6138	0,7872	0,8375	0,3616	0,6635	0,4973	0,7151	0,4895	0,7587	-0,2657	0,5498
	Tmín	0,7230	0,6076	0,7669	0,8321	0,3664	0,7298	0,4562	0,7591	0,4529	0,7270	-0,3102	0,5213
	UR	0,4543	0,4208	0,2510	0,4860	0,1912	0,5922	-0,5023	0,0171	0,1532	0,2949	-0,3199	-0,6204
	Rad	0,0635	-0,1482	0,7061	0,8192	-0,0611	0,6078	0,4975	0,7589	0,1314	0,6997	0,0104	0,6333
	Foto	0,8975	0,9448	0,7664	0,9515	0,4089	0,9521	0,4574	0,8564	0,3294	0,8980	-0,0193	0,8467

ONDE: ICM D= INCREMENTO CORRENTE MENSAL EM DIÂMETRO (cm); ICM H= INCREMENTO CORRENTE MENSAL EM ALTURA (M); PP= PRECIPITAÇÃO MENSAL (mm); PRESSÃO: PRESSÃO ATMOSFÉRICA (HPA); TMÁX: TEMPERATURA MÁXIMA (°C); TMED: TEMPERATURA MÉDIA (°C); TMIN: TEMPERATURA MÍNIMA (°C); UR: UMIDADE RELATIVA (%); RAD: RADIAÇÃO SOLAR (W/M<sup>2</sup>); FOTO: FOTOPERÍODO (HORAS/DIA).

FONTE: O autor (2013)

As variáveis climáticas que apresentaram maior correlação com o crescimento e produção mensal em diâmetro e altura de *A. angustifolia* e *P. taeda* foram a temperatura média, máxima e mínima e fotoperíodo, sendo as correlações com a variável altura mais fortes comparativamente ao diâmetro, em média iguais a 0,8 e 0,5, respectivamente (TABELA 5.1). A independência do crescimento de diâmetro pode estar relacionada ao fato de o câmbio estar protegido por uma grossa camada de casca que reduz os efeitos do clima sobre sua atividade de divisão celular (MACHADO *et al.*, 2010), o que não ocorre para altura visto que os meristemas apicais estão bem expostos às variações climáticas, as quais afetam até mesmo seu período de dormência durante o ano.

A luz é um dos constituintes do ambiente que apresenta maior influência sobre o desenvolvimento das árvores, uma vez que o crescimento e a forma da árvore são diretamente afetados pela intensidade, qualidade e duração da luz (BROWN, 1974b). Esse autor afirmou ainda que a temperatura também é um fator importante no crescimento, por que influencia em muitas atividades fisiológicas que afetam nas taxas do metabolismo da planta.

Ainda, segundo Lüttge e Hertel (2009), os estímulos ambientais que afetam a atividade cíclica de crescimento anual são principalmente fotoperíodo e temperatura. Para esses autores o principal fator para iniciar rusticidade e dormência do câmbio é a ocorrência de dias curtos. Já para quebrar a dormência do meristema apical o principal fator é a temperatura, uma vez que as plantas precisam ser expostas a temperaturas baixas durante um período de tempo cumulativo antes do aumento da temperatura provocar a abertura dos botões.

Souza (2004) realizou estudo sobre crescimento de Ipê-felpudo em relação às variáveis climáticas em Linhares, no estado do Espírito Santo, concluindo que a temperatura não afetou muito o crescimento dessa espécie. Segundo esse autor, esse fato foi atribuído a pouca variação dessa variável climática ao longo do ano na região do estudo, uma vez que na região próxima aos trópicos a sazonalidade é determinada pela variação pluviométrica, diferentemente do ocorrente na presente pesquisa, onde devido a elevada altitude onde os plantios estão localizados, a variação de temperatura é bastante significativa no decorrer das estações do ano.

Pode-se perceber, adicionalmente, na TABELA 5.1, elevada correlação da precipitação (cerca de 0,6) com o crescimento de *A. angustifolia* nos anos 4 e 5 de medição. Este período se refere de agosto de 2009 a julho de 2011 e se

caracterizou por ser bastante chuvoso nos meses de verão, com redução das chuvas no inverno, apresentando precipitação anual elevada e superior a 2000 mm. Já para *P. taeda* observou-se correlação por volta de 0,45 da variável precipitação com o incremento corrente mensal em diâmetro e altura nos anos 3 e 5 de medição. Nesse período, destacaram-se as elevadas taxas de precipitação de dezembro a fevereiro do ano 5 de medição e picos de precipitação em agosto e outubro no ano 3, que foram acompanhados por maiores taxas de crescimento em esses meses, conforme pode ser visto na FIGURA 5.1, que apresenta graficamente a variação do ICM de ambas as espécies com as variáveis climáticas mais correlacionadas.

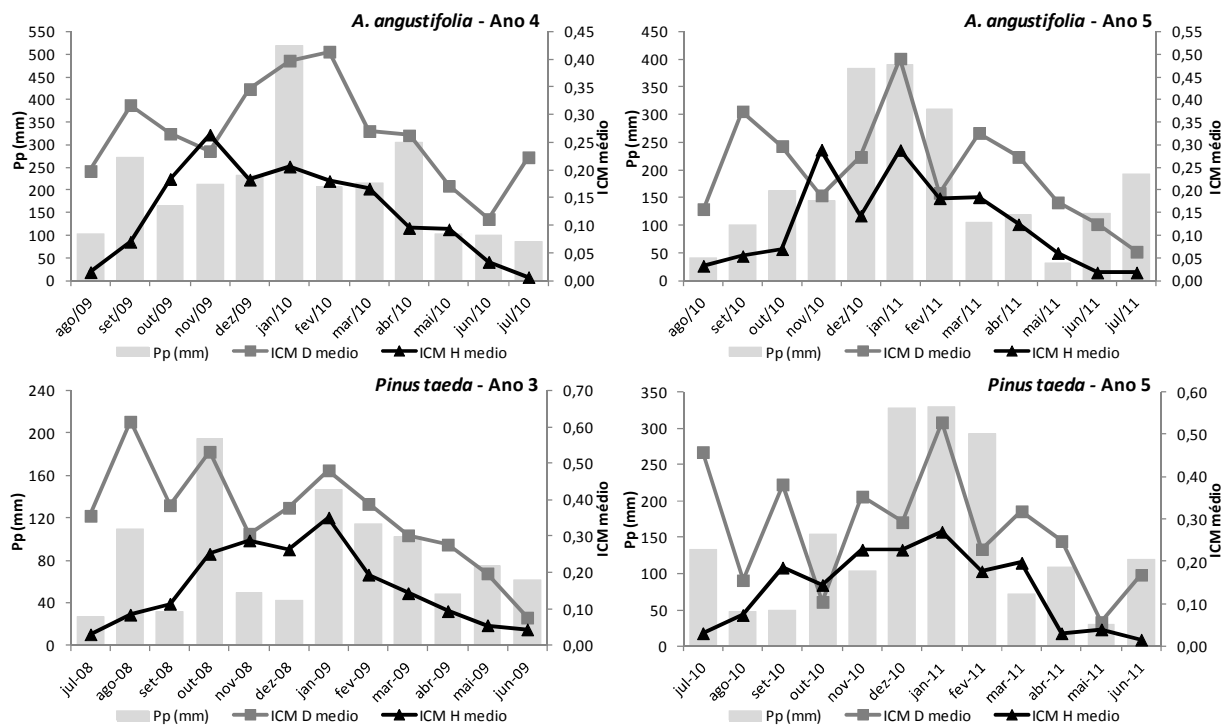


FIGURA 5. 1 – CORRELAÇÃO ENTRE OS INCREMENTOS CORRENTES MENSIS (ICM) EM DIÂMETRO (cm) E ALTURA (m) COM A VARIÁVEL CLIMÁTICA PRECIPITAÇÃO (Pp) NOS PLANTIOS DE ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA E PINUS TAEDA  
 FONTE: O autor (2013).

Segundo Souza (2004) de todas as substâncias que as plantas absorvem, a água é a necessária em maiores quantidades e algumas vezes corresponde a até 95% do peso total do vegetal. Sendo assim, a necessidade de adequado fornecimento de água para o bom crescimento e desenvolvimento de vegetais decorre de múltiplas funções que ela desempenha na fisiologia das plantas, já que praticamente todos os processos metabólicos são influenciados pelo conteúdo de água.

Bognola (2007) apresentou a temperatura e a precipitação como as variáveis climáticas com maior efeito sobre o crescimento em *P. taeda*, sendo o mesmo verificado por Zanon (2007) no estudo do crescimento de indivíduos adultos da espécie *A. angustifolia* e por Sette Jr. *et al.* (2010) para crescimento em diâmetro de *Eucalyptus grandis*, corroborando assim com o apresentado neste estudo.

Na estimativa da produtividade de povoamentos monoclonais de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, Stape *et al.* (1997) concluíram que a produtividade é muito dependente da precipitação ocorrida ao longo do processo de desenvolvimento das plantas. Souza (2004) ainda ressaltou que uma grande variação da precipitação proporciona diversos problemas nas plantas, uma vez que a água tem grande importância para o desenvolvimento dos vegetais.

Por meio da matriz de correlação (TABELA 5.1) também se pode observar que no primeiro ano de medição, quando o povoamento de *A. angustifolia* tinha um ano de idade e no sexto ano de medição, aos sete anos de idade do povoamento de *P. taeda* houve baixa correlação do incremento mensal em diâmetro com as variáveis climáticas, indicando que o crescimento nesse período ocorre de maneira quase independente. Analisando as curvas de incremento nesses períodos (FIGURA 5.2), pode-se perceber um padrão de crescimento atípico, com taxas quase que constantes de desenvolvimento ao longo do ano para *A. angustifolia* e taxas decrescentes para *P. taeda*. Esse resultado mostrou que o incremento é pouco sensível às variações climáticas, sendo, de certa forma, mais influenciado pelas reservas energéticas e atividades metabólicas intrínsecas das árvores, seja por sua fase de adaptação ao sítio no caso de *A. angustifolia*, ou ainda, pelo nível de competição do povoamento para *P. taeda* que já iniciou redução nas taxas no crescimento a partir o sexto ano de idade, como descrito no Capítulo 1. Desta forma, nessas fases de desenvolvimento, o crescimento está sendo conduzido pelo ritmo endógeno de crescimento inerente a cada espécie (LUZ, 2011), uma vez que as variações climáticas não seriam suficientemente drásticas e regulares de maneira a preponderar e a induzir alterações na atividade cambial (OLIVEIRA, 2007).

Observou-se ainda na TABELA 5.1 forte correlação inversa dos incrementos de altura em relação à pressão atmosférica em ambas as espécies. Considerando que a pressão atmosférica varia ao longo do ano de forma contrária às demais variáveis climáticas, sendo mais elevada no inverno e reduzindo suas taxas no



verão, pode-se entender os índices de correlação inversa observado, que chegam até -0,9.

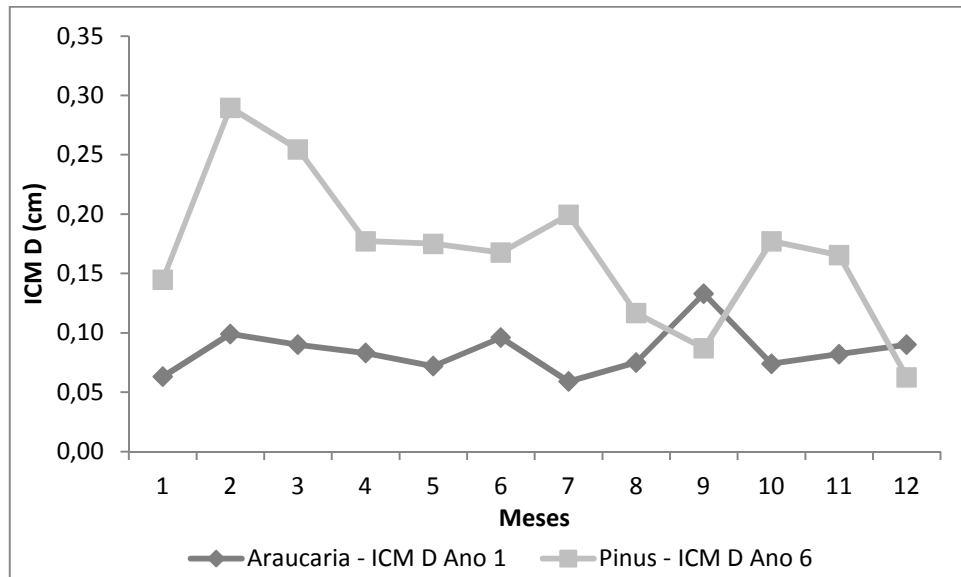


FIGURA 5. 2 – INCREMENTO CORRENTE MENSAL EM DIÂMETRO NO PRIMEIRO ANO DE MEDIÇÃO PARA *Araucaria angustifolia* E NO SEXTO ANO DE MEDIÇÃO PARA *Pinus taeda*  
 FONTE: O autor (2013).

Ferreira e Couto (1981) avaliaram a pressão atmosférica como uma variável fortemente correlacionada com a altitude, determinando a altitude local de plantio como um fator de grande influência sobre o crescimento em altura de povoamentos de *Eucalyptus* spp localizados em Minas Gerais e Espírito Santo, sendo que para todas as espécies estudadas o aumento da altitude acarretou um menor desenvolvimento em altura.

Ainda segundo Schober<sup>2</sup> (1949, citado por ASSMANN, 1970), plantios localizados em maiores altitudes tendem a iniciar seu crescimento mais tardiamente no ano vegetativo e apresentar maior duração do período de crescimento ao longo do ano, tendo sido observado por esse autor que o crescimento em diâmetro iniciou cerca de 2 a 4 semanas depois na altitude de 500 m, comparativamente à de 300m. Com isso, percebe-se a grande influência que a altitude, e conseqüentemente a pressão atmosférica exercem sobre o crescimento em diâmetro e altura das árvores, conforme expresso na matriz de correlação do presente trabalho (TABELA 5.1).

<sup>2</sup> Schober (1949) *Die Lärche* (Hanover).

### 5.3.2. Modelagem biológica da produção mensal com inclusão de variáveis climáticas

As variáveis climáticas mensais dos seis anos de avaliação, provenientes das estações meteorológicas de Curitiba e Pinhais foram submetidas à Análise de Componentes Principais (ACP). A ACP iniciou com oito variáveis climáticas, dentre as quais foram selecionadas por meio do critério de Kaiser (autovalor > 1) apenas duas componentes principais. Em todos os anos avaliados, para ambos os povoamentos, essas duas variáveis meteorológicas selecionadas explicaram cerca de 90% da variabilidade de todas as variáveis. Segundo Maestri (2003) variáveis obtidas por meio da ACP possuem baixa correlação entre si, evitando assim efeitos de multicolinearidade nos modelos. Isto significa que as oito variáveis explicativas estudadas podem ser substituídas por duas componentes principais, com perda de apenas 10 % de informação.

Com isso, pode-se observar, na TABELA 5.2, de forma a exemplificar, a ACP feita para o quarto ano de medição da estação meteorológica de Pinhais, representando as variáveis que serão inseridas no modelo biológico de Chapman-Richards para a produção em diâmetro e altura de *A. angustifolia*. O mesmo procedimento foi realizado para *P. taeda*, com os dados da estação meteorológica de Curitiba.

Na TABELA 5.2, pode-se perceber que as duas Componentes Principais (CP) selecionadas representam 89,36% da variabilidade total das variáveis climáticas para o período de agosto de 2009 a julho de 2010. Além disso, as variáveis climáticas que apresentaram maior peso na CP1 e CP2 foram fotoperíodo e umidade relativa, respectivamente, sendo, portanto as variáveis a serem incluídas na modelagem da produção mensal de diâmetro e altura de *A. angustifolia* para o período vegetativo referente aos quatro anos de idade do plantio. Segundo Maestri (2003), selecionando-se uma variável de cada uma das primeiras componentes, e essa sendo a de maior coeficiente absoluto, estará selecionando-se aquelas variáveis que mais explicam a variabilidade total e que menos relação apresentam entre si.

TABELA 5. 2 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS DADOS METEOROLÓGICOS DE PINHAIS, PARA *Araucaria angustifolia*, REFERENTE AO QUARTO ANO DE AVALIAÇÃO (AGO/2009 A JUL/2010).

Nº da Componente	Autovalor	% de Variância	% Acumulada	Var. climáticas	Componente Principal 1	Componente Principal 2
1	5,618	70,223	70,223	<b>Foto</b>	<b>0,4135</b>	0,0703
2	<b>1,531</b>	<b>19,139</b>	<b>89,362</b>	Pp (mm)	0,2695	0,4697
3	0,463	5,794	95,156	Pressão	-0,3802	-0,0751
4	0,295	3,691	98,846	Rad solar	0,3321	-0,3955
5	0,063	0,791	99,638	Tmáx	0,4040	-0,1555
6	0,026	0,324	99,961	Tmedia	0,4086	-0,0847
7	0,003	0,036	99,998	Tmín	0,4101	0,0039
8	1,67E-04	0,002	100	<b>UR</b>	0,0563	<b>0,7623</b>

FONTE: O autor (2013).

A ACP realizada para os demais anos de avaliação selecionou as variáveis climáticas apresentadas na TABELA 5.3, as quais foram incluídas na modelagem da produção mensal de diâmetro e altura de ambas as espécies. Pode-se perceber que grande parte das Componentes Principais 1 (CP1) possui como variável climática com maior peso uma que represente a temperatura, ou ainda o fotoperíodo. Já na CP2 houve predominância da precipitação e umidade relativa, ambas variáveis que representam a disponibilidade de água para o desenvolvimento das árvores. Dessa maneira, pode-se perceber que a ACP corroborou com o apresentado na matriz de correlação, uma vez que foram selecionadas as variáveis climáticas que causam maior efeito no crescimento mensal.

TABELA 5. 3 – VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SELECIONADAS PELA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA OS SEIS ANOS DE AVALIAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE CURITIBA E DE PINHAIS.

Período de avaliação	<i>Estação Meteorológica Curitiba</i>		<i>Estação Meteorológica Pinhais</i>	
	<i>Pinus taeda</i>		<i>Araucaria angustifolia</i>	
Ano 1	Tmín	Rad solar	Tmín	UR
Ano 2	Tmín	Rad solar	Foto	Rad solar
Ano 3	Tmín	Pp	Tmedia	UR
Ano 4	Tmedia	Pp	Foto	UR
Ano 5	Foto	UR	Tmedia	UR
Ano 6	Tmáx	Pp	Foto	UR

FONTE: O autor (2013).

A radiação solar também foi selecionada como CP2 para os anos 1 e 2 de medição de *P. taeda* e apenas no ano 2 de *A. angustifolia*. Segundo Ferreira (2009), esta variável possui também importante efeito sobre o crescimento, uma vez que a

fotossíntese é iniciada pela radiação fotossinteticamente ativa, sendo a radiação que é absorvida dependente do índice de área foliar (IAF) das árvores.

Com a definição das variáveis climáticas a serem incluídas na modelagem da produção mensal nos seis anos de avaliação, pode-se observar na TABELA 5.4 os coeficientes da equação e os parâmetros de ajuste e precisão da equação de Chapman-Richards na forma tradicional e com a inclusão das variáveis climáticas.

Analisando-se os valores dos coeficientes  $c_1$  e  $c_2$ , componentes do fator modificador da assíntota ( $Mod_A$ ) nas equações com a inclusão das variáveis climáticas, pode-se observar que o coeficiente  $c_1$  apresentou de maneira geral um maior valor em relação ao  $c_2$ , causando maior efeito na assíntota e confirmando, desta forma, a maior representatividade da variável climática da CP1 no crescimento das árvores, que conforme apresentado anteriormente representa as variáveis temperatura e fotoperíodo.

De maneira a ilustrar como a formulação do modificador da assíntota foi inserida no modelo de Chapman-Richards, é apresentada a seguir a equação (3) que descreve o  $Mod_A$  para o modelo de ajuste da produção mensal em diâmetro no Ano 1 de medição (junho 2006 a julho de 2007) de *P. taeda*.

$$Mod_A = \frac{6,2914}{1 - [(0,0132 * T_{\min}) + (-0,0002 * UR)]} \quad (5.3)$$

Conforme apresentado na TABELA 5.4, os modelos com a inclusão das variáveis climáticas apresentaram bons ajustes, com elevados valores de IA e com redução no erro padrão da estimativa percentual em média de 0,5% para *A. angustifolia* e 0,8% para *P. taeda*, evidenciando que o efeito dessas variáveis no crescimento das espécies colaborou no ajuste da produção mensal.

TABELA 5. 4 – PARÂMETROS E COEFICIENTES DE AJUSTE E PRECISÃO DO MODELO DE CHAPMAN-RICHARDS PARA O AJUSTE DA PRODUÇÃO MENSAL EM DIÂMETRO (D) E ALTURA (H) DE *Araucaria angustifolia* E *Pinus taeda*, SEM (SVC) E COM (CVC) A INCLUSÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.

Idade	Var.	Tipo	<i>Araucaria angustifolia</i>							<i>Pinus taeda</i>						
			A	k	m	c1	c2	IA	Syx%	A	K	m	c1	c2	IA	Syx%
Ano 1	D	SVC	1,4270	0,1277	0,3903	-	-	0,7388	37,84	6,2914	0,1931	0,5888	-	-	0,9659	12,99
		CVC	1,5800	0,0826	0,2401	-0,0101	0,0028	0,6918	36,35	8,4300	0,0946	0,4121	0,0132	-0,0002	0,9602	12,29
	H	SVC	1,0018	0,1292	0,0000	-	-	0,6412	35,66	2,1729	0,3392	0,7704	-	-	0,9312	18,80
		CVC	0,9424	0,1449	0,0000	-0,0061	0,0009	0,5218	37,44	2,4700	0,1633	0,5473	0,0219	-0,0006	0,9230	17,83
Ano 2	D	SVC	4,3122	0,0767	0,0929	-	-	0,8852	20,87	7,3312	0,1515	0,4863	-	-	0,9615	13,46
		CVC	4,1258	0,0951	0,1221	-0,0030	-0,0002	0,8486	20,27	9,9380	0,0772	0,3407	0,0103	-2,2E-05	0,9531	12,95
	H	SVC	1,7444	0,3260	0,8309	-	-	0,9475	18,83	2,0521	0,4236	0,8678	-	-	0,9519	16,91
		CVC	1,8600	0,3408	0,8361	0,0001	-0,0004	0,9391	18,22	1,8737	0,3193	0,8057	0,0067	0,0004	0,9445	16,18
Ano 3	D	SVC	4,1678	0,1729	0,3941	-	-	0,9621	11,85	6,1763	0,1204	0,2201	-	-	0,8968	19,52
		CVC	3,6582	0,1531	0,3720	0,0045	0,0014	0,9496	11,55	10,009	0,0427	0,0115	0,0079	0,0001	0,8657	18,81
	H	SVC	2,0871	0,2560	0,6651	-	-	0,9367	17,74	2,0801	0,3654	0,8267	-	-	0,9606	14,88
		CVC	2,0300	0,2295	0,6405	0,0053	0,0001	0,9218	17,27	2,0001	0,2756	0,7514	0,0088	0,0003	0,9545	14,16
Ano 4	D	SVC	4,3914	0,1518	0,4343	-	-	0,8858	22,87	5,8306	0,1460	0,3665	-	-	0,8723	23,35
		CVC	3,6196	0,1126	0,3752	0,0129	0,0019	0,8571	22,22	6,6597	0,0892	0,2384	0,0079	-0,0001	0,8389	22,59
	H	SVC	1,6234	0,3489	0,7655	-	-	0,9552	14,91	1,9455	0,4129	0,8526	-	-	0,9681	13,29
		CVC	1,5002	0,3805	0,7868	-0,0138	0,0024	0,9449	14,48	1,8104	0,3548	0,8153	0,0061	3,4E-05	0,9621	12,83
Ano 5	D	SVC	3,9219	0,1641	0,4436	-	-	0,9174	18,93	6,3711	0,0755	0,1949	-	-	0,7791	31,66
		CVC	3,6229	0,1549	0,4270	0,0008	0,0010	0,8959	18,33	6,7998	0,0689	0,1814	0,0041	-0,0006	0,7238	30,71
	H	SVC	1,5641	0,4103	0,8491	-	-	0,9509	16,46	1,8148	0,3410	0,8028	-	-	0,9191	21,18
		CVC	2,2466	0,3639	0,8232	0,0138	-0,0068	0,9413	15,89	1,0102	0,1774	0,6259	0,0200	0,0043	0,9066	20,15
Ano 6	D	SVC	4,3932	0,1688	0,4272	-	-	0,8365	27,11	3,0697	0,0972	0,1446	-	-	0,6992	37,29
		CVC	4,1163	0,2233	0,5007	-0,0253	0,0025	0,7984	26,09	2,9608	0,1405	0,2554	-0,0062	-4,0E-05	0,6313	35,91
	H	SVC	1,6546	0,3776	0,8708	-	-	0,9467	18,65	1,6395	0,3862	0,8155	-	-	0,9296	18,87
		CVC	1,1100	0,3439	0,8547	0,0143	0,0022	0,9393	17,94	1,4015	0,2735	0,7095	0,0102	-2,0E-05	0,9181	17,87

FONTE: O autor (2013).

Souza (2004) desenvolveu modelos para seis experimentos de Ipê-felpudo em Linhares, ES, com diferentes espaçamentos, os quais apresentaram como variáveis climáticas mais frequentes o inverso da deficiência hídrica acumulada, a precipitação acumulada e o logaritmo natural da precipitação acumulada, sendo os coeficientes de determinação dessas equações superiores a 0,93. Esse resultado corrobora com os elevados valores de  $R^2_{aj}$  apresentados pelos modelos de produção com a inclusão das variáveis climáticas presentes na TABELA 5.4, os quais estão muito próximos aos presentes nos modelos biológicos tradicionais.

Ferreira (2009) realizou o ajuste da produção para as variáveis sítio, área basal e volume de *Eucalyptus* spp. sem e com a inclusão das variáveis climáticas, selecionadas por ACP. Essa autora obteve para a equação de ajuste de sítio um  $Syx\%$  de 6,9 no modelo tradicional e de 6,1 com a inclusão das variáveis do clima, para volume a diferença foi de 5,7 para 5,2%; já para área basal, ambas apresentaram  $Syx\%$  iguais a 5%. Os resultados obtidos por Ferreira (2009) são semelhantes aos da presente pesquisa, uma vez que possuem percentuais de melhoria na precisão das equações após a inclusão das variáveis climáticas na modelagem muito semelhantes, e inferiores a 1%.

Maestri (2003), comparando o modelo tradicional de altura dominante para *Eucalyptus grandis* com um modelo que incluiu variáveis ambientais, observou um ganho em precisão para o modelo com variáveis selecionadas por ACP de 0,2 m em termos absolutos, considerando que o modelo tradicional apresentou um  $Syx$  de 1,43 m e o modelo mecanístico igual a 1,23 m. Já Temps (2005) observou que com a inclusão da variável climática no modelo de crescimento e produção de *P. taeda*, a equação ajustada apresentou um ganho significativo na prognose da altura dominante, atingindo uma redução do erro padrão da estimativa absoluta de 0,53 m para 0,49 m.

Foi conduzida uma Análise de variância (ANOVA) para verificar se há diferença estatística entre os modelos sem e com a inclusão das variáveis climáticas. Os resultados mostraram que para todos os anos de avaliação os modelos ajustados SVC e CVC tiveram valor de F próximo a zero e valor de p próximo de 1 na ANOVA, para um nível de significância de 0,05, permitindo concluir não haver diferença estatística entre as estimativas obtidas pelos modelos de Chapman-Richards ajustados com a inclusão das variáveis climáticas, comparativamente ao tradicional.

#### 5.4. CONCLUSÃO

As variáveis que apresentam maior correlação direta com o incremento mensal de diâmetro e altura de *A. angustifolia* e *P. taeda* foram temperatura e fotoperíodo. Além de ter sido observada correlação inversa com a variável pressão atmosférica.

A precipitação apresentou correlação com o crescimento mensal nos anos em que os índices pluviométricos foram mais elevados e apresentaram maior regularidade, com precipitação maior durante o verão e menor durante o inverno.

A variável diâmetro para as duas espécies estudadas apresentou menor correlação com as variáveis climáticas comparativamente a altura.

A ACP selecionou duas variáveis climáticas para inclusão nos modelos de produção, com perda de apenas 10% de explicação de variabilidade. Além disso, as variáveis selecionadas por esse método representaram as que possuíam correlação com o crescimento mensal.

Apesar de uma sensível redução no erro das estimativas com a inclusão de variáveis climáticas no modelo de Chapman-Richards, observou-se não haver diferença estatística entre os modelos tradicionais e os que incluíram essas variáveis em sua composição.

## 5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study – Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands.** Oxford/ New York/ Toronto/ Sydney/ Braunschweig. Pergamon press, 1970. 506p.

BOGNOLA, I. A. **Unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico.** Tese (Doutorado). Setor de ciências Agrárias, UFPR. Curitiba, 2007. 180p.

BROWN, C. L. Secondary Growth. In: ZIMMERMANN, M. H.; BROWN, C. L. (Ed.) **Trees Structure and Function.** Nova York: Spring-Verlag, 1974a. 336p.

BROWN, C. L. Growth and Form. In: ZIMMERMANN, M. H.; BROWN, C. L. (Ed.) **Trees Structure and Function.** Nova York: Spring-Verlag, 1974b. 336p.

FERREIRA, C. A.; COUTO, H. T. Z. A influência de variáveis ambientais no crescimento de espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. **Boletim da Pesquisa Florestal**, n.3, p. 9-35, dez. 1981.

FERREIRA, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e produção de *Eucalyptus* sp.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, UFLA. Lavras. 2009.101p.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis.** 6a ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey: 2007. 773p.

LÜTTGE, U.; HERTEL, B. Diurnal and annual rhythms in trees. **Trees**, n.23, p. 683-700, 2009.

LUZ, A. L. de O. M.; **Análise da formação dos anéis de crescimento anual das árvores ao longo dum ciclo de actividade cambial.** Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2011. 101p.

MACHADO, S. A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R.; NASCIMENTO, R. G. M; QUIRINO, S. M. S; TÉO, S. J. Dinâmica de crescimento de plantios jovens de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 165-170, mai/jul. 2010.



MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais.** Tese (Doutorado). Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Curitiba. 2003. 143p.

OLIVEIRA, J. M. **Anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze: bases de dendroecologia em ecossistemas subtropicais montanos no Brasil.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2007. 139p.

SETTE JR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. dos S.; LACLAU, J. P. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Rev. Árvore.** 2010, vol.34, n.6, pp. 979-990.

SILVA, G. J.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; BRAUWERS, L. R.; DURAN, J. A. R. Avaliação de plantas adultas de espécies arbóreas do cerrado em função do clima. **Revista Agricultura Tropical**, Cuiabá, v.8, n.1, p.43-56, 2004.

SOUZA, C. C. **Modelo de crescimento, com variáveis ambientais, para o ipê felpudo em diferentes espaçamentos.** Dissertação (mestrado), Mestrado em Recursos Florestais, Esalq, USP. Piracicaba, 2004. 96p.

STAPE, J. L.; GOMES, A. N.; de ASSIS, T. F. Estimativa da produtividade de povoamentos monoclonais de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no nordeste do Estado da Bahia – Brasil em função das variabilidades pluviométricas e edáficas. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, Salvador, 1997. **Anais.** Colombo: EMBRAPA/CNPF, 1997, v.4, p 192-198.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** Dissertação (Mestrado), Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Curitiba, 2005. 117p.

ZANON, M. L. B. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. diferenciado por dioícia.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. 110p.

ZEIDE, B. *Analysis of Growth Equation.* **Forest Science**, v. 39, n. 3, p.594-616. August, 1993.