

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

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO
CRESCIMENTO DA COPA E DO INCREMENTO DE
ÁRVORES ISOLADAS DE *Cedrela fissilis* Vell.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jean Pierre Cavalli

Santa Maria, RS, Brasil

2013

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO
CRESCIMENTO DA COPA E DO INCREMENTO DE
ÁRVORES ISOLADAS DE *Cedrela fissilis* Vell.**

Jean Pierre Cavalli

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

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Santa Maria, RS, Brasil

2013

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

Cavalli, Jean Pierre

Caracterização e modelagem do crescimento da copa e do incremento de árvores isoladas de *Cedrela fissilis* Vell.

/ Jean Pierre Cavalli.-2013.

95 p.; 30cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finger

Coorientadores: Miguel Antônio Durlo, Paulo Renato Schneider

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2013

1. Modelagem do crescimento da copa e incremento 2. Descrição morfométrica por meio de fotos digitalizadas I. Finger, César Augusto Guimarães II. Durlo, Miguel Antônio III. Schneider, Paulo Renato IV. Título.

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

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

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO CRESIMENTO DA COPA E
DO INCREMENTO DE ÁRVORES ISOLADAS *Cedrela fissilis* Vell.**

Elaborada por
Jean Pierre Cavalli

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

COMISSÃO EXAMINADORA

**Cesar Augusto Guimarães Finger
(Presidente/Orientador)**

Frederico Dimas Fleig, Dr. (UFSM)

Paulo Cesar Botosso (EMBRAPA FLORESTAS)

Santa Maria, 01 de março de 2013.

AGRADECIMENTOS

À minha querida família, em especial à minha mãe Sonia e ao meu pai Jorge (in memória) pelo apoio e incentivo despendidos a mim em todos os momentos e desafios vividos.

À minha namorada, companheira e amiga, Silvia, pela presença, carinho e compreensão, principalmente nas longas noites de trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, pelos ensinamentos e conhecimento compartilhados, e acima de tudo, pela amizade e confiança depositada em mim durante o desenvolvimento deste projeto.

Aos professores Jorge Antonio Farias, Paulo Renato Schneider, Miguel Antão Durlo e Frederico Dimas Fleig, pelos conhecimentos compartilhados e pela atenção dispensada incondicionalmente.

Aos colegas de Pós-Graduação Régis, Thiago, Evandro, Flavio, Gabriel, David, Rafael, Emanuel, Emanuel Arnoni, Lílian, Thomas e Clândio, os quais acrescentaram muito a minha formação, principalmente com suas ideias, sugestões e apoio técnico, certamente indispensáveis à conclusão do projeto.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e ao CNPq, pela oportunidade, infraestrutura e aporte técnico e financeiro disponibilizados durante a realização do projeto.

A todos os amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para que este projeto fosse concluído.

E finalmente agradeço a Deus, pela vida e saúde, com as quais trabalhei e concluí esta etapa em plenas condições físicas e mentais, sempre com responsabilidade e cuidado para que tudo ocorresse sem maiores percalços ou problemas.

MUITO OBRIGADO!

DEDICATÓRIA

*Ao meu querido Pai Jorge que tanto
amo e tenho saudades.....*

RESUMO

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

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO CRESCIMENTO DA COPA E DO INCREMENTO DE ÁRVORES ISOLADAS DE *Cedrela fissillis* Vell.

AUTOR: JEAN PIERRE CAVALLI
ORIENTADOR: CESAR AUGUSTO GUIMARÃES FINGER
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 1 de março de 2013.

Na avaliação do crescimento de árvores isoladas foram selecionadas 57 amostras, das quais se mensurou variáveis morfométricas em fotos digitalizadas no software AutoCAD e dendrométricas a partir de rolos de incremento coletados na altura do DAP. O desenvolvimento desta pesquisa teve como objetivo descrever as dimensões individuais e reconstituir o crescimento da copa e fuste de árvores isoladas de *Cedrela fissillis*, avaliado de 2007 a 2011, e construir equações matemáticas para descrever o crescimento da variável diâmetro da copa (DC), manto de copa (MC), diâmetro da copa em alturas relativas (DChi) e incremento periódico anual em área basal (IPAg). Nos alongamentos anuais (ALG) foram verificados valores mínimo, máximo e médio anual de 3,0, 91,0 e 32,4 cm, respectivamente. Assim como correlações em série, determinada por $r = 0,76$ a $0,86$ ($Pr < 0,0001$), tendo sido observados maiores alongamentos nas menores ordens de ramificação. Nos alongamentos periódicos (ALGP), correspondente ao período 2007-2011, verificaram-se valores médios de até 1,82 m, observado na classe diamétrica 30-40 cm, com coeficiente de variação (CV) máximo de 67,67%, verificado na classe > 60 cm. Para a construção dos modelos de crescimento foram selecionadas 35 árvores de acordo com sua condição de copa e fuste, sendo descartada a classe diamétrica > 60 cm devido a pouca amostragem. Para o manto de copa o modelo $LNMC = b_0 + b_1 \cdot (1/DAP) + b_2 \cdot (DAP^2)$ apresentou bom ajuste ($R^2_{aj.} = 0,92$ e $CV = 6,12\%$). A equação da variável alongamento anual da copa, $ALG = b_0 + b_1 \cdot (LNICA) + b_2 \cdot (DAP)$, apresentou o ajuste comprometido pelo alto erro percentual ($R^2_{aj.} = 0,50$; $CV = 35,95\%$), descrevendo até 50% da variância total. Com precisão semelhante à ALG, o modelo ajustado para a variável crescimento da copa em diâmetro, $CCD = b_0 + b_1 \cdot (LNICA)$, apresentou altas taxas de erro percentual, com precisão estatística definida por $CV = 36,25\%$; $R^2_{aj.} = 0,44$. Para o modelo DChi o ajuste foi descrito por $R^2_{aj.} = 0,58$ e $CV = 52,41\%$, tendo sido definido o modelo $LNDChi = b_0 + b_1 \cdot (LNDAP) + b_2 \cdot (1/h_i^2) + b_3 \cdot (DAP^2)$, tendo o mesmo não apresentado distribuição normal e heterogeneidade na variância dos resíduos. O ajuste da equação para o IPAg apresentou boa precisão estatística ($R^2_{aj.} = 0,66$; $CV = 11\%$), descrevendo até 66% da variância total a partir do modelo $LNIPAg = b_0 + b_1 \cdot (DAP) + b_2 \cdot (h/d)$. Na avaliação descritiva dos incrementos observaram-se elevadas taxas de incremento periódico anual em diâmetro (IPAd) e IPAg nas classes diamétricas 25, 35 e 45 cm. Os valores de IPAd médio, mínimo e máximo foram de 3,6 cm, 0,7 e 7,3 cm, respectivamente. Nas classes 35 e 45 cm verificou-se taxa de IPAg média de 95,6 e 75,5 cm^2 , respectivamente. Em todas as classes de diâmetro foram encontradas taxas de incremento corrente anual em diâmetro (ICAd) superior a 2,5 cm. As análises do crescimento da copa de árvore isoladas demonstraram que o crescimento rítmico da mesma e sua correlação com os incrementos do fuste possibilitam a construção de modelos de crescimento com boa eficiência estatística, porém, devendo se aperfeiçoar a estratificação fazendo uso de informações que descrevam as condições dos sítios. A metodologia de avaliação a partir de fotos digitalizadas também apresentou boa precisão e praticidade, podendo ser amplamente utilizada na avaliação de árvores singulares ou isoladas.

Palavras-chave: Alongamento da copa. Fotos digitalizadas. Crescimento rítmico.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Forest Engineering Post Graduation Program
Universidade Federal de Santa Maria

CARACTERIZATION AND MODELING OF CROWN AND INCREMENT OF *Cedrela fissilis* (Vell.) OPEN-GROWN TREES

AUTHOR: JEAN PIERRE CAVALLI
MASTERMIND: CESAR AUGUSTO GUIMARÃES FINGER
Date and Local: Santa Maria, March 1, 2013.

On the growth evaluation of the open-grown trees was selected 57 samples, of which were mensuration many morphometric variables from digital photographs in software AutoCAD and dendrometrics variables in bole increment extracted in diameter breast height (DBH). The development of this research was to described the singular dimensions and recover crown and bole growth from open-grown *Cedrela fissilis*, corresponding to period 2007-2011, and build mathematical equations to described the growth of variable crown diameter (CD), mantle of the crown (MC), crown diameter in relative heights (CDrh) and periodic annual increment in basal area (PAIb). In the annual lengthening (AL) were observed minimum, maximum and median annual values of 3.0, 91.0 and 32.4 cm, respectively. As well as, serie correlations, determined by Pearson ($r = 0.76$ a 0.86 ; $Pr < .0001$), with higher lengthening connected to the lower orders of branching. In periodic lengthening (PL), corresponding to the period of 2007-2011 there were values of up to 1.82 m, found in diameter class 30-40, with a coefficient of variation (CV) up to 67.67%, checked in diametric class > 60 . To model growth construction 35 trees were selected from 57 initially sampled considering it crown and bole conditions, having been discarded sample of the > 60 diametric class. To the mantle of the crown variable the model $NLMC = b_0 + b_1 * (1/DBH) + b_2 * (DBH^2)$ has good adjust ($R^2_{adj} = 0.92$; $VC = 6.12\%$). The equation to annual lengthening of the crown, $ALC = b_0 + b_1 * (NLCAI) + b_2 * (DBH)$ showed adjustment and precision ($R^2_{adj} = 0.50$; $VC = 35.95\%$), it explaining until 50% total variance, but with higher percent residual. With similar precision, the model adjusted to crown growth in diameter, $CGD = b_0 + b_1 * (NLCAI)$, had statistical precision defined to $R^2_{adj} = 0.44$ and $VC = 36.25\%$, with higher VC resulted from the higher variance in samples. To the CDrh the adjust was represented to $R^2_{adj} = 0.58$ and $VC = 52.41\%$, had been defined the model $NLCDrh = b_0 + b_1 * (NLDBH) + b_2 * (1/hi^2) + b_3 * (DBH^2)$, with the results of residual evaluations didn't submit normality distribution and homogeny variance. The adjust to CAIb equation showed good statistical precision ($R^2_{adj} = 0.66$; $VC = 11\%$), it explaining until 66% total variance from model $NLCAIb = b_0 + b_1 * (DBH) + b_2 * (h/d)$. On the increment descriptive analyses it observed high periodic annual increment in diameter (PAId) and PAIb in the 25, 35 and 45 cm diameter class. The PAId medium, minimum and maximum values correspond to 3.6 cm, 0.7 cm and 7.3 cm. At the 35 and 45 cm class it observed 95.6 and 75.5 PAIb average, respectively. All of the diameter classes it was observed current annual increment in diameter (CAId) higher 2.5 cm. The crown growth reviews from the open-grown trees demonstrated that the crown growth rhythmic and its correlation with the bole increments it turn possible to build growth models characterized to good adjust and statistical efficiency, wherever, it should be stratification methods based in site informations. The methodology analyses with digital photography also showed good precision and practicality, it can be widely used to review singular and open-grown trees.

Keywords: Crown lengthening. Digital photography. Rhythmic growth.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações e descrição dos índices morfométricos avaliados.	32
Tabela 2 – Correlação de Pearson (r) observada entre a variável diâmetro à altura do peito (DAP) e as variáveis altura (h), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l).	45
Tabela 3 – Estatística descritiva e a correlação entre os alongamentos de orientação norte e sul (NS) e orientação leste e oeste (LO).	53
Tabela 4 – Correlação de Pearson (r) entre os alongamentos sequenciais, no período 2007-2011.	54
Tabela 5 – Número de árvores amostradas por classe de diâmetro.	61
Tabela 6 – Correlação de Pearson (r) entre MC e as variáveis independentes.	62
Tabela 7 – Coeficientes do modelo MC e parâmetros referentes a precisão estatística.	63
Tabela 8 – Correlação de Pearson [r] para as variáveis independentes relacionadas a variável dependente alongamento anual da copa (ALG).	66
Tabela 9 – Correlação de Pearson [r] para as variáveis independentes relacionadas à variável dependente crescimento em diâmetro anual da copa(CCD).	66
Tabela 10 – Coeficientes e parâmetros estatísticos de avaliação dos modelos ALG e CCD.	68
Tabela 11 – Resultados dos testes de Shapiro-Wilk, White e Durbi-Watson, para a distribuição residual dos modelos ALG e CCD.	69
Tabela 12 – Correlação de Pearson (r) para as variáveis explanatórias do modelo DChi.	71
Tabela 13 – Coeficientes da equação e parâmetros de avaliação estatística.	74
Tabela 14 – Correlação de Pearson (r) para as variáveis explanatórias do modelo DChi.	78
Tabela 15 – Coeficientes da equação e parâmetros de avaliação estatística.	79
Tabela 16 – Estatística descritiva do incremento periódico anual em área basal (IPAg) de 2007 a 2011, por classe diamétrica, das 35 árvores isoladas de <i>Cedrela fissilis</i>	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos municípios de Santa Maria (A) e Espumoso (B), descritos como áreas de identificação e coleta de dados.	30
Figura 2 – Régua com dimensões de 0,15 x 1,5 m, utilizada como escala das imagens digitalizadas.	33
Figura 3 – Árvore isolada de <i>Cedrela fissilis</i> fotografada em duas perspectivas distintas (LO, NS), com escala fixa a 1,3 m do solo (DAP).	34
Figura 4 – Fotografia digitalizada, com suas variáveis morfométricas diâmetros de copa (a) e manto de copa (b), mensuradas no software AutoCAD.	35
Figura 5 – (a) Cone de base circular com geratriz (g) definida a partir do perímetro da copa e do raio de copa (r); (b) Equação utilizada na obtenção da área lateral do cone ou área do manto da copa.	36
Figura 6 – (a) Cicatrizes de crescimento anuais observadas na delimitação dos nódulos de crescimento; (b) amostra da base do galho, sincronizados com os nódulos pela avaliação dendrocronológica.	38
Figura 7 – (a) Amostra digitalizada para definição do ângulo de inclinação dos crescimentos anuais; (b) determinação do crescimento em diâmetro (DC) a partir do ângulo (α) e do alongamento anual.	39
Figura 8 – Tendência de distribuição da variável altura total (h) em função da variável DAP (a); distribuição da variável diâmetro de copa (DC) em função do DAP (b); distribuição da variável comprimento de copa (l) em função do DAP (c), com respectivos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj}).	44
Figura 9 – Dinâmica da relação (h/d) em função da variável DAP das árvores amostradas.	46
Figura 10 – Tendência observada no índice porcentagem de copa (PC%) em função do DAP.	47
Figura 11 – Comportamento do índice de saliência (IS) relacionado à evolução da variável DAP.	48
Figura 12 – Índice formal de copa (FC) relacionado à variável DAP das árvores amostradas.	49
Figura 13 – Representação em perspectiva 3D da evolução da copa das árvores isoladas de <i>Cedrela fissilis</i> , nas respectivas classes de diâmetro, estando destacado o manto de copa na cor verde.	50
Figura 14 – Árvore jovem de <i>Cedrela fissilis</i> (a); ramificação de árvore adulta de <i>Cedrela fissilis</i> (b).	51
Figura 15 – Alongamentos médios anuais apresentados por ordem de ramificação e ano.	55
Figura 16 – Alongamento da copa no período 2007-2011 (ALGP), estratificados em classes diamétricas, com suas respectivas médias e coeficiente de variação (%).	56
Figura 17 – Comportamento do ângulo de inclinação da copa em função da altura (h) e do DAP.	58
Figura 18 – Dinâmica do ângulo de inclinação da copa em função da relação h/d e das taxas de alongamento anuais (ALG).	59
Figura 19 – Perfil transversal das copas, por classes diamétricas, com a área hachurada representando o crescimento no período 2007-2011, e seus respectivos ângulos de inclinação.	60
Figura 21 – Distribuição dos resíduos percentuais em função dos valores estimados de manto de copa (MC), apresentado em sua unidade original.	65
Figura 24 – Distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de ALG (m).	70
Figura 25 – Distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de CCD (m).	70
Figura 26 – Distribuição dos valores observados da variável diâmetro de copa a altura relativa i (DChi).	73
Figura 27 – Distribuição da variável LNDChi, definida como DChi transformada pela função logaritmo natural (LN).	73
Figura 29 – Histograma de distribuição dos resíduos percentuais relacionados à linha de distribuição normal (Gauss).	76
Figura 30 – Distribuição dos resíduos percentuais em função aos valores estimados da variável DChi (m).	77
Figura 31 – Distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de IPAg (cm ²).	80
Figura 32 – Dinâmica do crescimento periódico anual em diâmetro (IPAd) em função das 35 árvores amostradas, por classe diamétrica.	82

LISTE DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IPA – incremento periódico anual em diâmetro

IPAg – incremento periódico anual em área basal

ICA – incremento corrente anual em diâmetro

ICAg – incremento corrente anual em área basal

ICAg² – incremento corrente anual em área basal ao quadrado

IPd – incremento periódico em diâmetro

IPg – incremento periódico em área basal

LNICA – logaritmo natural do incremento corrente anual em diâmetro

LNICAg – logaritmo natural do incremento corrente anual em área basal

DAP – diâmetro à altura do peito (1,3 metros de altura)

LNDAP – logaritmo natural do DAP

DC – diâmetro de copa

l – comprimento de copa

h – altura total

g – área basal

d – diâmetro FC – formal de copa

IS – índice de saliência

PC – porcentagem de copa

h/d – relação hipsométrica

MC – manto de copa

ALG – alongamento anual da copa

CCD – crescimento anual da copa em diâmetro

ALGP – alongamento periódico da copa

ANG – ângulo de inclinação do galho

hi – altura relativa da copa

DChi – diâmetro da copa na altura relativa *i*

NS – orientação Norte – Sul

LO – orientação Leste – Oeste

FIV – fator de inflação da variância

LN – logaritmo natural

F – valor de F

CV% – coeficiente de variação em percentagem

$R^2_{aj.}$ – coeficiente de determinação ajustado

DW – teste de Durbin-Watson

SW – teste de Shapiro-Wilk

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	Hipóteses do trabalho	17
2	Revisão bibliográfica	18
2.1	Dinâmica do crescimento das árvores	18
2.2	Forma e arquitetura das árvores	19
2.3	Índices de morfometria	21
2.4	Caracterização de <i>Cedrela fissilis</i> Vell.	22
2.5	Manejo de floresta natural	24
2.6	Modelagem do crescimento	26
2.7	Dendrocronologia	27
3	Material e métodos	30
3.1	Descrição da área de estudo	30
3.1.1	Caracterização climática.....	31
3.2	Levantamento de dados	31
3.2.1	Variáveis dendrométricas mensuradas	32
3.2.2	Índices morfométricos e variáveis de copa.....	32
3.2.3	Correção das distorções fotográficas	36
3.2.4	Alongamento dos ramos e o diâmetro anual da copa	37
3.2.5	Crescimento periódico em área basal	40
3.2.6	Modelagem da copa das árvores.....	40
3.3	Processamento estatístico dos dados	41
3.3.1	Modelagem e condicionantes da equação de regressão	41
4	Resultados e discussão	43
4.1	Morfometria de árvores isoladas	43
4.1.1	Dimensões individuais.....	43
4.1.2	Índices morfométricos	45
4.1.2.1	Relação altura e diâmetro (h/d)	45
4.1.2.2	Porcentagem de copa.....	46
4.1.2.3	Índice de saliência	48
4.1.2.4	Formal de copa	49
4.2	Crescimento da copa	52
4.2.1	Alongamento anual da copa	52
4.2.2	Alongamentos periódicos da copa (ALGP).....	56
4.2.3	Ângulo de inclinação dos galhos e crescimento em diâmetro	58
4.3	Modelagem da copa	61
4.3.1	Modelagem do manto da copa.....	62
4.3.1.1	Avaliação da correlação.....	62
4.3.1.2	Construção e validação do modelo de crescimento	63
4.3.1.3	Avaliação dos resíduos	64
4.3.2	Modelagem do alongamento e crescimento em diâmetro da copa	65
4.3.2.1	Seleção das variáveis independentes	65
4.3.2.2	Construção e validação dos modelos de crescimento	67
4.3.2.3	Avaliação dos resíduos	69
4.3.3	Modelagem dos diâmetros da copa (DChi)	71
4.3.3.1	Avaliação da correlação e seleção das variáveis.....	71
4.3.3.2	Construção, ajuste e validação do modelo de crescimento.....	72
4.3.3.3	Análise dos resíduos	75
4.4	Modelagem do incremento periódico em área basal (IPAg)	77
4.4.1	Avaliação da correlação e seleção das variáveis.....	78
4.4.2	Construção, ajuste e validação do modelo.....	78
4.4.3	Análise dos resíduos	80
4.5	Descrição e caracterização do incremento	81

5	Conclusões.....	84
	Recomendações.....	85
	Referências bibliográfica.....	86

1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de tecnologias voltadas à maior produção e melhor qualidade da madeira são aplicadas diferentes metodologias de pesquisa, sempre buscando obter informações relevantes com menor custo e tempo. O acervo de informações provenientes de pesquisas e ensaios, composto pela avaliação de variáveis que explicam o crescimento da floresta, tem por objetivo auxiliar o manejo florestal para que o mesmo ocorra de forma eficiente e sustentável, com produção em equilíbrio com a exploração e manutenção da qualidade dos sítios.

O manejo florestal, em todos os seus aspectos, vêm evoluindo ao longo do tempo fazendo uso de dados provenientes de pesquisas desenvolvidas com distintas espécies arbóreas, principalmente espécies exóticas amplamente difundidas e exploradas, e espécies nativas das florestas brasileiras, conhecidas por sua madeira de qualidade e, conseqüentemente, seu alto valor de mercado. Dentro deste aspecto, as florestas são avaliadas e devidamente monitoradas, sendo que o conhecimento dos seus padrões e taxas de crescimento tem sido a principal fonte de dados utilizada no planejamento, implantação e exploração florestal.

A determinação das taxas de crescimento anuais, por meio das análises dendrocronológicas, parcelas permanentes ou temporárias, e a relação existente entre as diferentes expressões do crescimento, proporcionam ao manejador um conhecimento altamente relevante, capaz de orientar as intervenções silviculturais, possibilitando ainda a realização de prognósticos referentes à produção e rentabilidade do povoamento.

Considerando a estreita relação entre as diferentes expressões do crescimento, verifica-se que a dinâmica e magnitude do incremento diamétrico do fuste, o qual pode representar a taxa de incremento volumétrico de madeira por hectare, aparece correlacionada ao crescimento e comportamento da copa. Desta forma, estando as dimensões da copa diretamente relacionadas à capacidade fotossintetizante da árvore e à produtividade, variáveis como o diâmetro da copa podem ser consideradas como um parâmetro importante em estudos de crescimento de árvores individuais (HEMERY, et al, 2005)

Tais observações relacionadas ao crescimento da copa e fuste potencializam a relevância do conhecimento sobre as dimensões, arquitetura e padrões de crescimento da copa das árvores, devendo estas características ser devidamente avaliadas no planejamento e

durante o manejo de povoamentos florestais. A obtenção detalhada de dados referentes à arquitetura das copas e de suas interações com o ambiente, através da avaliação das ramificações e padrões de brotação, pode ser crucial para a compreensão do crescimento em diferentes condições ambientais (SACHS, 2004).

Principalmente em florestas naturais, onde o objeto de manejo é o indivíduo, faz-se necessário entender a dinâmica de crescimento da parte aérea das árvores, sua relação com o incremento em diâmetro e sua perspectiva futura, referente ao espaço vital, o qual pode ser utilizado na definição do espaçamento inicial e planejamento dos desbastes. O comportamento e estrutura das copas das árvores também podem ser úteis no planejamento e ocupação de espaços urbanos, assim como, no desenvolvimento de sistemas agroflorestais (SAFs).

A obtenção das variáveis referentes às dimensões das copas das árvores, durante suas distintas etapas de desenvolvimento, tem sido realizada, com grande êxito, em indivíduos que crescem livres de competição, isolados, os quais tendem a apresentar o máximo crescimento, representando o espaço vital de cada espécie. Nestes indivíduos a avaliação de características como o ângulo de crescimento dos ramos e galhos, magnitude dos alongamentos anuais, forma e arquitetura da copa e índices morfométricos, resulta em um banco de dados importante e que pode ser utilizado no planejamento, manejo e exploração de maciços florestais.

No manejo de florestas naturais a predição das dimensões dos indivíduos, e conseqüentemente, da evolução do povoamento, pode ser realizada por meio da utilização de equações de crescimento. A formulação destas equações ou modelos de crescimento tem como objetivo determinar o comportamento de uma variável de difícil mensuração, variável dependente, a partir de variáveis de fácil obtenção, variáveis independentes e explanatórias. As equações de crescimento ajustadas são ferramentas indispensáveis na execução e condução do manejo florestal.

Com esta perspectiva, frequentemente são elaborados modelos de crescimento onde as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP), incremento corrente anual (ICA) e altura total (h), aparecem como variáveis independentes, tendo por função descrever outras expressões do crescimento.

Em algumas espécies florestais onde o crescimento se dá de forma rítmica, os alongamentos anuais da copa são representados por nódulos de crescimento, ou unidades de crescimento, os quais têm seus limites definidos por cicatrizes terminais (HALLÉ et al., 1978).

Com base na correlação observada entre os ICAs e as unidades de crescimento anuais das copas de *Cedrela fissilis* (DA CUNHA et al., 2012), e na reconstrução do crescimento da copa e fuste por meio da técnica dendrocronológica de análise de tronco parcial, esta pesquisa propõe descrever o padrão de crescimento da parte aérea de árvores que crescem de forma isolada de cedro e ajustar equações que possam explicar a variância do crescimento de diferentes variáveis da copa, em árvores de dimensões distintas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

A partir da avaliação de árvores com crescimento livre de competição, descrever e quantificar o crescimento da copa e do incremento diamétrico de árvores de *Cedrela fissilis*.

1.1.2 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos destacam-se:

- a) Reconstruir o crescimento da copa nos últimos 5 anos, por meio da mensuração do ângulo e do crescimento anual dos galhos;
- b) Reconstruir o crescimento em área basal nos últimos 5 anos, utilizando a técnica da análise de tronco parcial;
- c) Ajustar modelos matemáticos que descrevam o crescimento da copa de árvores isoladas;
- d) Ajustar um modelo de crescimento para o incremento periódico anual em área basal (IPAg) de árvores isoladas;
- e) Descrever a dinâmica do incremento corrente anual e periódico do fuste de árvores isoladas;

1.2 Hipóteses do trabalho

A pesquisa em questão está sendo desenvolvida para responder as seguintes perguntas:

- i. Qual o tamanho, forma e magnitude do crescimento da copa de árvores isoladas de *Cedrela fissilis*?
- ii. Qual a relação do alongamento e ângulo dos nódulos de crescimento anuais da copa com o incremento em diâmetro da copa de árvores isoladas de *Cedrela fissilis*?
- iii. Qual a dimensão da taxa de crescimento periódico em área basal, sua relação com a morfometria das árvores e sua amplitude em relação ao tamanho das árvores isoladas de *Cedrela fissilis* ?
- iv. De que forma se comportam as variáveis que determinam a forma das copas e o que elas representam em um período de 5 anos?

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica do crescimento das árvores

O crescimento das árvores pode ser definido como o aumento de qualquer uma de suas dimensões, decorrente dos processos de divisão, alongamento, diferenciação e maturação das células (KOZLOWSKI, 1971). É diretamente influenciado pela capacidade genética de cada espécie e pela interação da mesma com as condições do ambiente, sendo dimensionado como diferenças no alongamento e engrossamento de raízes, fuste e galhos, em um determinado período de tempo (HUSCH *et al.*, 1982). Neste processo, o crescimento dos galhos estimula o desenvolvimento de novos tecidos de sustentação e vascularização no restante da planta, acarretando em uma relação direta entre essas taxas e o desenvolvimento dos ramos (SACHS, 2004).

As alterações nas dimensões das árvores são controladas e determinadas por estruturas fisiológicas denominadas de meristemas apicais e câmbio, os quais interferem na variação dos alongamentos e espessuras, respectivamente (OLIVER e LARSON, 1996; ESAU, 1965; HUSCH *et al.*, 1982). Os meristemas apicais, também denominados de meristemas primários, estão localizados principalmente nas porções terminais de brotos e raízes, enquanto que o câmbio, ou meristema secundário, encontra-se disposto paralelamente as estruturas como galhos, fustes e raízes, e atua posteriormente ao alongamento das estruturas primárias (ESAU, 1965; DODUEVA *et al.*, 2012).

Em algumas espécies, com ramificação lateral, os meristemas apicais desenvolvem-se no interior das axilas dos primórdios foliares, quando estes se tornam maduros. Estes meristemas, definidos como axilares, formarão os galhos, após a expansão do fuste principal. Desta forma, diferenças observadas no arranjo dos primórdios foliares e, conseqüentemente, dos meristemas axilares, acarretarão em alterações no padrão de ramificação e definição da forma da copa de espécies folhosas (OLIVER e LARSON, 1996).

O crescimento primário tem ação determinante sobre a forma das árvores, pois o alongamento dos brotos, pontas das raízes e outros meristemas apicais proporcionam o aumento superficial das plantas, a qual passa a ter maior área de contato com o ar, luz e solo. Devido a suas elevadas taxas, observadas em árvores jovens, o crescimento primário é

responsável pelas mais notáveis modificações na forma das árvores. Já o crescimento secundário, atuante no espessamento de galhos fustes e raízes, tem sua atividade relacionada à formação de células de suporte e proteção, e como consequência, é responsável pelo desenvolvimento do sistema condutor das árvores, aumento da espessura do floema e xilema, e também, pelo aumento da espessura da casca, ocasionado pela ação do câmbio cortical (ESAU, 1965; OLIVER e LARSON, 1996; ENCINAS, 2005; DODUEVA et al., 2012).

A duração e estímulos do crescimento primário variam para diferentes sítios, espécies, clima e condições hídricas, iniciando antes em espécies decíduas como *Cedrela fissilis*, em relação às coníferas, e sendo interrompido durante o período de dormência. A produção de novos tecidos também pode cessar durante uma mesma estação de crescimento, devido a fatores ambientais como déficit hídrico e fotoperíodo. Assim como podem ser observados dois períodos de crescimento primário em um mesmo período vegetativo, com a retomada do crescimento ao final do verão e início do outono, quando verificadas favoráveis condições de água e solo. (OLIVER e LARSON, 1996).

O crescimento secundário pode perdurar por mais tempo em atividade do que o crescimento primário. Seu início se dá posteriormente aos alongamentos estruturais e sua atividade mais tardia se justifica pelo fato de a mesma ser controlada por hormônios reguladores do crescimento produzidos no ápice caulinar e nas folhas. A interferência do ambiente também é determinante na dinâmica do crescimento secundário, contando como principais agentes ambientais as variáveis como luz, água, temperatura, fertilidade do solo, composição atmosférica, características físicas e químicas do solo, insetos e outros organismos (KOZLOWSKI, 1971).

De forma geral, a dinâmica do crescimento das árvores constitui-se em um comportamento descrito por uma curva sigmoideal, composta por uma fase juvenil, caracterizada por um crescimento lento e crescente, uma fase adulta, onde as taxas de crescimento são significativas, e um período de senescência, onde se observa a estabilização e decréscimo natural do crescimento (SCHNEIDER e SCHNEIDER, 2008).

2.2 Forma e arquitetura das árvores

O desenvolvimento das copas das árvores, suas dimensões e formas são determinados por padrões de crescimento, também chamados de modelos de arquitetura, os quais se

baseiam em carácter ontogenético das plantas (HALLÉ, 1978). Tais padrões não podem ser exatamente preditos, porém, com a análise dos hábitos de crescimento das espécies e de suas reações às variações do meio, torna-se possível estimar sua probabilidade. Os padrões de crescimento das copas apresentam grande variabilidade dentro e entre espécies, tanto tropicais como temperadas, devido principalmente às diferentes condições de sítio e clima (SUZUKI, 2002; OLIVER e LARSON, 1996).

Na maioria das espécies dicotiledôneas, principalmente espécies do dossel, a arquitetura das árvores é definida como uma série de repetições de crescimento, reiteraões, durante o desenvolvimento, as quais descrevem a condição hierárquica dos ramos, refletindo a dominância apical e podendo ainda ser correlacionado por um índice que explica o crescimento dos galhos (NIKINMAA et al., 2003).

Essas reiteraões, também denominadas de unidades arquiteturais ou ordens de ramificação, constituem o processo pelo qual as plantas duplicam sua arquitetura elementar, tendo este processo um padrão de crescimento no qual as reiteraões tornam-se menores e menos uniformes com o amadurecimento das árvores (HALLÉ et al., 1978).

As repetições arquitetônicas são ordenadas crescentemente a partir do fuste central, sendo que os ramos de ordens inferiores apresentam uma tendência de maior crescimento, da base para a copa das árvores, que os ramos de ordens superiores (LINTUNEN e KAITANIEMI, 2010). Nos ramos de níveis inferiores, localizados no interior da copa, ocorre competição entre os mesmos, o que acaba afetando a dinâmica do processo arquitetônico das copas (OSADA et al., 2004).

A ação dos ramos terminais, de ordens superiores, também é significativa sobre a arquitetura das copas, pois o crescimento destes determina as dimensões dos galhos, a forma da copa e o crescimento do fuste central (OLIVER e LARSON, 1996).

A identificação dos modelos de arquitetura das copas resulta da análise das características morfométricas das espécies e suas interações, sendo consideradas de alta relevância na formação arquitetônica peculiaridades como a presença ou não de ramificações vegetativas acima do solo e cicatrizes terminais de crescimento, a orientação dos eixos vegetativos, os tipos de ramificação (monopodial ou simpodial) e a localização dos órgãos reprodutores (HALLÉ et al., 1978).

Quanto às formas das copas, as mesmas apresentam uma grande diversidade, porém, segundo Kozlowski, (1971), na maioria das gimnospermas e em algumas angiospermas o crescimento desproporcional da porção central da copa resulta em uma forma cônica, denominada pelo autor de excurrentes, onde os ramos centrais crescem mais que os laterais,

mantendo um fuste centralizado. Segundo o autor, em outras situações, onde o crescimento de todas as ramificações da copa apresenta comportamento semelhante, como é visto na maior parte das angiospermas, as copas possuem formas arredondadas, denominadas pelo autor de deliquescentes.

A determinação da forma das copas está diretamente relacionada ao espaço disponível ao crescimento, sendo que em situações adversas, as copas alteram suas formas, devido a sua notável plasticidade, acomodando-se às irregularidades, porém, sem alterar sua área de projeção (HEMERY et al., 2005). O desenvolvimento e forma da copa tem relação direta com as condições de luz à qual a árvore está exposta e, principalmente, com a capacidade de adaptação da espécie às condições ambientais, direcionada à sobrevivência dos brotos e ramos (KOHYAMA, 1980).

Conforme Oliver e Larson (1996), a determinação da forma das copas também pode estar diretamente ligada ao número, comprimento, posição e direção de crescimento do fuste central e ramificações laterais, destacando que em árvores isoladas, de crescimento livre, as características referentes à forma das copas são definidas pelo gênero ou espécie. Os mesmos autores afirmam que as formas podem variar de colunar à quase planas, com predominância de copas ovais a alongadas nos indivíduos de crescimento livre.

Quando consideradas as dimensões das copas de árvores em povoamento, são observadas copas menores em relação às isoladas, sendo que em ambiente florestal a dinâmica do crescimento, desenvolvido sob diferentes níveis de competição, resulta na formação de grupos distintos, classificados por classes de copa, com alguns indivíduos se sobressaindo no dossel e outros ficando oprimidos (KOSLOVSKI, 1971; DURLO, 2001).

2.3 Índices de morfometria

Os índices morfométricos são definidos a partir das relações interdimensionais das árvores, sendo definido pela avaliação individual das mesmas. Têm grande aplicação em avaliações de povoamentos onde as condições particulares dos indivíduos fornecem informações importantes a respeito da estabilidade e desenvolvimento da floresta (DURLO et al., 2004).

Entre os índices morfométricos destaca-se a relação h/d, entre a altura total (h) e o diâmetro à altura do peito (DAP), o índice porcentagem de copa (PC%), definido como a

relação entre h e o comprimento da copa (l), o índice de saliência (IS), definido pela relação entre o diâmetro da copa (DC) e o DAP e o índice formal de copa (FC), o qual descreve a forma da copa, pois resulta da relação entre DC com l .

A relação h/d tem grande importância na avaliação de povoamentos, podendo representar o status social de uma árvore dentro do povoamento, expresso pelo relacionamento da mesma com as árvores vizinhas (SCHNITZLER e CLOSSET, 2003), e ainda ser uma variável altamente significativa em modelos de crescimento, vindo a auxiliar na orientação do manejo florestal (VOSPERNIK et al., 2010; HEIN et al., 2007).

O índice $PC(\%)$, que define a proporção da copa em relação a dimensão da árvore, pode ser utilizado em modelos como preditor do incremento em diâmetro, incremento em altura e mortalidade (DURLO et al., 2001; HASENAUER, 1994; MONSERUD e STERBA, 1996; BROWN et al., 2004; VOSPERNIK et al., 2010).

Com significativa importância na avaliação de povoamentos florestais, o IS determinado a partir de árvores isoladas tem sido considerado na definição do espaço vital e do nível de aproveitamento individual, apresentando grande importância na orientação dos desbastes, determinação de espaçamentos iniciais e grau de estoqueamento para cada espécie (HEMERY et al., 2005).

O IS também tem grande aplicação na construção de modelos de crescimento, devido a forte correlação observada entre IS e as taxas de incremento do DAP (BROWN., 2004).

Na determinação da produtividade individual, o índice FC apresenta a profundidade da copa relacionada ao espaço ocupado pela mesma, tendo grande correlação com o crescimento periódico em área basal (DA CUNHA, 2009).

2.4 Caracterização de *Cedrela fissilis* Vell.

Encontrada do Rio Grande do Sul até Minas Gerais, sobretudo nas florestas semidecidual e pluvial atlântica, segundo descrição de Lorenzi (1998), a espécie *Cedrela fissilis* é considerada como de ampla adaptação em toda América Latina (MATTOS, 1980; PENNINGTON e STYLES, 1881) em altitudes variando de 5 a 1800 metros. A espécie comporta-se como secundária inicial ou secundária tardia e apresenta características de espécies localizadas em florestas semidecíduas, sendo classificada como heliófita ou esciófita e decídua (DURIGAN et al., 2002; LORENZI, 2002).

Desenvolve-se no interior das florestas primárias, porém, pode também ser encontrada como espécie pioneira na vegetação secundária (LORENZI, 1998). Apresenta variável tolerância ao frio, sendo classificada de mediantemente tolerante a tolerante, sendo que indivíduos adultos suportam temperaturas de até -10,4 °C (CARVALHO, 2003).

Apesar da sua grande área de abrangência, se apresenta como uma espécie uniformemente rara (BWA e ASHTON, 1991), ocorrendo tipicamente em baixa densidade nas populações florestais (menos de um indivíduo por hectare).

A espécie apresenta alta capacidade de adaptação a diferentes condições de luz, apresentado melhor desenvolvimento relacionado à maior luminosidade, e também, possuindo uma eficiente plasticidade fisiológica e morfológica da copa que garante sua permanência em áreas sob o dossel (DOS SANTOS et al., 2006)

Popularmente conhecida como cedro, apresenta como características morfológicas altura que pode alcançar 20-30m e diâmetro do tronco entre 60-150 cm. As folhas são compostas paripinadas de 25-65 cm de comprimento, apresentando numerosos folíolos lanceolados em pares opostos ou subpostos de 12-18 cm de comprimento (REITZ, 1984). Apresenta tronco cilíndrico, longo, reto ou um pouco tortuoso e fuste longo (REITZ et al., 1988; CARVALHO, 1994).. A copa é alta e em forma de corimbo, o que a torna muito típica.

O potencial dendrocronológico da espécie é comprovado pela presença de anéis de crescimento anuais apresentando sincronização em diferentes alturas, com significativa precisão que possibilita a obtenção de informações relacionadas ao crescimento da espécie em ambiente de floresta (IWASAKI-MAROCHI, 2007). Os anéis anuais verificados são semi-porosos e delimitados por faixas de parênquima axial do tipo marginal, contendo grandes vasos no lenho inicial (MARCATI et al., 2006)

A madeira do cedro possui massa específica aparente entre 0,47 e 0,61g/cm³, a 15% de umidade; a densidade básica é de 0,44 g/cm³, tratando-se, portanto, de uma madeira leve a moderadamente densa (JANKOWSKY et al, 1990). O alburno apresenta coloração branca a rosada e o cerne varia entre bege-rosado a castanho-avermelhado. A superfície da madeira é lustrosa e com reflexos dourados, a textura é grosseira e a grã é direita ou pouco ondulada.

Trata-se de uma madeira de secagem fácil, tanto em estufa, quanto ao ar livre, com baixa ocorrência de defeitos. A madeira é utilizada em compensados, esculturas, molduras, esquadrias, móveis em geral, marcenaria, na construção civil, na confecção de pequenas caixas, lápis e instrumentos musicais (LORENZI, 1998). Ocorre principalmente nas bordas da mata ou clareiras, porém nunca em formações puras, possivelmente pelos ataques da broca-

do-cedro (*Hypsipyla grandella*) e pela necessidade de luz para seu desenvolvimento. O cedro é empregado em reflorestamentos heterogêneos de áreas degradadas e paisagismo.

A espécie é considerada uma das principais árvores da flora brasileira, principalmente pela madeira de alta qualidade, já estando ameaçado de extinção devido à exploração excessiva (REITZ, 1984).

2.5 Manejo de floresta natural

As florestas naturais caracterizam-se por um alto nível de diversidade estrutural e espécies, as quais podem ser mantidas se adotadas técnicas apropriadas de manejo, orientadas pelos objetivos da produção. Considerando a manutenção da diversidade, a premissa do manejo florestal é transformar os povoamentos florestais em estruturas eficientes quanto à previsibilidade das atividades silviculturais e a obtenção dos resultados do manejo (O'HARA, 2001).

O manejo florestal é desenvolvido tecnicamente a partir de informações referentes ao crescimento, produção, densidade populacional, variações do meio ambiente e estruturação da produção, tendo como objetivo a extração contínua e eficiente de madeira, com maximização da produção por hectare. Em florestas naturais e inequiâneas, precedente as ações de manejo definidas pelo corte seletivo, faz-se necessário avaliar as condições reais da floresta em termos de regeneração e composição de espécies (SCHNEIDER et al., 2009).

De acordo com Schneider e Schneider (2009), o manejo florestal almeja a renovação da floresta com árvores adultas de espécies previamente definidas, por meio de cortes de liberação nas árvores de menor interesse, e também objetiva o enriquecimento do estrato inferior, com a condução da regeneração e plantio de mudas.

As intervenções silviculturais que buscam alterar as condições das florestas, com a manutenção da variabilidade, têm por consequência o desenvolvimento de diferentes classes de idades, porém, com a manutenção de uma distribuição diamétrica definida como exponencial negativa, na qual as menores classes apresentam maiores densidades, o que proporciona equilíbrio e sustentabilidade (O'HARA, 2001).

Em busca da sustentabilidade, o manejo florestal trabalha com o controle do estoqueamento, o qual consiste nas alterações do número e arranjo das árvores dentro de um povoamento. Dentro deste contexto, vários sistemas de manejo podem ser aplicados, sendo

que grande parte destes, como o método PLENTER e BD-q, consideram a distribuição diamétrica para representar a estrutura das florestas. Sistemas de manejo como o PLENTER, também podem utilizar o índice de área foliar (IAF) na representação da estrutura florestal, considerando que tais recursos estão diretamente relacionados com a produtividade e o espaço necessário ao crescimento (O'HARA e GERSONDE, 2004).

Enquanto o método BD-q de seção orienta-se pela área basal remanescente (B), diâmetro máximo (d) e constante de De Liocourt (q) (SOUZA e SOUZA, 2005), o método PLENTER baseia-se na seleção individual das árvores, como controle de estoque, acima de um limite mínimo de diâmetro, sendo que abaixo desta a regeneração avançada garante a próxima colheita (THANG, 1987).

O manejo de florestas naturais busca alterar as condições de luz disponíveis, sendo que em ambientes com alta disponibilidade de luz as árvores crescem mais rapidamente, principalmente em altura, enquanto a baixa disponibilidade de luz estimula o crescimento em diâmetro da copa, que proporciona maior área para absorção da luz, e do fuste (KOHYAMA 1991; CLAVEAU et al. 2002; CIANCIO et al., 2006).

A biomassa da copa (galhos e folhas), área foliar total e seu padrão de distribuição vertical tem grande efeito sobre a taxa de luz interceptada pelo dossel florestal, e em consequência, forte relação com a estrutura do povoamento, produtividade da floresta e características do microclima e habitat (MAGUIRE e BENNETT, 1996; WANG e JARVIS 1990). O tamanho da copa é uma importante variável na determinação do vigor das árvores (ASSMAN, 1970).

Baseado na afirmativa que a luz (radiação fotossinteticamente ativa) é um dos recursos que mais influenciam a evolução do crescimento (CANNELL e GRACE, 1993; BRIENEN et al., 2010), as dimensões da copa e galhos, assim como o desenvolvimento de folhas e raízes, são utilizadas como variáveis preditoras do crescimento, devido a sua relação com os processos de absorção de luz, evapotranspiração, fotossíntese e respiração (PRETZSCH, 2009). Em árvores de *Pinus taeda* e *P. elliottii*, Chmura e Tjoelker (2008) encontraram forte relação entre o crescimento das árvores e a superfície irradiada.

Na execução do manejo florestal, a relação existente entre copa e diâmetro é uma das que apresenta maior significância e aplicabilidade, considerando que tal relação pode ser utilizada para estimar o espaço vital de uma árvore (NUTTO, 2001). Em avaliações de povoamentos florestais, as considerações referentes às variáveis tamanho da copa, DAP, altura total e distância entre as árvores, observadas a partir de árvores individuais, resultam

em um banco de dados extremamente importante, na análise e mensuração do crescimento de povoamentos mistos (PRETZSCH, 2009).

Hasenauer (1997), avaliando as dimensões de árvores isoladas em florestas austríacas, verificou forte correlação entre as variáveis de copa e fuste, principalmente quando relacionou o diâmetro da copa e o DAP.

A obtenção das relações entre copa e fuste pode ser realizada em árvores isoladas, ou seja, de crescimento livre de competição, as quais representam uma dimensão máxima empírica, e têm sido utilizadas na orientação de intervenções silviculturais, desenvolvimento de guias de manejo e na modelagem da competição do dossel (DURLO et al., 2004; HASENAUER, 1997).

O manejo de florestas naturais deve ser realizado considerando as variáveis de copa e morfometria, as quais têm relação direta com o incremento em diâmetro (DURLO, 2001). Em experimento de desbaste, Ciancio et al. (2006) verificaram maiores taxas de incremento do fuste associadas ao crescimento em diâmetro das copas das árvores do povoamento remanescente. Relacionado ao comportamento da copa, a dinâmica e padrão do ângulo dos galhos influencia diretamente o espaço existente entre as folhas, que juntamente com o padrão de bifurcação e o número de ramos curtos, determinam a capacidade de absorção de luz das plantas (DAY, 1998).

Desta forma, o conhecimento das relações entre a copa e o diâmetro do tronco pode ser utilizado na definição de regimes de desbastes, determinação de espaçamentos em plantios mistos ou sistemas agroflorestais, definição de tratamentos silviculturais como a liberação em florestas naturais, seleção genética e na modelagem do crescimento das árvores (HEMERY et al., 2005).

2.6 Modelagem do crescimento

Modelos de crescimento e produção são ferramentas indispensáveis para a condução e manejo de povoamentos florestais, podendo ser utilizados para demonstrar as consequências, a longo prazo, das diferentes opções de uma realidade virtual, e para comparar o efeito de diferentes tratamentos sobre variáveis-alvo florestais (PRETZSCH et al., 2008). São construídos, para distintas espécies ou povoamentos, objetivando descrever a evolução das

variáveis de uma floresta em relação ao tempo, por meio de diferentes equações, gráficos e tabelas. (SCOLFORO, 1998)

De acordo com Zeide (1991), um modelo é suposto para explicar um processo e expor suas características essenciais, por meio da determinação da mudança da variável dependente em relação a variáveis independentes, sendo avaliado conforme sua coerência, razoabilidade e correspondência com a realidade. Os modelos de crescimento podem ser utilizados para previsões de 5, 10, 20 ou mais anos futuros, porém, seus resultados são uma abstrata simplificação de um complexo processo real, e conseqüentemente, com limitados níveis de precisão (ZEIDE, 1991; MONTERO et al., 2001).

A modelagem do crescimento das florestas pode ser direcionada às unidades individuais do povoamento, assim como a árvores isoladas, sendo que os referidos modelos constituem-se em funções propostas para descrever variáveis como o incremento diamétrico, incremento em altura, tamanho da copa e mortalidade, em determinado período de tempo (VOSPERNIK et al., 2010).

Equações de crescimento somente podem ser utilizadas se comprovada a sua qualidade. Tal procedimento pode ser realizado pela definição da constância dos parâmetros e a ausência de padrões dos resíduos dos modelos. Considera-se também que bons modelos caracterizam-se como àqueles que descrevem e predizem melhor a realidade, contribuindo para o entendimento dos processos naturais (ZEIDE, 1991).

Os modelos de maior aplicabilidade são definidos como empíricos, os quais têm sua base em princípios teóricos e equações biométricas, com dados originados de mensurações realizadas nos povoamentos durante longos períodos. Porém, alguns modelos como os mecanísticos e híbridos, têm surgido com a proposta de aumentar a amplitude de aplicação das equações de crescimento, levando em consideração as variáveis relacionadas aos processos fisiológicos (MAGUIRE et al., 1994; PRETZSCH et al., 2008).

2.7 Dendrocronologia

A dendrocronologia tem sido caracterizada como a sistemática utilização do método de datação e análise de anéis de crescimento, os quais têm suas características estabelecidas e referidas ao ano de formação (FRITTS e SWETNAM, 1989). É uma disciplina de larga

aplicação, sendo amplamente utilizada em diferentes áreas como florestal, botânica, climatológica e das ciências naturais (WORBES, 1995).

Em florestas, o comportamento e as variações observadas nos anéis de crescimento estão diretamente relacionados ao crescimento da floresta, idade do povoamento, oscilações climáticas e à dinâmica sucessional dos maciços florestais (WORBES et al., 2003; BRIENEN et al., 2009).

Diferenças nos padrões dendrocronológicos podem ser observadas em espécies distintas, principalmente devido às características relacionadas à fisiologia e anatomia da madeira das espécies (BRIENEN e ZUIDEMA, 2005). Em pesquisas realizadas com *Araucaria angustifolia*, Santarosa et al. (2007) verificaram a anuidade dos anéis de crescimento e a relação das variáveis de clima com os padrões de crescimento dos mesmos.

A formação dos anéis de crescimento é resultado da atividade cambial, a qual determina a magnitude e padrão dos anéis, sendo que sua descontinuidade tende a resultar em crescimento anormal dos mesmos (KOZLOWSKI, 1971). Em florestas temperadas ou em regiões de clima subtropical, os anéis são formados a partir das células de xilema produzidas em diferentes épocas do ano. Nestas situações, muitas espécies produzem primeiramente células de xilema maiores com finas paredes celulares, chamadas de crescimento inicial ou primaveril, e então, posteriormente, são formadas células menores com parede celular mais espessa, referindo-se ao crescimento tardio ou crescimento outonal (OLIVER e LARSON, 1996).

Em outras condições de clima, como as florestas tropicais úmidas, os anéis de crescimento têm sua formação induzida por variações no clima, como a ocorrência anual do período chuvoso, 3-6 meses, no qual as plantas perdem as folhas e entram em uma fase de dormência cambial, formando assim a banda de parênquima terminal dos anéis (WORBES, 1995; BRIENEN e ZUIDEMA, 2005).

As condições ambientais exercem influência direta sobre a atividade cambial e a dinâmica de crescimento das árvores, sendo que períodos de longas ou curtas flutuações climáticas podem afetar os incrementos e alterar o padrão dos anéis de crescimento (O'HARA et al., 2007; BRIENEN e ZUIDEMA, 2005).

Nas avaliações dendrocronológicas a presença de falsos anéis se apresenta como um fator determinante na qualidade e precisão dos resultados, devendo os mesmos serem determinados com precisão. Kozlowski (1971) relata que a presença de falsos anéis é consequência da ação dos fatores ambientais, os quais resultam em alterações na forma e tamanho das células de xilema, ocasionando o aparecimento de estruturas semelhantes aos

anéis anuais. A exclusão destas estruturas pode ser feita quando avaliada a continuidade da camada anual de crescimento, sendo então, considerada como falso anel a camada que se mostra descontínua (FINGER, 1992).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

Buscando produzir resultados mais representativos em relação ao comportamento da espécie *Cedrela fissilis*, a pesquisa foi desenvolvida em duas regiões distintas do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), contemplando assim maior variabilidade de solo, relevo e clima.

As áreas onde foram selecionadas as amostras pertencem à região central e noroeste do estado, tendo as mesmas coordenadas centrais 29° 41'01 77" de latitude Sul, 53° 38'54 11" de longitude Oeste e 28° 43'31 46" de latitude Sul, 52° 50'45 31" de longitude Oeste, respectivamente.

As áreas de amostragem encontravam-se em parques municipais, vias públicas, estradas vicinais, encostas, bordas de florestas e áreas agrícolas, constituindo uma grande variabilidade de sítio e relevo.



Figura 1 – Localização dos municípios de Santa Maria (A) e Espumoso (B), descritos como áreas de identificação e coleta de dados.

3.1.1 Caracterização climática

Nas duas regiões onde foram definidas a amostragem, o clima predominante difere. Na região central predomina o clima mesotérmico brando Cfa (classificação de Köppen), com temperaturas médias anuais apresentando máxima entre 28° e 32° e mínima entre 8° e 10°C, com precipitações regulares ao longo do ano e índices pluviométricos de 1500 a 1600 mm (FACCO et al., 2012).

Na região noroeste, no Planalto Riograndense, o clima predominante é do tipo Cfb (Köppen), temperado úmido com verão temperado (KUINCHTNER e BURIOL, 2001), temperatura média anual de 20°, com máxima de 35° e mínima de -1°, com chuvas anuais entre 1600 a 1800 mm.

3.2 Levantamento de dados

Para a obtenção dos dados referentes ao crescimento das árvores foram selecionados 57 indivíduos, devidamente identificados, fotografados e georeferenciados, os quais foram classificados segundo suas características morfométricas e de sanidade, sendo que apenas árvores aparentemente com boas condições fitossanitárias e de crescimento livre compunham o grupo amostrado.

A condição de crescimento livre levou em consideração os últimos 20 anos, tendo sido coletados dados de 22 árvores liberadas e de 35 árvores isoladas desde o início do crescimento. A confirmação do período no qual as amostras cresceram sem concorrência foi possível perante a obtenção de informações advindas dos proprietários das áreas onde foram localizadas as árvores.

3.2.1 Variáveis dendrométricas mensuradas

Para expressar a dinâmica do crescimento em diâmetro, altura, volume, e quantificar a magnitude dos mesmos foram coletados dados como o diâmetro à altura do peito (DAP), e altura total, os quais foram respectivamente mensurados com a utilização de uma fita métrica e um hipsômetro VERTEX III.

3.2.2 Índices morfométricos e variáveis de copa

Na caracterização das árvores isoladas de *Cedrela fissilis* realizou-se a avaliação das dimensões das mesmas, e de suas relações interdimensionais, definidos como relação h/d, porcentagem de copa (PC%), índice de saliência (IS) e formal de copa (FC).

A descrição dos índices morfométricos com suas respectivas fórmulas de obtenção estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações e descrição dos índices morfométricos avaliados.

Índice	Descrição	Equação
h/d	Relação entre h e DAP	$h/d = h/DAP$
PC (%)	Relação entre h e l	$PC (\%) = h/l$
IS	Relação entre DAP e DC	$IS = DAP/DC$
FC	Relação entre DC e l	$FC = DC/l$

Sendo: h/d = relação hipsométrica; PC (%) = porcentagem de copa; IS = índice de saliência; FC = formal de copa; h = altura total; DAP = diâmetro à altura do peito; l = comprimento de copa; DC = diâmetro de copa.

Na determinação do comportamento e evolução do tamanho da copa das árvores amostradas foram obtidos dados referentes às dimensões do diâmetro da copa (DC), comprimento da copa (l) e diâmetro da copa avaliados em 10 raios em posições relativas à suas respectivas alturas (DChi), conforme metodologia proposta por DURLO et al, (2004). A

realização da coleta de todas as variáveis citadas foi desenvolvida em duas etapas, sendo que a primeira referiu-se à obtenção de fotografias, e a segunda foi constituída pela a avaliação e mensuração das imagens.

As variações das distâncias e das inclinações da objetiva resultaram em fotos de diferentes escalas, o que acarretou a necessidade de correção, empregando-se para tal uma escala padrão, constituída por uma régua com dimensões de 0,15 x 1,5 m (Figura 2). A definição da escala baseou-se no princípio utilizado no Tele Relascópio de Bitterlich (BITTERLICH, 1984), tendo sido a régua fixada na altura do DAP, em posição horizontal.

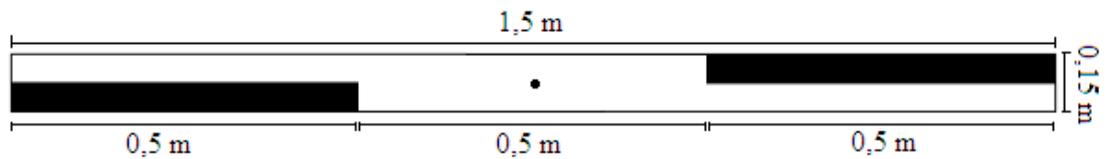


Figura 2 – Régua com dimensões de 0,15 x 1,5 m, utilizada como escala das imagens digitalizadas.

O primeiro procedimento foi realizado durante a estação de inverno, período em que as árvores de cedro encontram-se sem folhagem, quando as árvores amostradas foram então fotografadas em duas perspectivas distintas, a primeira de orientação leste e oeste (LO) e em seguida, com orientação norte e sul (NS) (Figura 3).



Figura 3 – Árvore isolada de *Cedrela fissilis* fotografada em duas perspectivas distintas (LO, NS), com escala fixa a 1,3 m do solo (DAP).

Para tal, foi utilizada uma máquina fotográfica acoplada em um tripé, a distâncias variáveis entre objetiva e objeto. A inclinação da objetiva verificada em cada fotografia foi determinada com a utilização de um hipsometro Suntto PM - 5.

As fotos foram realizadas com distâncias distintas, devido principalmente às dificuldades estabelecidas por barreiras ou obstáculos entre objetiva e objeto, e também, sendo variável de acordo com as dimensões da árvore amostrada.

As correções das distorções ocasionadas pela inclinação da objetiva foram feitas a partir de dois modelos matemáticos de correção desenvolvidos em laboratório, conforme metodologia proposta por Durlo et al. (2004).

Após a obtenção das fotos, as mesmas foram avaliadas tendo sido mensuradas todas as variáveis morfométricas de interesse, com a utilização do software AutoCAD. Os dados obtidos referiram-se aos diâmetros da copa na base e em 10 alturas relativas (Figura 4a), e a superfície do manto da copa, (Figura 4b).



Figura 4 – Fotografia digitalizada, com suas variáveis morfométricas diâmetros de copa (a) e manto de copa (b), mensuradas no software AutoCAD.

O manto de copa caracterizou-se como a área superior da copa a partir do seu maior diâmetro, também definido por Burger (1939) como copa de luz. Para a definição desta área foi obtida a medida linear da superfície do manto em duas posições, distintas 90° uma da outra, das quais resultou uma linha média correspondente a duas vezes a geratriz (g) de um cone de base circular (Figura 5a).

A área do manto da copa foi então definida como à área lateral plana do cone, determinada pela equação apresentada na Figura 5b (ANTON, 2000).

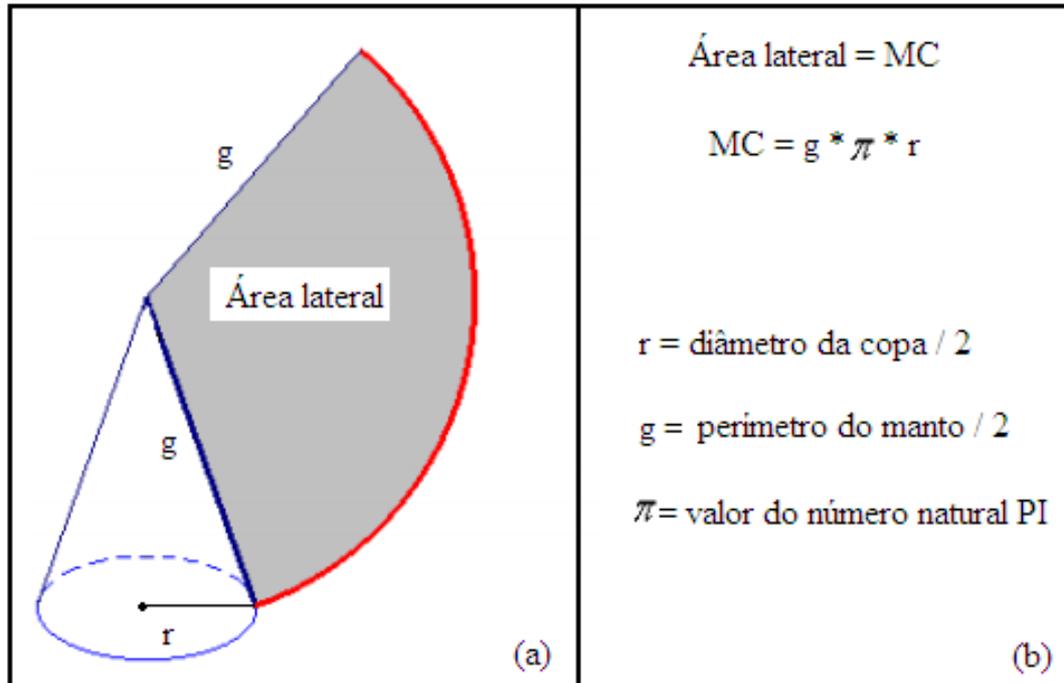


Figura 5 – (a) Cone de base circular com geratriz (g) definida a partir do perímetro da copa e do raio de copa (r); (b) Equação utilizada na obtenção da área lateral do cone ou área do manto da copa.

3.2.3 Correção das distorções fotográficas

Para solucionar os problemas decorrentes da inclinação da objetiva, considerando que fotos com ângulo de visada inclinado apresentam deformações, foi elaborada uma equação a partir de um experimento realizado em laboratório conforme apresentado por Durlo et al., (2004).

Com a mesma máquina e tripé utilizados na coleta de dados foram obtidas fotos da escala de 1,5m, a uma distância fixa e em diferentes situações de inclinação da objetiva. As imagens foram então mensuradas no software AutoCAD, de forma que as diferenças observadas nas dimensões da escala, sob diferentes situações de inclinações da objetiva, foram utilizadas na elaboração de duas funções de correção, sentido longitudinal e transversal. As equações de correção foram desenvolvidas exclusivamente para trabalhos com a máquina utilizada durante a coleta de dados, tendo sua aplicação restrita a mesma.

3.2.4 Alongamento dos ramos e o diâmetro anual da copa

Nas árvores amostradas os alongamentos anuais foram mensurados em dois galhos da copa, retirados nas mesmas posições referentes às fotografias. Os galhos foram amostrados nas posições laterais superiores das copas, evitando-se a coleta de galhos das porções inferiores, pois estes se desenvolvem em piores condições de luz e tendem a sofrer restrições no crescimento e vigor (SUZUKI, 2002). Para a coleta dos galhos foi utilizada uma cerra de desrama, cabo extensor, esporões de escalada, corda, cinto de segurança e talabarte.

Os galhos foram encaminhados para o Laboratório de Manejo Florestal onde seus alongamentos anuais foram devidamente identificados e mensurados com a utilização de uma fita métrica. Os crescimentos anuais ou nódulos de crescimento, identificados pela ordem de ramificação e definidos como seções ritmadas do crescimento (HALLÉ et al., 1978; OLIVER e LARSON, 1996), foram localizadas nos galhos e delimitadas segundo suas cicatrizes iniciais/terminais de crescimento, correspondentes ao início e final do crescimento anual (Figura 6a), características da espécie *Cedrela fissilis*, também observadas em espécies como *Abies mariesii* (TAKASHI, 1980), *Macaranga aleuritoides* e *Oleandra pistillaris* (HALLÉ et al., 1978).

A confirmação da idade de cada segmento avaliado foi realizada mediante a contagem dos anéis de crescimento da base do galho (Figura 6b), considerando que cada anel devesse representar uma ordem de crescimento anual. O crescimento em cada ano foi definido como a média aritmética das mensurações realizadas nos alongamentos ou nódulos de uma mesma posição em cada ramificação. A localização no galho definiu o período de crescimento, tendo sido considerado como o crescimento de 2010-2011 aqueles localizados nas extremidades dos galhos, em seguida, o crescimento do ano de 2009-2010 foi determinado pela medida do nódulo que antecede o último, e assim, sucessivamente.

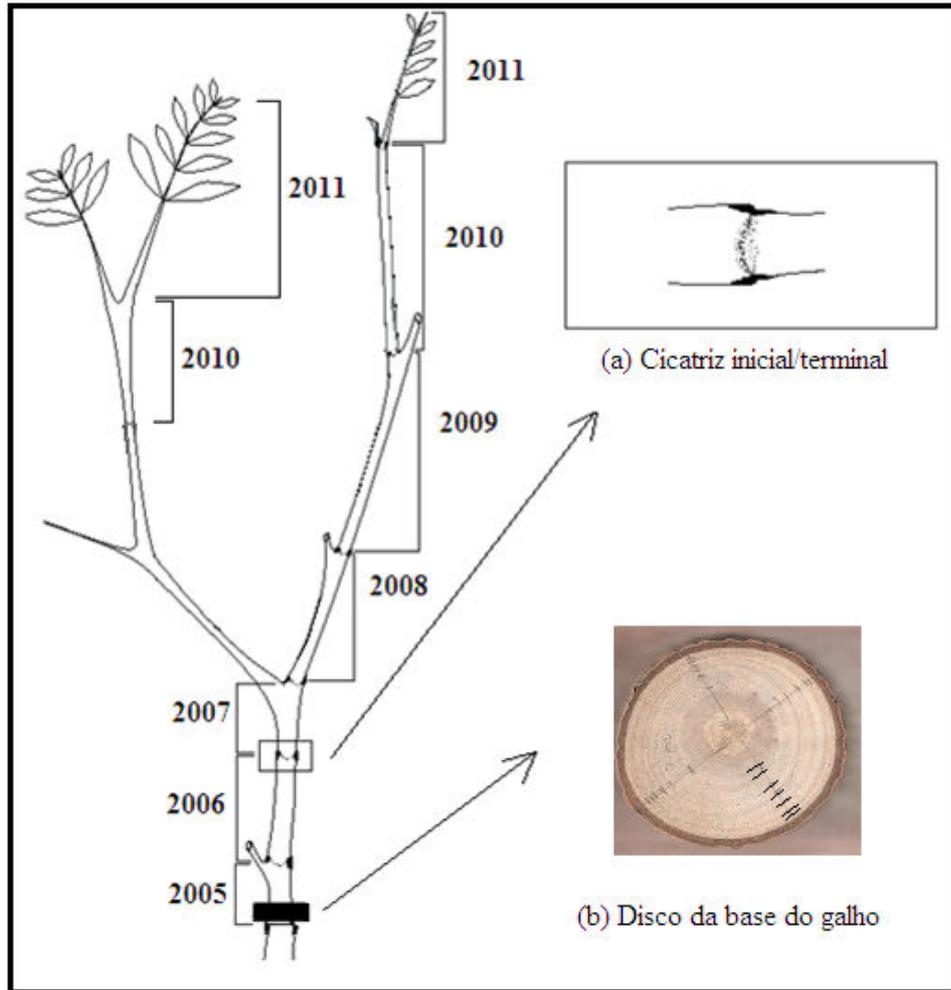


Figura 6 – (a) Cicatrizes de crescimento anuais observadas na delimitação dos nódulos de crescimento; (b) amostra da base do galho, sincronizados com os nódulos pela avaliação dendrocronológica.

Os alongamentos anuais determinados foram utilizados para definir o crescimento em diâmetro anual da copa, sendo que, para a obtenção dos diâmetros foram considerados também os ângulos de inclinação dos galhos, mensurados com imagens digitalizadas no software AutoCAD (Figura 7a). O crescimento em diâmetro foi então determinado como o cateto oposto do triângulo retângulo formado pelo ângulo de inclinação do galho (α), alongamento anual do galho (hipotenusa) e eixo vertical central da copa (cateto adjacente), conforme apresentado na Figura 7b.

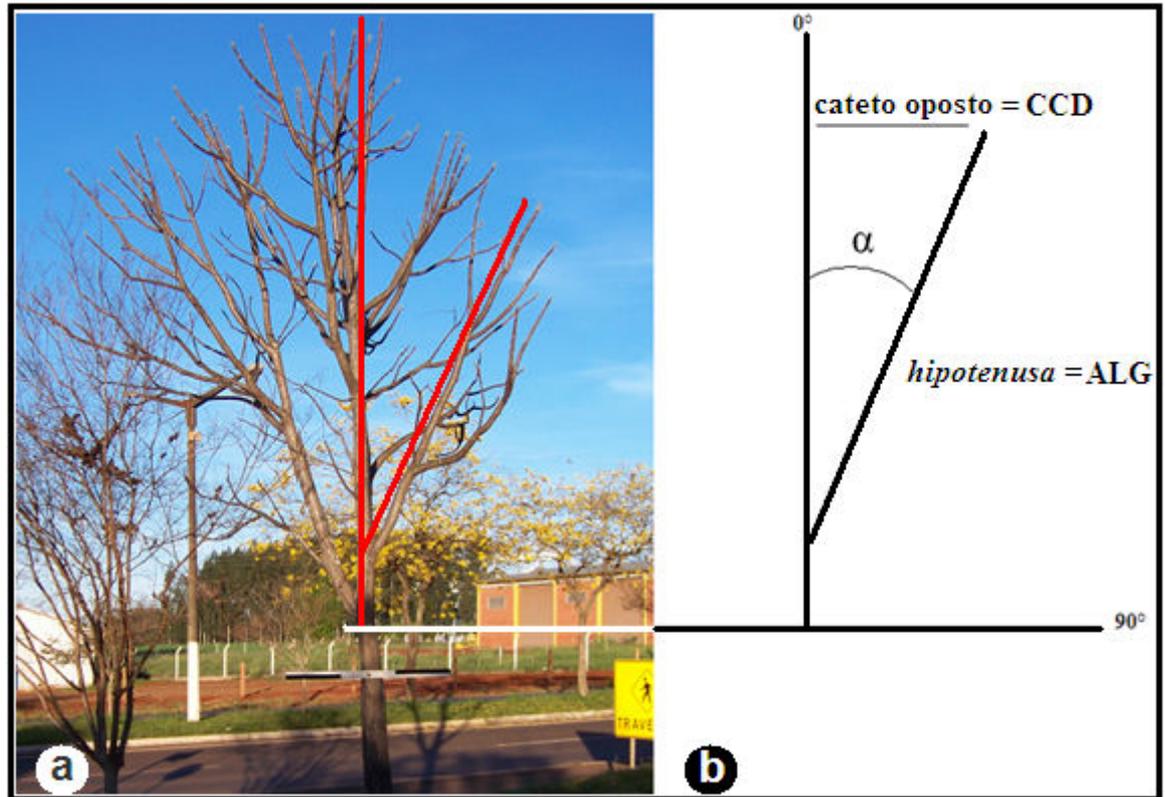


Figura 7 – (a) Amostra digitalizada para definição do ângulo de inclinação dos crescimentos anuais; (b) determinação do crescimento em diâmetro (DC) a partir do ângulo (α) e do alongamento anual.

O crescimento em diâmetro anual foi calculado considerando as relações trigonométricas dos triângulos retângulos, sendo utilizada a seguinte equação.

$$CCD = ALG * \text{sen } \alpha \quad (1)$$

Sendo: CCD = crescimento anual da copa em diâmetro, ALG = alongamento anual do galho; $\text{sen } \alpha$ = seno do ângulo de inclinação.

O diâmetro da copa das árvores, referente ao ano de 2011 foi definido pela mensuração da dimensão da copa em fotos avaliadas com o software AutoCAD, as quais foram corrigidas e comparadas aos dados coletados a campo. Os diâmetros nos anos anteriores foram obtidos pela relação trigonométrica, de forma que para cada ano manteve-se o mesmo ângulo de inclinação, sendo então definida a taxa de crescimento pela variação do comprimento da hipotenusa, representado pelo alongamento do galho.

3.2.5 Crescimento periódico em área basal

A determinação do incremento anual em diâmetro foi realizada para o período 2007-2011 pela análise de rolos de incremento ou baguetas retiradas do fuste, os quais foram mensurados em unidade 1/100mm.

Os rolos de incremento foram extraídos com a utilização de um Trado de Pressler, na circunferência do fuste a altura referente ao DAP, e em duas posições distintas 90° uma da outra.

Um total de 114 rolos de incremento foram amostrados, fixados em suportes de madeira, com cola branca e posteriormente preparados com lixas de granulometria 120, 360 e 600 grãos/mm², respectivamente. O preparo do material com a utilização de lixa teve por objetivo desbastar, nivelar e polir as baguetas para que as mesmas pudessem então ser devidamente avaliadas em mesa micrométrica com deslocamento horizontal acoplada a um microscópio estereoscópico, tendo sido os resultados registrados no software TSAP (*Time Series Analysis Program*, 1996).

Após a definição das taxas de incremento anuais, as mesmas foram devidamente sincronizadas, sendo que o primeiro processo referiu-se à sincronização das duas baguetas de incrementos coletadas em cada árvore, e na sequência, foi então realizada a sincronização entre os indivíduos pertencentes à mesma região amostral.

A correlação simples entre as baguetas foi realizada de forma gráfica, para cada árvore, procedimento que permitiu a visualização de padrões anormais ou discrepâncias nas taxas de crescimento. Quando verificadas, tais observações estimularam a reavaliação das amostras, com possibilidade de se pontuarem falsos anéis e anéis de crescimento ocultos por estarem muito próximos devido à excentricidade do crescimento.

3.2.6 Modelagem da copa e do incremento das árvores

Os modelos de crescimento das árvores isoladas de *Cedrela fissilis* foram construídos com o objetivo de descrever o padrão de crescimento máximo da espécie, considerando as condições de crescimento. Para garantir a avaliação de indivíduos com ótimas condições de

crescimento, subjetivamente foi realizada uma subamostragem no grupo de 57 árvores selecionadas, considerando suas condições de copa, estrutura e localização (sítio).

O resultado da subamostragem foi à seleção de 35 árvores com excelentes características relacionadas à estrutura individual e da copa, que avaliadas de forma empírica, apresentavam perfeitas condições de sanidade, vitalidade e crescimento. Na construção dos modelos de crescimento foram avaliadas somente árvores com até 60 cm de DAP.

O crescimento da copa dos cedros foi modelado para duas situações distintas, sendo que primeiramente criaram-se equações matemáticas baseadas nas variáveis morfométricas observadas no ano de 2011, ocasião em que foram ajustadas equações para a variável dependente manto de copa e diâmetro da copa em 10 alturas relativas às mesmas.

Na sequência, o crescimento da copa das árvores isoladas foi matematicamente explicado considerando o crescimento no período 2007 e 2011, para o qual se ajustaram equações para o incremento anual das copas em diâmetro e alongamento anual das copas, assim como, para o incremento periódico anual em área basal (IPAg).

3.3 Processamento estatístico dos dados

O ajuste das equações de regressão foi realizado pelos procedimentos de correlação (PROC CORR), procedimento de seleção das variáveis (PROC STEPWISE), procedimento de regressão (PROC REG) e procedimento de análise gráfica (PROC GPLOT), com a utilização do software “Statistical Analysis System 9.2” (SAS Institute Inc., 2009).

3.3.1 Modelagem e condicionantes da equação de regressão

Os modelos de crescimento foram ajustados pelo método de regressão com mínimos quadrados ordinários, pelo procedimento PROC REG realizado no pacote estatístico SAS 9.2.

Anterior à elaboração dos modelos, o procedimento PROC CORR foi desenvolvido para cada variável dependente, objetivando selecionar variáveis independentes que fossem

relevantes e correlacionadas ao evento explicado. O grau de correlação entre as variáveis foi determinado pelo coeficiente de correlação de Pearson.

A modelagem teve sequência com a programação PROC REG, no software SAS 9.2, associada à seleção da opção SELECTION=STEPWISE, a qual proporcionou a classificação das variáveis independentes segundo o grau de correlação das mesmas com a variável resposta.

A seleção das variáveis foi realizada pelo teste de hipótese para os parâmetros estimados, utilizando a distribuição t de Student, e teve por objetivo evitar a inclusão de erro aleatório nas análises, observado quando o poder de explicação do modelo é aumentado com a inclusão de variáveis não significativas. Desta forma, somente foram incluídas no modelo definitivo, variáveis com poder explanatório significativo ($Pr < 0,05$).

Para obter a homogeneidade da variância dos dados, quando necessário, o procedimento Box-Cox foi utilizado para estabilizar a variância com a utilização de uma potência lambda, para que fossem assim cumpridos os critérios estatísticos.

Muitos autores citam que o critério para a seleção de modelos de regressão normalmente norteia-se na avaliação conjunta do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e o erro padrão da estimativa (S_{yx}) (FINGER, 1992), com posterior avaliação da distribuição do erro. Para a determinação da precisão estatística dos modelos foram considerados o $R^2_{aj.}$, o coeficiente de variação (CV%) e o valor F de significância dos modelos.

A definição do modelo final, com variáveis independentes selecionadas, somente foi realizada após a avaliação da colinearidade entre as variáveis preditoras, o que foi apontado com base no Fator de Inflação da Variância (FIV), considerado como valor de exclusão $FIV > 10$ (NETER et al., 1996).

A avaliação do modelo foi concluída com a análise objetiva dos erros, na qual os resíduos foram avaliados quanto a sua normalidade, homogeneidade de distribuição e independência, tendo sido realizados os testes de Shapiro-Wilk, Whait e Durbin-Watson, respectivamente. A avaliação gráfica complementou a análise residual, tendo a mesma sido realizada para a detecção de valores influentes, denominados de *outliers*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Morfometria de árvores isoladas

A caracterização morfométrica das árvores isoladas de *Cedrela fissilis* foi definida considerando as variáveis altura (h), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l), e os índices de morfometria, tendo sido observado nos resultados significativa correlação entre as diferentes expressões do crescimento, característico de árvores que se desenvolveram isoladamente.

4.1.1 Dimensões individuais

Na avaliação da dispersão realizada entre as variáveis altura total (h), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l), verificou-se uma dinâmica de crescimento diretamente relacionada à evolução da variável diâmetro à altura do peito (DAP), conforme pode ser observado nas Figuras 8a, 8b e 8c, respectivamente.

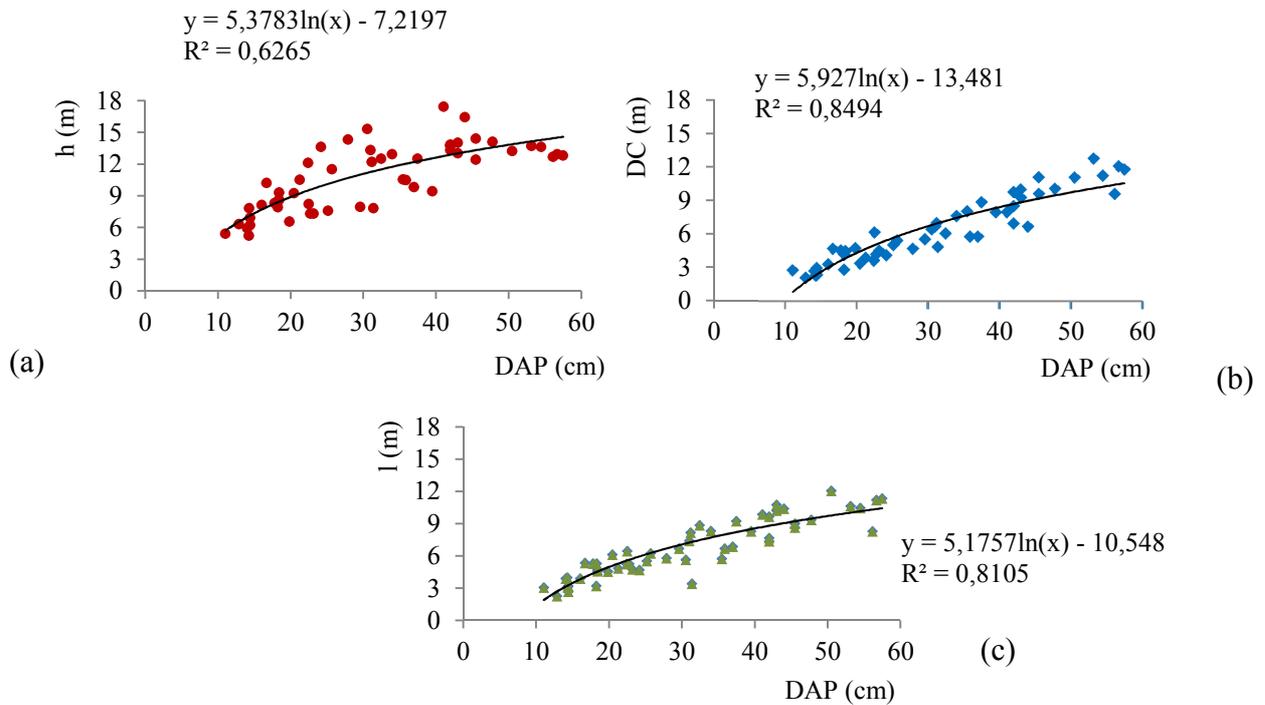


Figura 8 – Tendência de distribuição da variável altura total (h) em função da variável DAP (a); distribuição da variável diâmetro de copa (DC) em função do DAP (b); distribuição da variável comprimento de copa (l) em função do DAP (c), com respectivos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj}).

Os resultados da dispersão da altura (h), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l) pelo DAP indicam que as árvores com desenvolvimento livre, ou seja, sem competição, tendem a apresentar um sincronismo no desenvolvimento de copa, tronco, conforme também observado por Hallé et al. (1978).

O maior coeficiente de determinação (R^2_{aj}) demonstrou que a variável DAP conseguiu explicar 63%, 85% e 81% da variância das respectivas variáveis h, DC e l, o que comprovou a significativa relação entre o desenvolvimento da copa e fuste, principalmente entre as variáveis DAP e DC. A relação entre as variáveis de copa e fuste normalmente é observada em espécies florestais, independente dos sítios e/ou diferenças genéticas (HASENAUER, 1997; HEMERY et al., 2005; LEITES et al., 2012).

Nos dados apresentados verificou-se também que a maior variação na distribuição dos dados é representada pela variável h, devendo este comportamento estar relacionado às diferentes condições de sítio. Esta variável (h) tem relação direta com as condições locais, sendo considerada como variável indicadora da qualidade e capacidade produtiva dos sítios (ASSMANN 1970; PRODAN et al., 1997).

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise objetiva da correlação, realizada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), entre a variável DAP e as variáveis individuais altura (h), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l).

Tabela 2 – Correlação de Pearson (r) observada entre a variável diâmetro à altura do peito (DAP) e as variáveis altura (h), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l).

Correlação/Variáveis	h	DC	l
Pearson (r)	0,76	0,94	0,88
Pr>[r]	<.0001	<.0001	<.0001

Sendo: h = altura dominante; DC = diâmetro de copa; l = comprimento de copa.

Os resultados da correlação de Pearson concordam com o observado na avaliação gráfica, sendo que os valores de correlação da variável DAP com as demais variáveis foram altamente significativos, com destaque para a variável DC, na qual $r = 0,94$.

4.1.2 Índices morfométricos

4.1.2.1 Relação altura e diâmetro ou relação hipsométrica (h/d)

Na Figura 9 observa-se que a variável h/d apresentou valores abaixo de 1, concordando com o verificado por Weber (2007) em árvores isoladas de *Mimosa scabrella* Benth, o que pode ser interpretado como um indicativo da maior estabilidade destes indivíduos.

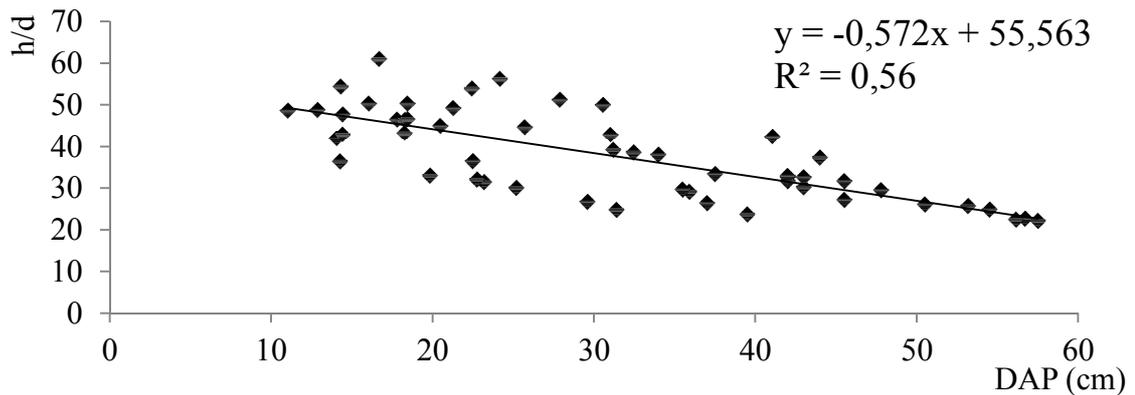


Figura 9 – Dinâmica da relação (h/d) em função da variável DAP das árvores amostradas.

Na avaliação da dinâmica da variável h/d em relação ao DAP, evidencia que nos maiores diâmetros, as árvores são significativamente mais estáveis, com menores valores de h/d , corroborando com resultados observados em árvores isoladas de *Pinus silvestris* e *Picea abies* por Vospernik et al., (2010).

A tendência da relação h/d explica-se pelo fato de que as árvores apresentam rápido crescimento inicial em altura, com taxas significativamente superiores ao crescimento em diâmetro, resultando em maiores valores de h/d nas árvores mais jovens.

A função decrescente observada na avaliação gráfica demonstrou que, com o crescimento da árvore, as maiores taxas de incremento, adimensionais, verificadas na variável DAP fazem com que individualmente as árvores se tornem gradativamente mais robustas e estáveis, resultado também encontrado por Durlo (2001) para outras espécies.

4.1.2.2 Porcentagem de copa

Na Figura 10 observa-se a tendência crescente do índice de porcentagem de copa (PC %) nas árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, resultado que também foi observado em árvores isoladas e em florestas da Áustria (HASENAUER, 1994; HASENAUER e MONSERUD, 1996).

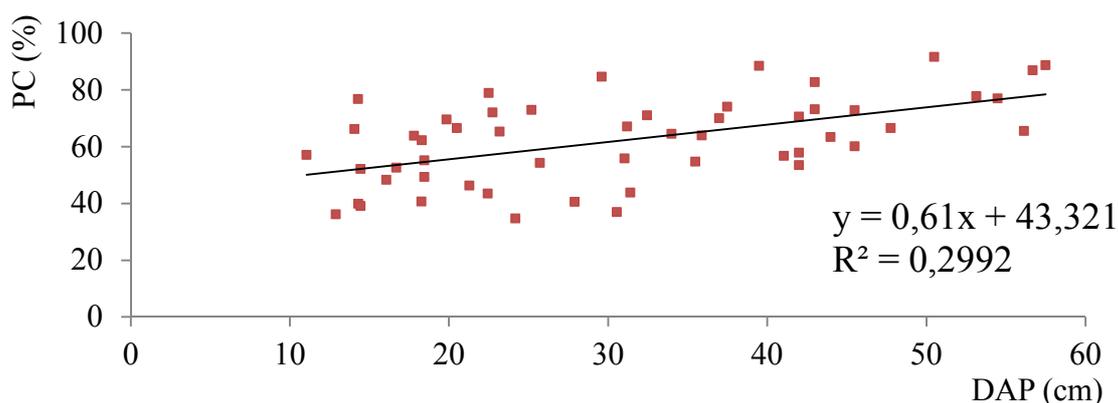


Figura 10 – Tendência observada no índice porcentagem de copa (PC%) em função do DAP.

Os resultados de dispersão da porcentagem da copa (PC%) pelo DAP apontam um significativo número de árvores apresentando PC abaixo de 50, ou seja, nestes indivíduos a copa teve um comprimento que representou até 50% da altura total. Em árvores de *Cedrela fissilis* avaliadas em ambiente de floresta na região central do Rio Grande do Sul, De Mattos (2007) encontrou valor médio para PC(%) de 49,47.

Os valores observados podem ser explicados se consideradas as diferentes condições em que se desenvolveram as amostras, sendo que aproximadamente 35% dos indivíduos sofreram competição nas primeiras fases de crescimento, o que retardou a expansão das copas e favoreceu o desenvolvimento do fuste.

Em árvores isoladas espera-se maiores valores para PC(%), tendo sido encontrado valores em torno 0,84 – 0,91, em árvore de crescimento livre na Áustria (STAMPFER, 1995). Em árvores dominantes de *Ocotea odorífera* (Vell.) Rohwer, foram encontrados valores máximo de 69,23% médio de 58,00% e mínimo de 38,46% (ORELLANA e KOEHLER, 2008)

Graficamente também se verificou uma grande variação de PC (%) para indivíduos de mesma classe diamétrica, fato que pode ser explicado pela grande variabilidade dos fatores topográficos e de sítio, que segundo Hasenauer e Monserud, (1996), influenciam diretamente o desenvolvimento, e conseqüentemente, a estrutura das árvores.

4.1.2.3 Índice de saliência

O padrão descrito graficamente na Figura 11, apresenta o comportamento do índice de saliência (IS) em função do DAP, caracterizado por pouca variação com o aumento das árvores.

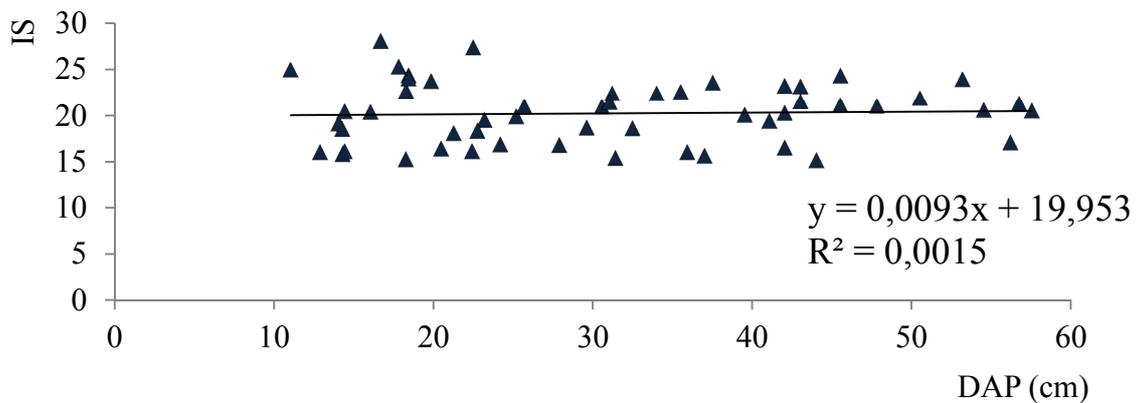


Figura 11 – Comportamento do índice de saliência (IS) relacionado à evolução da variável DAP.

A avaliação gráfica do IS pelo DAP descreve uma função com uma leve tendência decrescente, indicando que, gradativamente, a árvore vai apresentando menores taxas de crescimento no diâmetro da copa, em relação às taxas observadas no fuste.

O mesmo padrão de crescimento foi observado em espécies como *Cabralea canjerana* (Well.) Mart., *Bertholletia excelsa*, *Carapa guianensis*, *Tabebuia avellaneda*, *Hymenaea* (DURLO, 2001; TONINI e ARCO-VERDE, 2005).

Na avaliação dos IS constatou-se também que em média, as árvores avaliadas apresentaram a variável diâmetro de copa (DC) com dimensão correspondente a 20 vezes o DAP, resultado semelhante ao observado em *Cedrela fissilis*, *Cordia trichotoma* e *Cabralea canjerana*, avaliadas em ambiente de floresta por De Mattos, (2007).

Em florestas plantadas não manejadas de *Flindersia brayleyana* F. Muell, na Austrália, os valores encontrados para IS indicaram copas com dimensões de 12 vezes a dimensão do DAP (BROWN et al., 2004).

4.1.2.4 Formal de copa

Os valores do formal de copa (FC), que representa a razão entre o diâmetro de copa (DC) pelo comprimento de copa (l), apresentados na Figura 12, refletem o comportamento da copa de árvores livres de competição, tendo sido encontrado valores próximos a 1, o que corresponde a copas com diâmetro e comprimento equivalentes.

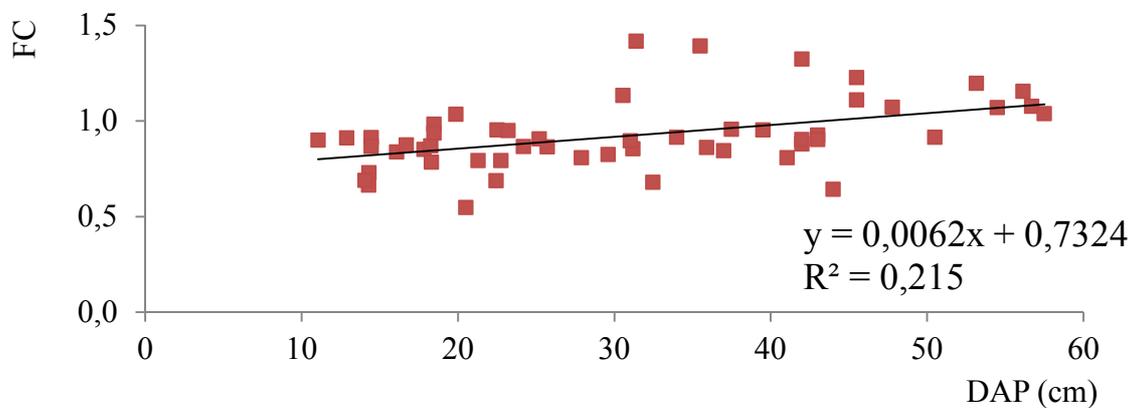


Figura 12 – Índice formal de copa (FC) relacionado à variável DAP das árvores amostradas.

O comportamento da copa que resultou em FC com pouca variação e próximo a 1, demonstra que as mesmas apresentaram valores de DC e l equivalentes, em todas as fases de crescimento. Tal comportamento está relacionado a características genéticas da espécie e ao fato das árvores terem crescido com total disponibilidade de luz, sendo que, segundo Mäkela e Sievänem (1992), em árvores de crescimento livre o nível de sombreamento sobre os galhos tende a ser não significativo para o desenvolvimento da copa.

A função crescente indica que as árvores tendem a apresentar menores taxas de crescimento em altura em relação ao crescimento em diâmetro das copas, concordando com o observado por Lamprecht (1990), o qual afirmou que o crescimento em altura cessa antes do incremento em diâmetro.

O resultado das análises referentes à morfometria das árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, pode ser observado na Figura 13, onde, em perspectiva 3D, constata-se a evolução da forma das copas em função do desenvolvimento do DAP (tempo).

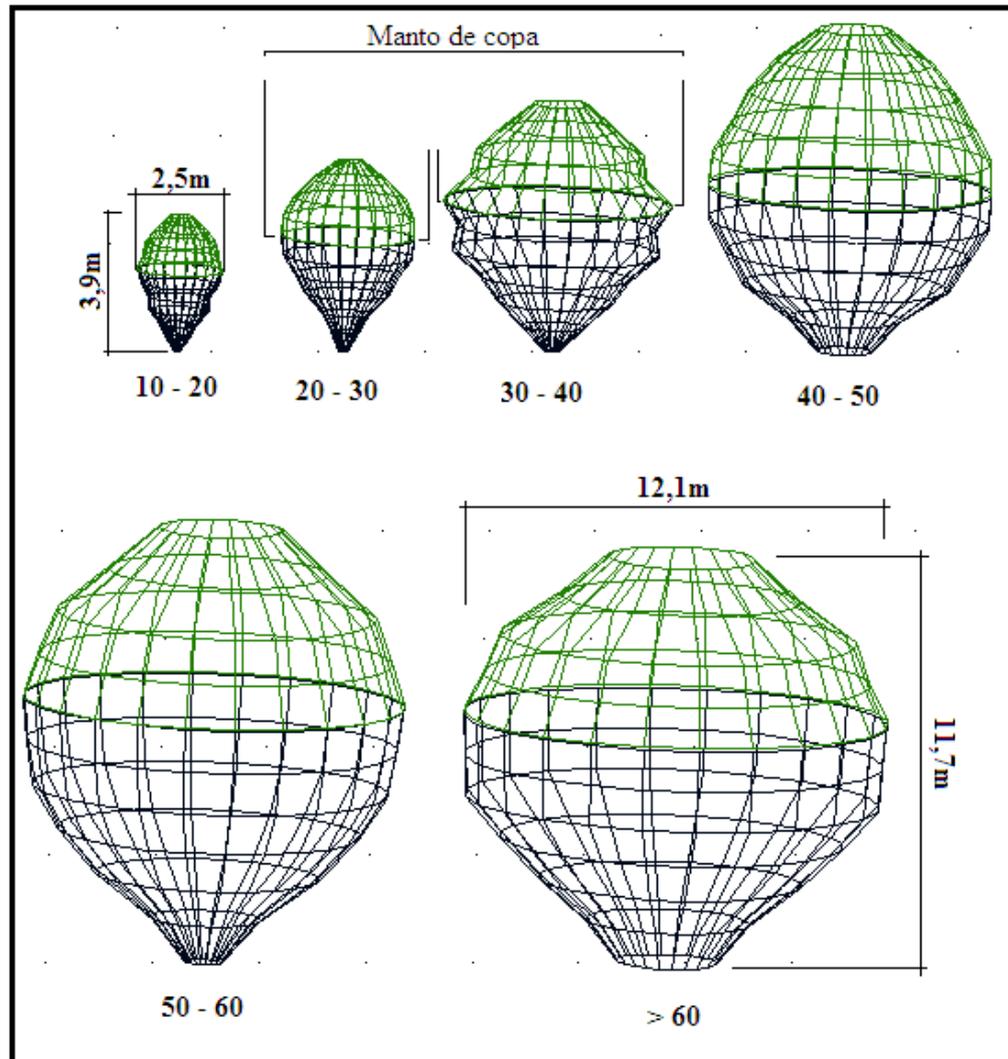


Figura 13 – Representação em perspectiva 3D da evolução da copa das árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, nas respectivas classes de diâmetro, estando destacado o manto de copa na cor verde.

Na Figura 13 apresentada destaca-se a classe diamétrica 10-20, a qual apresentou maiores taxas de crescimento da variável l , resultando em uma forma relativamente longa e esbelta, normalmente verificado em árvores jovens.

Na classe de diâmetro 30-40 também se verificaram características bem particulares, referidas como maiores irregularidades no contorno da copa. Tal característica esta relacionada à adaptação morfométrica das árvores, que nesta fase começam a apresentar copas mais globosas.

Essas deformidades observadas podem ser explicadas pelo padrão de crescimento encontrado nos indivíduos, onde a expansão da copa realizou-se com crescimento rítmico e com grandes taxas de alongamento anual, resultando em grandes modificações das copas em curtos períodos de tempo.

A característica da espécie de apresentar folhas de grandes dimensões, de até 1,3 m (RODRIGUES et al., 2009), também pode explicar as grandes taxas de alongamentos anuais observadas, pois, de acordo com Hallé et al. (1978) os alongamentos dos galhos estão diretamente relacionados às características do sistema foliar.

Na avaliação do padrão de crescimento das copas observou-se que a forma de uma árvore jovem (Figura 14a), se repetia na composição das copas de árvores adultas (Figura 14b), nas quais a junção de pequenos núcleos de ramificação resulta em uma forma globosa e completa.

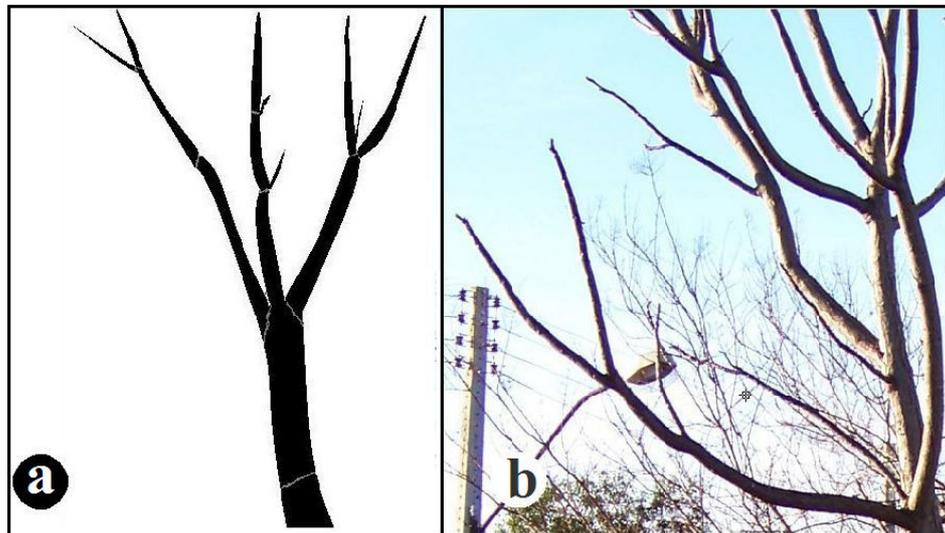


Figura 14 – Árvore jovem de *Cedrela fissilis* (a); ramificação de árvore adulta de *Cedrela fissilis* (b).

Tal padrão de desenvolvimento assemelha-se ao modelo de arquitetura definido como Modelo de Rauh, descrito por Hallé et al. (1978), e caracterizado por um tronco monopodial onde os galhos se desenvolvem em níveis ritmados e idênticos ao tronco principal.

O mesmo padrão de crescimento também foi encontrado por Mutke et al. (2005), em povoamento jovem de *Pinus pinea* L., em Madrid, Espanha

Na composição das copas observou grande incidência de ramos laterais desenvolvidos a partir das gemas terminais, (ramificação siléptica), principalmente nas maiores ordens de ramificação.

Nas menores árvores, onde a copa compunha-se por galhos de ordens de ramificação inferiores, foram mais frequentes a presença de ramos laterais eclodidos a partir de gemas laterais dormentes (ramificação proléptica), muito provavelmente com a função de aumentar a área de captação de luz nos níveis inferiores da copa.

Esta distribuição de ramificação siléptica e proléptica também foi verificado em árvores jovens de *Cleyera japonica* Thumb., em florestas naturais de Kyoto, Japão (SUZUKI, 2002).

4.2 Crescimento da copa

4.2.1 Alongamento anual da copa

Os alongamentos anuais referentes ao período de 2007 a 2011, amostrados em duas posições distintas das copas de 57 árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, apresentaram correlação positiva, definida pelo coeficiente de correlação de Pearson, entre as duas amostras da copa, estando os resultados, juntamente com a estatística descritiva, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Estatística descritiva e a correlação entre os alongamentos de orientação norte e sul (NS) e orientação leste e oeste (LO).

Ano	(r)	Pr	Posição	Méd. (cm)	Min. (cm)	Máx. (cm)	CV%
2011	0,82	<.0001	LO	29,8	3,8	87,0	65,7
			NS	28,3	3,2	67,5	60,7
2010	0,79	<.0001	LO	31,3	5,9	71,7	54,6
			NS	29,6	4,0	89,0	55,2
2009	0,69	<.0001	LO	33,1	6,2	81,0	49,6
			NS	32,4	4,7	89,0	54,1
2008	0,70	<.0001	LO	36,5	5,7	89,0	54,8
			NS	35,2	3,3	70,0	54,4
2007	0,88	<.0001	LO	35,9	6,5	90,5	59,2
			NS	32,3	3,0	91,0	61,6

Sendo: r = Coeficiente de correlação de Pearson; CV(%) = Coeficiente de variação; Pr = probabilidade a 5% de significância de erro.

A alta correlação entre os alongamentos descreve um padrão de crescimento comumente verificado em árvores isoladas, onde as copas não apresentam restrições ao crescimento. Apesar do crescimento nas duas posições amostradas ter se apresentado de forma equilibrada, como pode ser observado nas médias dos alongamentos anuais, em todos os períodos avaliados as taxas de alongamento LO apresentaram-se ligeiramente superiores a NS. Entretanto, essas diferenças observadas não foram significantes pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

As elevadas variações nas taxas de alongamento, observadas em todos os períodos avaliados, e confirmadas pelo coeficiente de variação, tiveram seus resultados relacionados à grande variabilidade do grupo de árvores amostradas. Sendo que o problema da variabilidade surgiu em decorrência da amostragem ter sido exclusivamente de indivíduos isolados, que desta forma, encontravam-se em situações muito distintas de crescimento, principalmente referentes ao sítio. Esta mesma conclusão, foi encontrada por Hasenauer (1997) na avaliação de árvores isoladas de *Picea abies* L. Karst e *Larix decidua*, que observou significativas influências dos sítios na determinação das taxas de crescimento dos indivíduos amostrados.

Considerando que o sítio, juntamente com a carga genética, tem ação decisiva sobre o incremento em diâmetro de árvores isoladas (MONSERUD e STERBA, 1996; LI et al., 2010), estima-se que tal influência também seja verificada no desenvolvimento da parte aérea,

com base principalmente na forte correlação verificada entre o DAP e DC (BROWN et al., 2004).

As variações nas taxas de alongamento também podem estar ligadas a características fisiológicas das plantas, baseado na afirmativa de que em árvores com padrão de crescimento rítmico, como *Cedrela fissilis*, podem ser observadas variações na periodicidade do crescimento relacionadas à estação do ano. Este comportamento, de acordo com Hallé et al. (1978), resulta em maiores diferenças nas taxas de crescimento em curtos períodos de avaliação.

Quando avaliados os alongamentos anuais sequenciais, classificados por ano e/ou ordem de ramificação, constatou-se correlação em série nas taxas de alongamento, e conseqüentemente, entre as ordens de ramificação (Tabela 4).

Tabela 4 – Correlação de Pearson (r) entre os alongamentos sequenciais, no período 2007-2011.

Correlção/Alongamento	2011-2010	2010-2009	2009-2008	2008-2007
(r)	0,85	0,76	0,86	0,85
Pr>[r]	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Sendo: (r) = valor do coeficiente de correlação de Pearson; Pr>[r] = probabilidade a 5% de significância de erro.

Os valores de correlação apresentados demonstram que o a taxa de crescimento da planta, observada em determinado período, tem significativa relação com o desenvolvimento da mesma no período anterior. Tal característica pode ser um indicativo da capacidade da espécie em armazenar nutrientes em um período vegetativo, que serão disponibilizados na próxima estação de crescimento.

O mesmo comportamento foi observado em árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, avaliadas no município de Santa Maria – RS (DA CUNHA et al. (2012), e portanto, podendo tal comportamento ser definido como um padrão de crescimento comum em algumas espécies, como observado em *Pinus pinea* L., por Mutke et al. (2005), onde o alongamento da copa em um período “i” estava relacionado ao desenvolvimento da copa no período “i-1”.

Os alongamentos anuais também apresentaram um padrão definido, quando relacionados às ordens de ramificação, tendo sido constatadas taxas crescentes da maior para

a menor ordem, definindo-se como ordem de ramificação “r” o crescimento do ano de 2007, “r + 1” o do ano de 2008, e assim, sucessivamente (Figura 15).

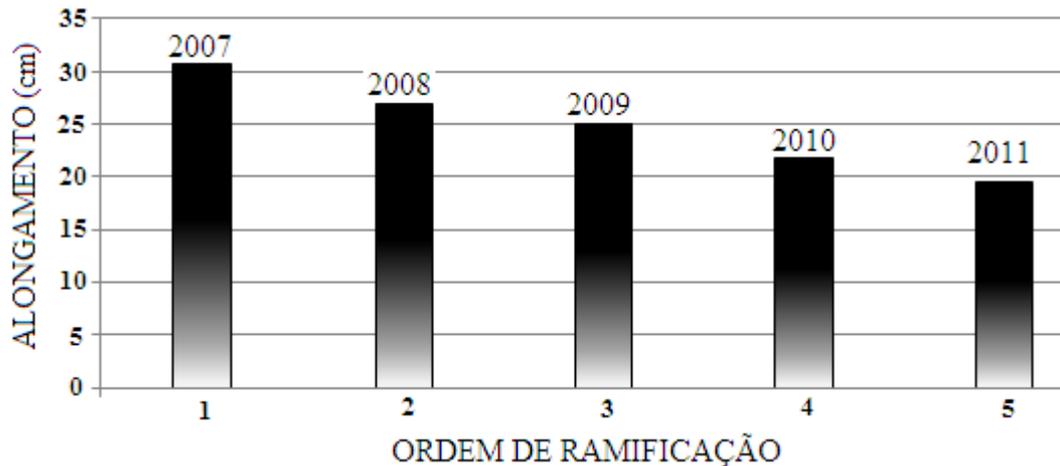


Figura 15 – Alongamentos médios anuais apresentados por ordem de ramificação e ano.

Os resultados mostraram maiores taxas de alongamento nas menores ordens de ramificação, e conseqüentemente, nos primeiros anos de avaliação, definindo um comportamento decrescente das taxas de alongamento, do ponto de inserção para o ápice da copa. Esta dinâmica de crescimento corrobora com a afirmativa de que os alongamentos da copa são tão maiores quanto menores as ordens de ramificação (HALLÉ et al., 1978; OLIVER e LARSON, 1996; SUZUKI, 2002; MUTKE et al., 2005).

A observação das maiores taxas de alongamento nas menores ordens de ramificação pode estar relacionada ao fato de que o número de ramos é significativamente maior nas maiores ordens, logo, a taxa de crescimento volumétrico observada nos galhos inferiores da copa deverá ser distribuída em uma maior “população” de galhos da parte superior, resultando em menores taxas de alongamento individual.

A significância entre as diferentes taxas de alongamento anuais da copa foi comprovada pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro, excetuando-se o crescimento entre as ordens 4 e 5.

4.2.2 Alongamentos periódicos da copa (ALGP)

Na avaliação dos alongamentos período da copa (ALGP), avaliado de 2007 a 2010, os mesmos foram estratificados em classes diamétricas, estando a distribuição, juntamente com o valor médio e coeficiente de variação (%), apresentados na Figura 16.

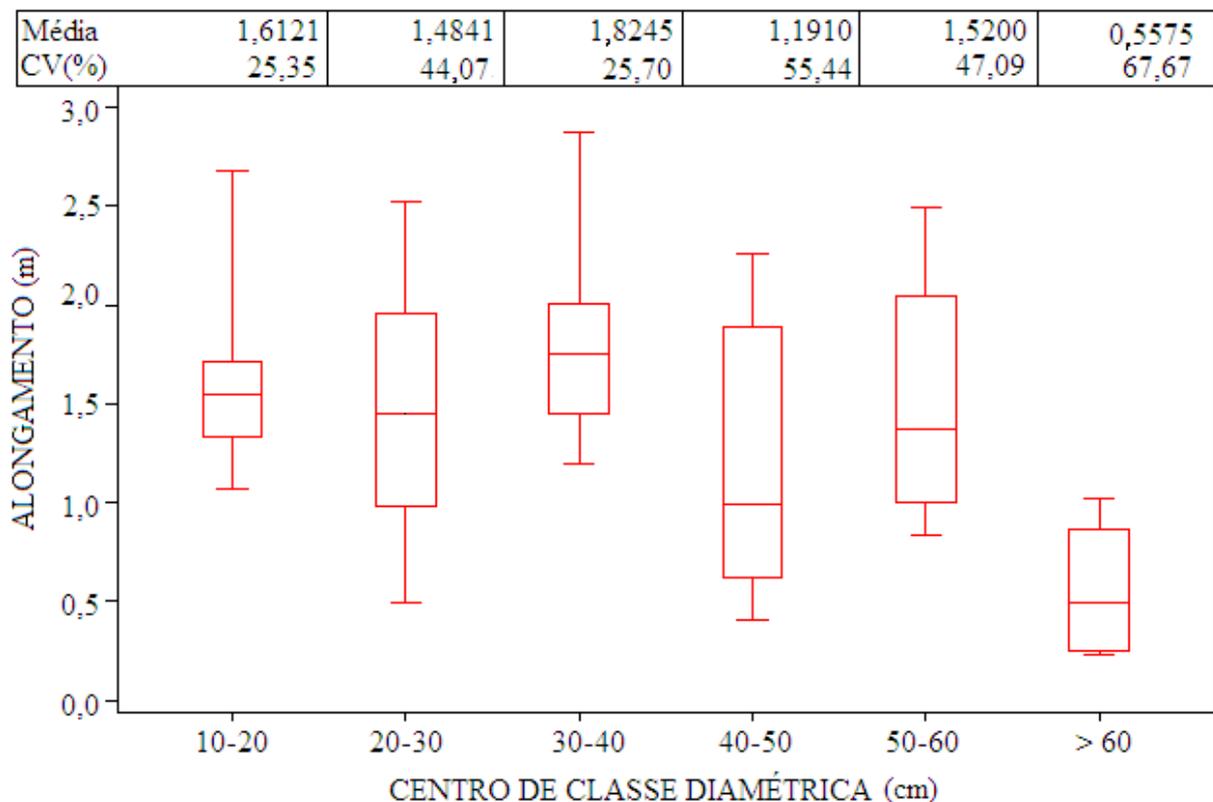


Figura 16 – Alongamento da copa no período 2007-2011 (ALGP), estratificados em classes diamétricas, com suas respectivas médias e coeficiente de variação (%).

O resultado da estratificação apontou menores variações dentro das menores classes, considerando que para todos os dados o coeficiente de variação (CV) foi de 42,26%. Entretanto, nas três maiores classes diamétricas obtiveram-se valores de CV superior a 45%, demonstrando maiores diferenças entre as taxas de ALGP, o que pode ter sido influenciada pelo menor amostragem realizada principalmente na classe de diâmetro > 60 cm.

Os alongamentos periódicos médios variaram de 0,56 a 1,82 cm, tendo sido observado maior valor médio na classe diamétrica 30-40 cm. Na classe 50-60 cm observou-se taxa de alongamento periódico médio de 1,52 cm, o qual não se diferiu significativamente das classes inferiores, demonstrando que árvores maduras podem apresentar crescimento da copa tão expressivo quanto o observado em árvores jovens.

As diferenças entre ALGP em cada classes diamétrica, avaliadas pelo teste de Tukey, à 5% de probabilidade de erro, apresentaram significância somente entre as classes de diâmetro 10-20 e 30-40 cm, em relação à classe de diâmetro > 60 cm. A não significância nos valores observados entre as demais classes de diâmetro pode estar relacionada à grande variância dos dados, evidenciada na avaliação da Figura 16.

As significativas diferenças observadas foram relacionadas ao número de ramificações em cada classe diamétrica, sendo que o resultado apontou as classes inferiores, de maiores valores de ALGP, como as com menor número de ramificações. O teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro, apontou diferenças significativas somente entre o número de ramificações das classes 10-20, 20-30, 30-40 em relação às demais.

Segundo Hallé et al. (1978), este comportamento explica-se pelo fato da copa ser considerada uma estrutura complexa, semelhante a um povoamento florestal, e desta forma, copas mais densas, com maior número de ramificações, têm a tendência de apresentar menores taxas de crescimento por galho.

Outro fator que explica os maiores valores de ALGP nas menores classes diamétricas refere-se ao fato de estas classes serem compostas por árvores mais jovens, que por consequência apresentaram seu crescimento distribuído em galhos de ordens de ramificação inferiores às analisadas nas árvores pertencentes às classes de maiores diâmetros.

As maiores taxas de crescimento da copa verificada nas ordens de ramificação inferiores também foi observado por autores como Hallé (1978), Oliver e Larson (1996), Suzuki (2002), Mutke et al. (2005) e Lintunem e Kaitaniemin (2010).

Nos valores de ALGP analisados em mesma amostra, ou seja, em mesma posição dentro da copa, observou-se pouca variação entre os mesmos, sendo que do total amostrado, 82% apresentou coeficiente de variação (CV) abaixo de 15%.

Os resultados concordam com o observado por Sachs, (2004), que avaliando a dinâmica organizacional das copas verificou que galhos que ocupem uma mesma posição interagem entre si e tendem a manter um padrão de desenvolvimento devido as semelhantes condições de iluminação e espaço.

Em ALGPs de mesma posição com diferenças caracterizadas por $CV > 15\%$, as análises referentes a orientação, diâmetro e ângulo dos ramos não indicou um padrão característico que pudessem explicar a variação observada, devendo a mesma estar relacionada a peculiaridades ligadas a fisiologia da planta.

4.2.3 Ângulo de inclinação dos galhos e crescimento em diâmetro

Os ângulos de inclinação dos galhos (ANG) mensurados para o período de 2007-2011, em duas posições da copa, totalizando 114 dados, mostraram maiores variações entre as menores e maiores classes diamétrica, sem terem sido verificadas diferenças significativas entre as classes intermediárias 30-40 e 40-50, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

A variável ANG quando avaliada e representada graficamente em função das variáveis DAP e h, apresentou a relação descrita por uma função linear positiva (Figura 17a e 17 b).

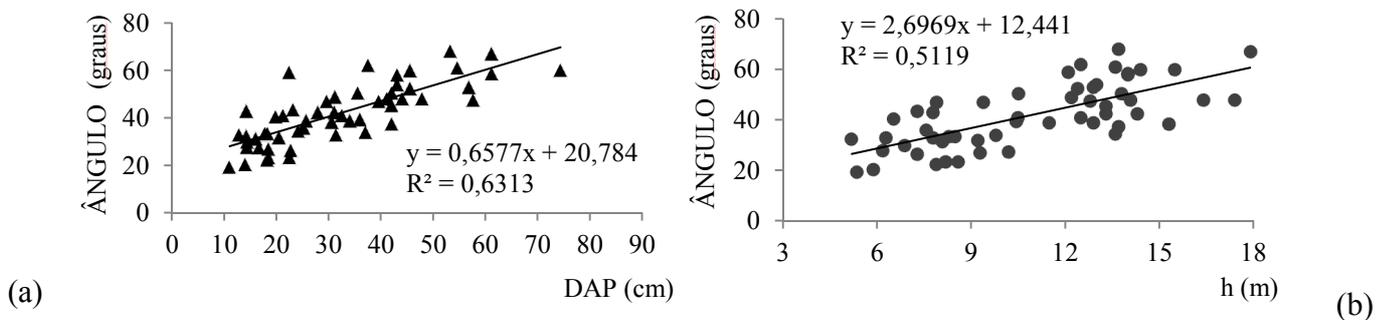


Figura 17 – Comportamento do ângulo de inclinação da copa em função do DAP (a) e da altura (b).

O resultado da avaliação gráfica indica que os ângulos de inclinação dos ramos tendem a aumentar com o incremento das dimensões h e DAP das árvores. Considerando que nas maiores árvores os ângulos foram amostrados em ordens de ramificação superiores, constata-se pela avaliação da Figura 17 que maiores ordens de ramificação correspondem a maiores valores de ANG, concordando com resultados também observados por Goudie et al.,

(2009), em árvores jovens de *Pinus contorta* var. latifolia Engl. Critch, em florestas do Canadá.

Os ângulos de inclinação também foram relacionados aos alongamentos (ALG) e à relação altura/dap (h/d), conforme pode ser observado na Figura 18.

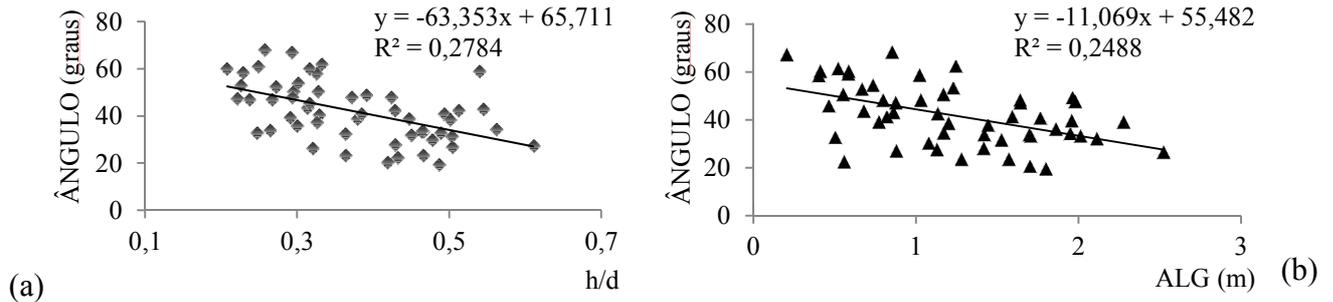


Figura 18 – Dinâmica do ângulo de inclinação da copa em função da relação (a) e das taxas de alongamento anuais (b).

A avaliação gráfica dos ângulos em função de ALG e h/d apresentou comportamento inverso, sendo que para menores ângulos de inclinação observaram-se maior valor para ALG e h/d. A dinâmica observada foi avaliada quanto a significância de correlação entre ANG e as variáveis ALG e h/d, o que resultou em um coeficiente de correlação de Perason (r) de -0,49 ($Pr < .0001$) para ALG e $r = -0,52$ ($Pr < .0001$) para h/d.

Resultado semelhante foi encontrado por Gielen et al. (2002), em povoamentos de *Populus spp*, situação na qual os ângulo apresentaram-se negativamente correlacionados aos comprimentos dos galhos. Da mesma forma, Lintunen e Kaitaniemi (2010), avaliaram a arquitetura da copa em *Betula pendula*, na Finlândia, verificaram que relacionado à diminuição do ângulo estava o aumento do comprimento do galho.

Já em avaliações realizadas em povoamentos de *Pseudotsuga menziessi*, Weiskittel et al. (2007), relacionaram ALG e h/d, tendo encontrado resultado inverso aos observados nas árvores de *Cedrela fissilis*, sendo que os ângulos apresentaram relação positiva com h/d.

Em árvores isoladas e em florestas da Índia, Shukla e Ramakrishnan (1986), avaliando a copa de quatro espécies também encontraram menores ângulos de inclinação nas maiores ordens de ramificação.

O resultado inverso pode ser explicado pelo fato das análises realizadas em *Cedrela fissilis* terem considerado somente os últimos cinco anos de crescimento, variando a ordem de ramificação para cada classe diamétrica, enquanto as citadas acima descrevem os ângulos de inserção dos galhos no fuste principal, avaliados em mesma ordem de ramificação.

A interação entre as taxas de alongamento da copa e os ângulos dos galhos, em cada classe diamétrica, resultaram em diferentes crescimentos relativos do volume e manto das copas (Figura 19).

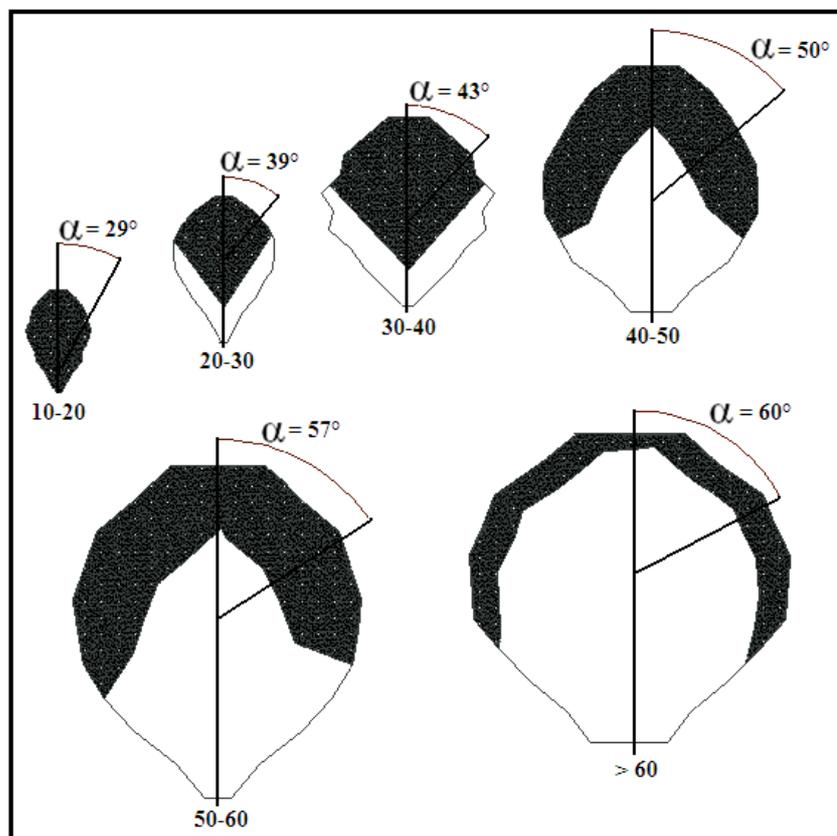


Figura 19 – Perfil transversal das copas, por classes diamétricas, com a área hachurada representando o crescimento no período 2007-2011, e seus respectivos ângulos de inclinação.

No perfil transversal das árvores foi constatado que as elevadas taxas de crescimento da copa com menores ângulos de inclinação, avaliados no período 2007-2011, foram responsáveis pela formação de toda a copa da classe 10-20.

Por outro lado, na classe de diâmetro > 60 , as baixas taxas de alongamento e maiores ângulos resultaram em pequena área de crescimento, mais restrita a área representada pelo manto da copa das árvores.

Avaliando a área plana dos perfis observados, o maior incremento em área foi observado na classe de diâmetro 50-60, porém, quando avaliada a área de incremento percentual relacionada à área total do perfil da copa, as maiores taxas foram observadas nas classes de diâmetro 10-20 e 30-40 cm, com 100 e 67%, respectivamente.

Vale ressaltar que dentre as árvores com DAPs > 30 cm, a classe 30-40 também foi a que apresentou maior taxa de incremento periódico anual em área basal (IPAg).

A classe diamétrica > 60 teve um incremento em área plana percentual de 21,1%, porém, toda sua área plana de crescimento equivale a 3,5 a área plana de crescimento da classe diamétrica 10-20 cm.

4.3 Modelagem da copa

A análise das imagens digitalizadas das 57 árvores amostradas permitiu que fosse selecionada uma amostra de 35 copas bem desenvolvidas e densas, as quais foram utilizadas na modelagem e estão distribuídas em classes diamétricas conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Número de árvores amostradas por classe de diâmetro.

Classe diamétrica	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60
N	9	6	7	8	5

Sendo: N = número de árvores.

4.3.1 Modelagem do manto da copa

4.3.1.1 Avaliação da correlação

A seleção das variáveis independentes que apresentaram correlação com a variável manto de copa (MC) foi definida a partir da análise gráfica da dispersão dos dados, na qual ficou evidente a relação entre o desenvolvimento da variável manto de copa (MC) e as potenciais variáveis independentes altura total (h), diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l).

A significância da correlação entre as variáveis pré-selecionadas foi determinada para definir as variáveis potenciais, estando os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Correlação de Pearson (r) entre MC e as variáveis independentes.

Variáveis	DAP	1/DAP	DAP ²	DC*	l*	h*
Pearson (r)	0,92	-0,77	0,94	0,94	0,88	0,79
Pr>[r]	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Sendo: DAP = diâmetro a altura do peito; 1/DAP = inverso da variável DAP; DAP² = DAP ao quadrado; l = comprimento de copa; h = altura total; * = variáveis não incluídas no modelo.

A correlação de Pearson apresentou maiores valores para as variáveis diâmetro a altura do peito (DAP) e seu termo quadrático (DAP²), com altos valores de correlação também verificados nas variáveis diâmetro de copa (DC) e comprimento de copa (l). Com o objetivo de produzir um modelo com maior praticidade de aplicação, optou-se por manter nos ajustes apenas a variável DAP e suas transformações, considerando que as mesmas resultaram em alta eficiência estatística para o modelo.

NA seleção das variáveis com maior significância para a equação, realizado um procedimento PROC REG/STEPWISE, definiu-se as variáveis preditoras DAP, DAP ao quadrado (DAP²), inverso do DAP (1/DAP) e h.

4.3.1.2 Construção e validação do modelo de crescimento

Na construção e ajuste do modelo, utilizando somente as variáveis DAP e DAP², verificou-se pelo teste do Fator de Inflação da Variância (FIV) que as duas variáveis predictoras apresentavam correlação entre si, com FIV = 18,1, desta forma, para não produzir um modelo pouco confiável, foi selecionada outra variável explanatória.

A variável menos significativa para o modelo, apontada pelo teste *t-Student*, foi removida e substituída pela variável 1/DAP, apontada como altamente significativa, indicado pelo valor de *t*. Para a manutenção da mesma, um novo teste de colinearidade foi realizado, o qual apontou a não correlação entre as variáveis independentes, com FIV = 3,4.

O modelo MC composto pelas variáveis 1/DAP e DAP² apresentou heterogeneidade na distribuição dos resíduos, com assimetria à esquerda, desta forma, procedeu-se a transformação da variável objetivo, com a função logaritmo natural (LN), a qual resultou em distribuição normal e homogênea dos erros, ficando o modelo final definido como uma equação exponencial (Equação 2).

No ajuste de uma equação para o manto de copa (MC) de árvore isoladas de *Cedrela fissilis*, Durlo et al. (2004), definiu como variáveis explanatórias DAP e DAP², com a variável objetivo em sua unidade original, porém sem apresentar resultados referentes a colinearidade.

Os parâmetros estatísticos das variáveis independentes que compunham o modelo, juntamente com os parâmetros de avaliação estatísticos coeficiente de determinação ajustado (R²aj.), coeficiente da variação (CV%) e valor de F estão apresentados na Tabela 7.

$$\text{LN}(\text{MC}) = b_0 - b_1 * (1/\text{DAP}) + b_2 * (\text{DAP}^2) \quad (2)$$

Em que: LN = logaritmo natural; MC = variável independente manto de copa; DAP = diâmetro à altura do peito; b₀, b₁, b₂ = coeficientes da equação.

Tabela 7 – Coeficientes do modelo MC e parâmetros referentes a precisão estatística.

Equação	b ₀	b ₁	b ₂	R ² aj.	CV%	F
2	5,35951	-33,03985	0,00031799	0,92	6,12	199,80
	(<.0001)	(<.0001)	(0,0325)	-	-	(<.0001)

Sendo: b₀, b₁, b₂ = coeficientes da equação; R²aj. = coeficiente de determinação ajustado; CV% = coeficiente de variação; F = valor do teste F da equação; () = p – valor.

Os valores apresentados definem o modelo final como de alta precisão estatística, sendo que o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) indicou que 92% da variância observada em MC pôde ser explicada pela equação. O modelo final também apresentou bom ajuste, com CV igual a 6,12%. Na análise do coeficiente de determinação parcial (não ajustado) observou-se que 89% da variância foi explicada pela variável 1/DAP.

A relação entre a variável 1/DAP e MC foi descrita como uma função linear decrescente, sendo verificado na análise de sensibilidade dos coeficientes que 10% de aumento da variável 1/DAP (cm) resultam em um decréscimo no incremento de 2,3% em MC (m^2). Para a variável DAP^2 a relação direta com a variável MC foi descrita por uma função onde 10% de aumento na variável explanatória resultam em um incremento de 0,84% em MC.

A significância de todos os coeficientes comprovou que a manutenção dos mesmos agrega qualidade estatística ao modelo, porém, a permanência do intercepto (b_0), resultará em valores numéricos para a variável MC não condizente com o processo biológico quando o DAP apresentar valor nulo (zero), sendo desta forma necessário observar a amplitude de validade da equação.

4.3.1.3 Avaliação dos resíduos

Na avaliação objetiva dos resíduos, como resultado da transformação da variável dependente, os mesmos apresentaram não significância para os testes de normalidade ($SW=0,98$; $Pr>0,80$) e homogeneidade ($Pr>x^2=0,62$), sem ser observada correlação negativa. ($Pr>DW=0,81$) e positiva ($Pr<DW=0,19$) na distribuição dos erros.

Na análise subjetiva dos resíduos, realizada a partir do gráfico dos resíduos percentuais em função da variável estimada (Figura 21), a variável MC foi apresentada em sua unidade original (m^2).

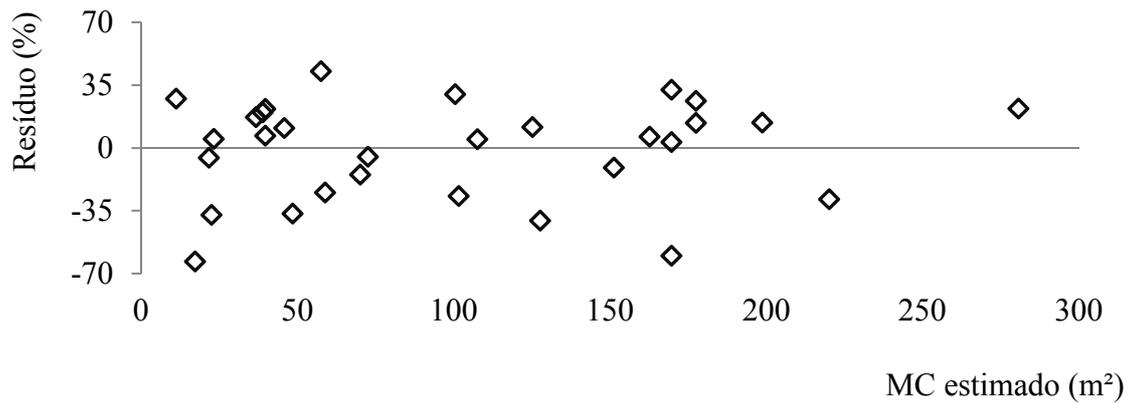


Figura 21 – Distribuição dos resíduos percentuais em função dos valores estimados de manto de copa (MC), apresentado em sua unidade original.

A distribuição dos resíduos demonstrou que os mesmos apresentaram distribuição livre de tendência e valores superestimados alcançando erros percentuais de até 70%.

4.3.2 Modelagem do alongamento e crescimento em diâmetro da copa

O alongamento anual da copa e o diâmetro anual da copa, observados no período 2007-2011, tiveram sua dinâmica correlacionada com as variáveis que descrevem o desenvolvimento do fuste, tendo sido pré-definidas as potenciais variáveis explanatórias DAP e incremento periódico em diâmetro (IP).

4.3.2.1 Seleção das variáveis independentes

A seleção das variáveis independentes, primeiramente avaliadas graficamente em função da variável crescimento em diâmetro da copa (CCD) e alongamento da copa (ALG), baseou-se no valor de correlação, definido pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), o qual definiu o conjunto de variáveis apresentado nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Correlação de Pearson [r] para as variáveis independentes relacionadas a variável dependente alongamento anual da copa (ALG).

Correlação/Variáveis	ICA	1/ICA	ICA ²	DAP	1/DAP	DAP ²	LNICA	LNDAP
Pearson (r)	0,556	-0,551	0,444	-0,456	0,378	-0,462	0,617	-0,426
Pr>[r]	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Sendo: ICA = incremento corrente anual em diâmetro; 1/ICA = inverso de ICA; ICA² = ICA ao quadrado; DAP = diâmetro à altura do peito; 1/DAP = inverso do DAP; DAP² = DAP ao quadrado; LNICA = logaritmo natural de ICA; LNDAP = logaritmo natural de DAP.

O resultado da correlação de Pearson para a variável ALG apresentou maior valor de r para as variáveis logaritmo natural do incremento corrente anual em diâmetro (LNICA), ICA e DAP, com resultado positivo nas duas primeiras e negativo para DAP, indicando que maiores alongamento estão relacionados a maiores taxas de incremento anual em diâmetro e a menores dimensões de DAP.

O resultado significativa da correlação entre ALG e ICA, com $r = 0,556$ está em concordância com o observado por Da Cunha et al. (2012), que verificaram uma correlação positiva e altamente significativa ($r = 0,53$; $p < .0001$) entre o alongamento da copa e o incremento em diâmetro de árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, em Santa Maria, RS.

Tabela 9 – Correlação de Pearson [r] para as variáveis independentes relacionadas à variável dependente crescimento em diâmetro anual da copa (CCD).

Correlação/Variáveis	ICA	1/ICA	ICA ²	ICAg	LNICAg	LNICA	DAP ²
Pearson (r)	0,633	-0,562	0,525	0,503	0,494	0,670	-0,167
Pr>[r]	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0,0478

Sendo: ICA = incremento corrente anual em diâmetro; 1/ICA = inverso de ICA; ICA² = ICA ao quadrado; DAP² = diâmetro à altura do peito elevado ao quadrado; ICAg = incremento corrente anual em área basal; LNICAg = logaritmo natural de ICAg.

Nos resultados da correlação entre a variável dependente crescimento da copa em diâmetro (CCD) e as variáveis independentes, verificou-se que a variável DAP² apresentou correlação negativa e significativa para um nível de 5%. A correlação negativa entre as

variáveis pode ser explicada considerando que a tendência apresentada correspondeu a maiores taxas de crescimento em diâmetro da copa verificadas nos menores DAPs.

Em florestas do norte dos EUA, Choi et al. (2001) encontraram semelhante relação, tendo seus resultados também demonstrado que o crescimento em diâmetro da copa diminuía com o aumento da variável DAP.

A conhecida relação observada entre o diâmetro da copa (DC) e o DAP, a qual, segundo Foli et al. (2003), tende a apresentar um comportamento linear, foi comprovada pelo resultado do coeficiente de correlação de Pearson, que indicou maior valor de r (0,613) para a variável ICA, relacionada a CCD.

O procedimento STEPWISE selecionou por ordem de significância as variáveis independentes logaritmo natural de ICA (LNICA), ICA elevado ao quadrado (ICA^2), ICA e DAP, como termos explanatórios do modelo CCD.

A partir da seleção por ordem de significância selecionou-se então as variáveis independentes relacionadas ao desenvolvimento diamétrico do fuste, desconsiderando variáveis relacionadas à copa, para que fosse produzido um modelo com maior praticidade de aplicação.

A variável DAP somente foi utilizada nos ajustes da equação ALG, tendo sido considerada sua não significância em relação a variável dependente CCD.

4.3.2.2 Construção e validação dos modelos de crescimento

Os modelos de crescimento foram definidos como $ALG = f(LNICA, DAP)$, e $CCD = f(LNICA)$, entretanto, no modelo CCD a variável ICA foi primeiramente selecionada e posteriormente substituída pelo logaritmo natural de ICA (LNICA) para satisfazer os critérios estatísticos relacionados à distribuição dos resíduos.

O teste de colinearidade foi realizado no modelo ALG, ficando comprovada a não correlação entre as variáveis explanatórias ($FIV < 10$), desta forma, as equações finais foram definidas conforme descrito a seguir, estando seus parâmetros de avaliação ($R^2_{aj.}$, CV%, F) e respectivos coeficientes apresentados na Tabela 10.

$$ALG = - b_0 + b_1*(LNICA) + b_2*(DAP) \quad (3)$$

$$\text{CCD} = b_0 + b_1 * (\text{LNICA}) \quad (4)$$

Em que: ALG = alongamento anual da copa; CCD = crescimento anual da copa em diâmetro; LNICA = logaritmo natural do incremento corrente anual; DAP = diâmetro a altura do peito; b_0 , b_1 , b_2 = coeficientes da equação.

Tabela 10 – Coeficientes e parâmetros estatísticos de avaliação dos modelos ALG e CCD.

Modelo	b_0	b_1	b_2	$R^2_{aj.}$	CV%	F
ALG	44,58816 (<.0001)	13,53526 (<.0001)	-0,42218 (<.0001)	0,50 -	35,95 -	71,27 (<.0001)
CCD	38,31799 (<.0001)	18,68396 (<.0001)	- -	0,44 -	36,25	112,50 (<.0001)

Sendo: b_0 , b_1 , b_2 = coeficientes da equação; $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; CV(%) = coeficiente de variação; F = valor do teste F da equação; () = p – valor.

Os resultados apresentados demonstram que o modelo ALG explica até 50% da variação total, porém, com um CV de 35,95%, resultante da grande variação dos dados amostrados.

Na construção de equações para os alongamento anuais da copa de árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, a partir da variável ICA, Da Cunha et al. (2012), obtiveram precisão estatística definida com $R^2_{aj.} = 0,53$ e CV = 38,6%. Na mesma situação, a inclusão das variáveis altura comercial (hc) e DAP proporcionou precisão estatística do modelo definida por $R^2_{aj.} = 0,70$ e CV = 27,3%.

O modelo ALG foi altamente significativo ($F=89,12$; $p<.0001$), resultado também verificado em seus coeficientes, avaliados pelo teste t, ao nível de 5% de significância. Na análise de sensibilidade dos coeficientes observou-se que um aumento de 10% na variável LNICA resultava em 0,28% de incremento na variável ALG, enquanto que a mesma porcentagem de aumento na variável DAP acarretava em decréscimo de 3,28% em ALG. No modelo ajustado, LNICA e DAP apresentaram coeficiente de determinação parcial ($R^2_{parc.}$) de 0,42 e 0,14, respectivamente.

No modelo CCD a inclusão da variável que descreve o crescimento do fuste (LNICA) comprovou a significativa correlação entre o desenvolvimento da copa e o do fuste e sua aplicação em modelos de crescimento da copa. As observações corroboram com o que

afirmaram Leites et al. (2012), que descreveram a variável DAP como um termo explanatório altamente significativo em modelos lineares simples desenvolvidos para descrever as dimensões da copa.

A análise de sensibilidade dos coeficientes apresentou um incremento de 0,31% na variável CCD com o incremento de 10% variável LNICA. A precisão estatística do modelo CCD indicou que o mesmo explica aproximadamente 45% da variância total, apresentado alto CV, com valor de 35,58%.

O valor de $R^2_{aj}=0,45$ demonstrou que o modelo CCD apresenta precisão estatística semelhante a modelos de diâmetro de copa ajustados para florestas do norte dos EUA, nas quais Choie et al. (2001), conseguiram um ajuste definido por R^2_{aj} . de 0,20 a 0,50.

4.3.2.3 Avaliação dos resíduos

A avaliação dos resíduos constituiu-se na análise objetiva da distribuição dos mesmos, tendo sido realizados os testes de Shapiro-Wilk, White e Durbin-Watson, dos quais os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos testes de Shapiro-Wilk, White e Durbi-Watson, para a distribuição residual dos modelos ALG e CCD.

MODELO	WHITE – $Pr > \chi^2$	DW	$Pr < DW$	$Pr > DW$	SW - Prob.
ALG	0,16	1,99	0,42	0,57	$Pr > 0,48$
CCD	0,26	2,06	0,63	0,37	$Pr > 0,042$

Sendo: ALG = alongamento anual da copa; CCD = crescimento anual em diâmetro da copa; teste de White; DW = teste de Durbin-Watson; $Pr < DW$ = teste de DW para os erros positivos; $Pr > DW$ = Durbin-Watson para os erros negativos; SW - Prob = teste de Shapiro-Wilk.

Na avaliação da distribuição residual dos modelos ALG e CCD, o teste de Durbin-Watson indicou não haver tendência de correlação entre os erros, enquanto os testes de White e Shapiro-Wilk indicaram que para ambos os modelos os resíduos não apresentaram heterogeneidade na variância, não tendo sido verificado normalidade na distribuição somente no modelo CCD.

Para a avaliação subjetiva da distribuição dos erros, os mesmos foram descritos graficamente, na forma percentual, em função das variáveis estimadas (Figuras 24 e 25).

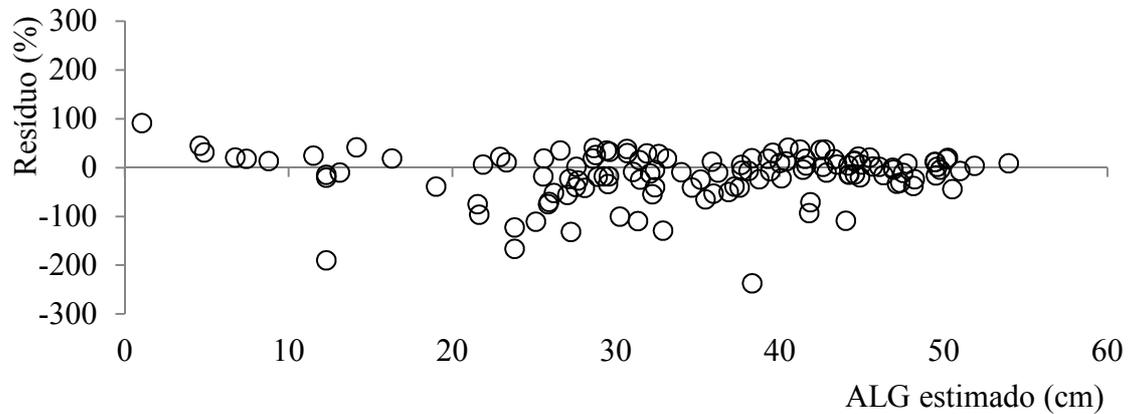


Figura 24 – Distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de ALG (m).

No gráfico da distribuição residual apresentado verifica-se uma distribuição homogênea dos resíduos, entretanto, com o modelo apresentando uma tendência de superestimativa. Observa-se também que a maior parte dos valores estimados apresentou erros de até 50%, com maiores porcentagens residuais entre ALG 10 e 40 cm, onde ocorreu também maior dispersão.

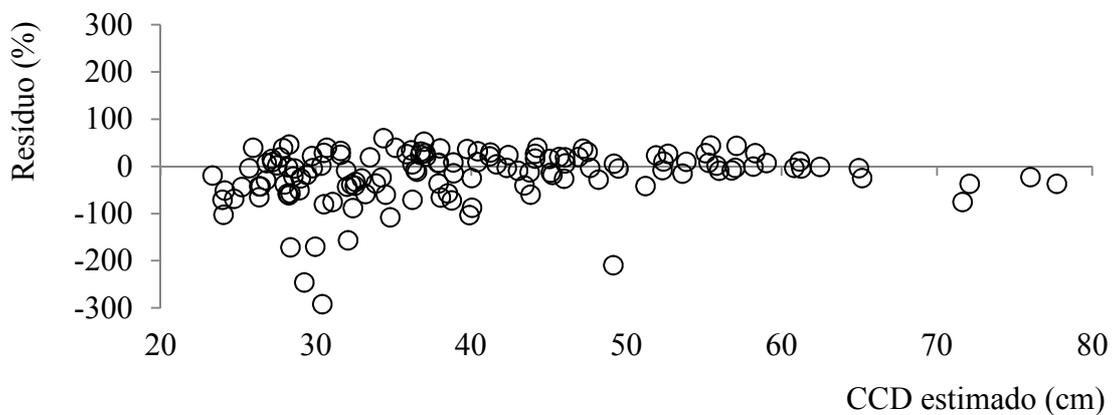


Figura 25 – Distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de CCD (m).

Na apresentação da distribuição dos resíduos do modelo CCD observa-se uma tendência de superestimativa da equação, principalmente nos menores valores de CCD estimado, nos quais os erros percentuais foram significativamente superiores.

Na comparação entre os dois gráficos apresentados nota-se que o modelo ALG apresentou distribuição mais homogênea em relação ao modelo CCD, com menor tendência à superestimativa e menores valores de erros percentuais.

4.3.3 Modelagem dos diâmetros da copa (DChi)

As variáveis morfométricas altura total (h), comprimento de copa (l), diâmetro de copa (DC), diâmetro à altura do peito (DAP), altura relativa da copa (h_i) e a relação hipsométrica (h/d), por terem apresentado tendência de dispersão linear em função da variável objetivo diâmetro da copa em alturas relativas (DChi), foram pré-definidas como variáveis explanatórias, apesar da grande heterogeneidade observada nas variâncias.

4.3.3.1 Avaliação da correlação e seleção das variáveis

Os resultados da correlação de Pearson (r), para as variáveis explanatórias do modelo DChi, estão apresentados na (Tabela 12), pela qual se pode perceber que para as avaliações foram incluídas as variáveis originais juntamente com variáveis transformadas.

Nas avaliações da correlação a variável DC e l foram excluídas das análises para favorecer a praticidade do modelo.

Tabela 12 – Correlação de Pearson (r) para as variáveis explanatórias do modelo DChi.

Correlação/Variáveis	DAP	1/DAP	DAP ²	\sqrt{DAP}	1/ h_i^2	h/d	h
Pearson (r)	0,763	-0,670	0,769	0,750	-0,302	0,593	0,639
Pr>[r]	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	.0001	<.0001

Sendo: DAP = diâmetro à altura do peito; 1/DAP = inverso de DAP; DAP² = DAP ao quadrado; \sqrt{DAP} = raiz quadrada de DAP; 1/ h_i^2 = inverso do quadrado da altura relativa h_i ; h/d = relação hipsométrica e h = altura total.

O resultado da correlação apontou o DAP e suas transformações como as principais variáveis correlacionada à DChi, destacando-se também a variável h/d e h .

O conjunto de variáveis definido como de interesse na modelagem, com correlação significativa, foi incluído na programação de seleção PROC REG/STEMPWEISE, da qual resultaram como termos independentes, ranqueadas pela significância do teste t , as variáveis DAP, $1/h_i^2$ e DAP^2 .

Para confirmar a composição definida para o modelo, realizou-se o teste da colinearidade, o qual indicou $FIV > 23$, tendo sido desta forma substituída a variável DAP pelo logaritmo natural (LN) de DAP. Após novo teste de colinearidade não foram observados valores de FIV superiores a 10.

A manutenção das variáveis LNDAP, $1/h_i^2$ e DAP^2 foi determinada considerando-se também o resultado do teste t , o qual classificou todas como altamente significativas para o modelo.

4.3.3.2 Construção, ajuste e validação do modelo de crescimento

Pelo procedimento PROC REG/MODEL, com as variáveis independentes LNDAP, $1/h_i^2$, e DAP^2 , obteve-se um bom ajuste da equação, porém, sem responder às condições estatísticas exigidas na análise de regressão pelos mínimos quadrados ordinários.

Uma nova avaliação foi realizada na distribuição dos dados observados para que fosse verificada a presença ou não de heterogeneidade da variância (Figura 26).

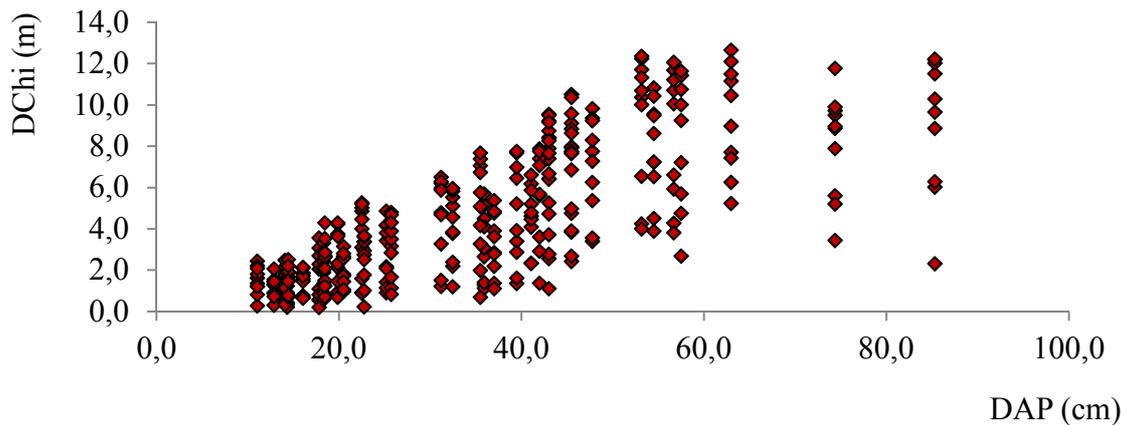


Figura 26 – Distribuição dos valores observados da variável diâmetro de copa a altura relativa i (DChi).

A partir da avaliação na distribuição dos dados, constatou-se significativa heterogeneidade na variância, tendo sido então realizadas transformações na variável dependente, com a função logaritmo natural (LN) conforme descrito por Schneider et al. (2009). O resultado descrito por uma nova distribuição está apresentado na Figura 27.

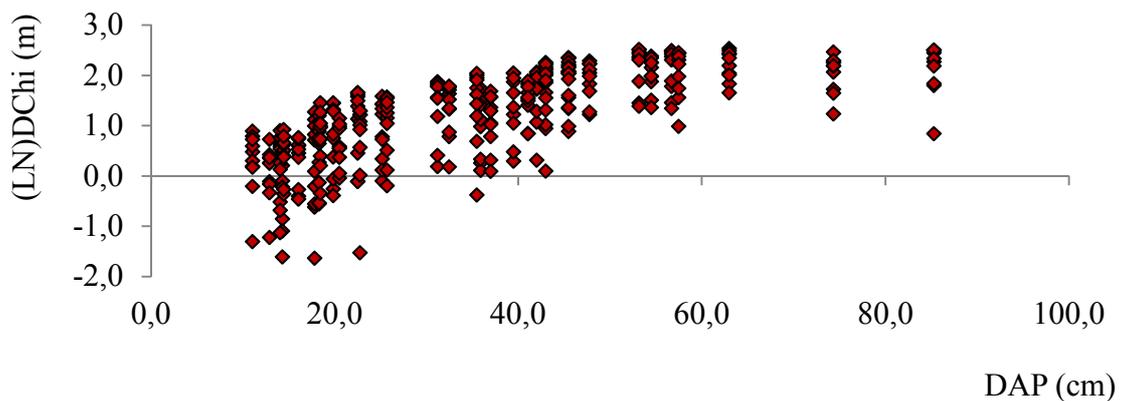


Figura 27 – Distribuição da variável LNDChi, definida como DChi transformada pela função logaritmo natural (LN).

A variável DChi apresentou maior homogeneidade na variância, ficando definido um modelo final exponencial, composto pelo logaritmo natural de DAP (LNDAP), pelo inverso do quadrado da altura relativa h_i ($1/h_i^2$) e pelo termo quadrático da variável DAP (DAP^2).

Os coeficientes que compõem o modelo e o resultado da análise da variância referentes ao $R^2_{aj.}$, CV(%) e valor de F, estão apresentados na Tabela 13.

$$LNDChi = b_0 + b_1*(LNDAP) - b_2*1/(hi^2) + b_3*(DAP^2) \quad (5)$$

Onde: LN = logaritmo natural; DChi = diâmetro da copa na altura relativa i; LNDAP = logaritmo natural da variável DAP; $(1/hi^2)$ = inverso do quadrado da altura relativa i; (DAP^2) = termo quadrático da variável DAP; b_0, b_1, b_2, b_3 = coeficientes da equação.

Tabela 13 – Coeficientes da equação e parâmetros de avaliação estatística

Equação/Parâmetros	b_0	b_1	b_2	b_3	$R^2_{aj.}$	CV(%)	F
(5)	-1,3963 (<.0001)	0,67239 (<.0001)	- 0,1504 (<.0001)	0,00027089 (0,0153)	0,58 -	52,41 -	162,38 (<.0001)

Sendo: b_0, b_1, b_2 = coeficientes da equação; $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; CV% = coeficiente de variação; F = valor do teste F da equação; () = p – valor.

O modelo ajustado com a transformação das variáveis dependentes e independente apresentou uma boa precisão estatística, porém, devido à grande variabilidade dos dados observados, o resultado final do ajuste permaneceu com um alto coeficiente de variação (CV=52,41%).

A grande variância nos valores observados de DChi foi principalmente resultante da grande variabilidade dos indivíduos analisados, que por se tratarem de árvores isoladas, encontravam-se em condições muito distintas de sítio e crescimento.

Na análise de sensibilidade dos coeficientes o acréscimo de 10% nas variáveis LNDAP e DAP^2 resultou em incremento de 20,7 e 2,96% na variável DChi (m), respectivamente. Para a variável $1/hi^2$ o acréscimo de 10% teve como consequência uma diminuição de 0,82%. Em DChi (m) estimado.

Utilizando um modelo exponencial composto pelas variáveis DAP, h, e h/d, para o diâmetro da copa de árvores individuais de *Picea abies* (L.) Karst., *Silver fir*, *Scots pine*, *Fagus sylvatica* L. e *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl., Pretzsch et al. (2002), obtiveram

melhor precisão estatística descrita por $R^2_{aj.} = 0,79$ e menor precisão definida por $R^2_{aj.} = 0,48$.

Os resultados obtidos no modelo DChi, para *Cedrela fissilis*, com $R^2_{aj.} = 0,61$ apresentaram-se com precisão estatística semelhante aos melhores valores obtidos por Pretzsch et al (2002), valendo ressaltar que no ajuste de DChi a inclusão da variável h/d não alterou os resultados de forma positiva.

Em florestas tropicais de Ghana, no ajuste de modelos lineares para determinar o diâmetro da copa de cinco espécies distintas Foli et al. (2003), conseguiram explicar até 61% da variação total, utilizando como termo explanatório a variável DAP.

4.3.3.3 Análise dos resíduos

Os resultados dos testes realizados para a distribuição dos resíduos indicaram que os mesmos não apresentaram homogeneidade nas variâncias, definido pelo teste de White ($Pr > \chi^2 = 0,042$), com correlação entre os valores positivos ($Pr < DW < .0001$), resultado demonstrado pelo teste de Durbin Watson, e não normalidade na distribuição, apontado pelo resultado do teste de Shapiro Wilk ($SW = 0,91$; $Pr < .0001$).

As transformações realizadas nas variáveis dependente e independentes resultaram em uma destruição residual com variância menos heterogênea, porém, a premissa estatística referente à normalidade na distribuição residual não pode ser atendida devido as grandes discrepâncias dos dados observados.

Somente foi alcançada a normalidade na distribuição dos resíduos quando transformada a variável dependente pela função raiz quadrada, todavia, tal transformação tinha como consequência maior heterogeneidade na variância dos mesmos, tendo sido então descartada tal opção de ajuste.

A condição da distribuição dos resíduos, referente ao critério de normalidade, foi também avaliada de forma subjetiva, considerando a distribuição normal de Gauss (Figura 29).

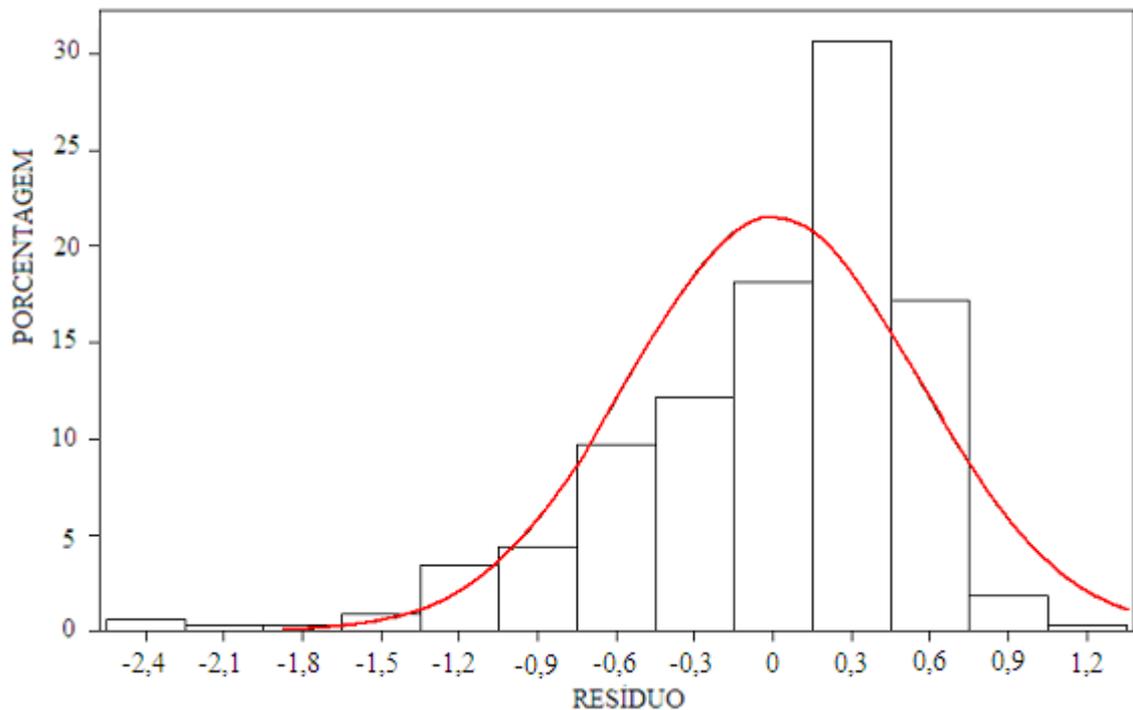


Figura 29 – Histograma de distribuição dos resíduos percentuais relacionados à linha de distribuição normal (Gauss)

Na apresentação do histograma de distribuição observa-se que a curva de distribuição apresenta assimetria negativa, ou assimetria à esquerda, e forma leptocúrtica. Na avaliação da distribuição observada verificou-se assimetria de 78,05 ($Pr < .0001$) e curtose de 6,51 ($Pr < .0001$).

A descrição gráfica apontou que em uma classe residual os erros foram significativamente superiores, devido principalmente a grande variação dos dados observados, tendo sido este o principal fator atuante sobre a distribuição dos erros.

A avaliação residual foi também realizada pela análise gráfica da distribuição dos erros percentuais em função da variável estimada (DChi) (Figura 30).

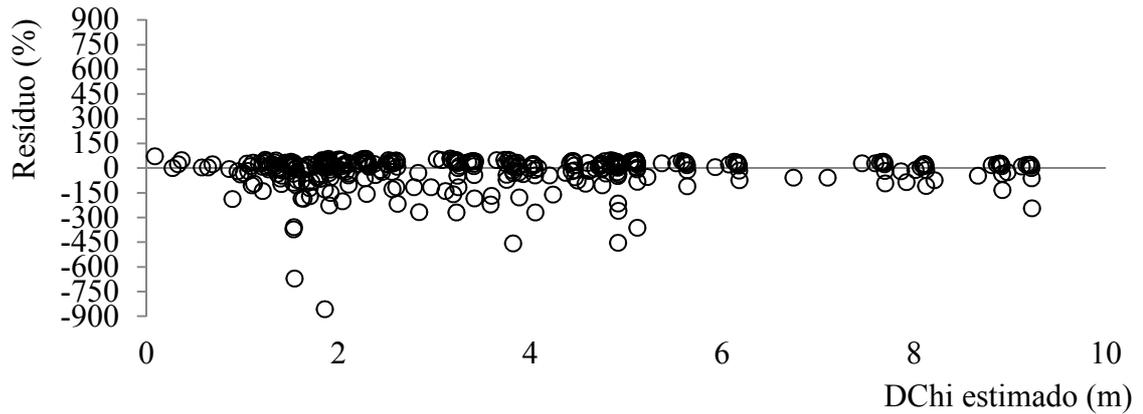


Figura 30 – Distribuição dos resíduos percentuais em função aos valores estimados da variável DChi (m).

Na dispersão dos resíduos observa-se maior heterocedasticidade nos menores valores estimados de DChi, situação onde as variâncias são maiores devido ao modelo ter apresentado tendência de superestimar alguns resultados.

A magnitude dos erros observados deve-se ao fato de que em algumas árvores amostradas as copas expandiram-se já nos primeiros anos de crescimento, fazendo com que nas alturas relativas 10 e 20% fossem observados diâmetros de copa extremamente superiores à média geral avaliada.

4.4 Modelagem do incremento periódico em área basal (IPAg)

A partir da avaliação da dispersão das variáveis potenciais em função de IPAg selecionou-se para a construção do modelo a altura total (h), comprimento de copa (l), relação hipsométrica (h/d), diâmetro de copa (DC), diâmetro à altura do peito (DAP), formal de copa (FC), índice de saliência (IS) e porcentagem de copa (PC%), para posterior análise da correlação.

4.4.1 Avaliação da correlação e seleção das variáveis

O nível de correlação entre termos independentes e a variável objetivo foi determinado pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), estando os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Correlação de Pearson (r) para as variáveis explanatórias do modelo DChi.

Correlação/Variáveis	DAP	h	DC	l	PC(%)	FC	h/d	d ² h
Pearson (r)	0,7352	0,5436	0,708	0,6801	0,554	0,3943	-0,7113	0,6656
Pr>[r]	<.0001	0.0007	<.0001	<.0001	0.0006	0.0191	<.0001	<.0001

Sendo: DAP = diâmetro à altura do peito; h = altura total; l = comprimento de copa; PC(%) = porcentagem de copa; FC = formal de copa; h/d = relação hipsométrica e d²h = DAP ao quadrado multiplicado pela altura.

A avaliação da correlação apontou que o incremento periódico em área basal (IPAg) esta mais correlacionada com o DAP e com as variáveis que descrevem as condições morfométricas da copa. Também se observou alta correlação de IPAg com a variável h/d e a variável DAP ao quadrado dividido pela altura (d²h).

O conjunto de variáveis com correlação significativa, definido como de interesse na modelagem, foi incluído na programação de seleção PROC REG/STEMPWEISE, a qual apontou as variáveis DAP e d²h como termos independentes de maior significância.

4.4.2 Construção, ajuste e validação do modelo

A composição definida para o modelo foi avaliada quanto à colinearidade dos termos independentes, tendo sido verificado FIV >12. O resultado indicou que o modelo deveria ser alterado, desta forma, procedeu-se a substituição da variável d²h pela variável h/d, sendo então realizada segunda avaliação da colinearidade na qual não se observou valor de FIV superior a 10. A manutenção das variáveis independentes DAP e h/d também foi definida

considerando-se o valor observado no teste t, para um nível de 95% de significância. Como procedimento de ajuste foi realizada a transformação da variável IPAg com a função logaritmo natural (LN), ficando definida como variável dependente LNIPAg.

Os coeficientes que compõem o modelo e o resultado da análise da variância referentes ao R²aj., CV(%) e valor de F, estão apresentados na Tabela 15, estando o modelo final descrito a seguir.

$$\text{LNIPAg} = b_0 + b_1*(\text{DAP}) + b_2*(\text{h/d}) \quad (5)$$

Onde: LNIPAG = logaritmo natural do incremento periódico anual em área basal; DAP = diâmetro a altura do peito; h/d = relação hipsométrica; b₀, b₁, b₂ = coeficientes da equação.

Tabela 15 – Coeficientes da equação e parâmetros de avaliação estatística

Equação/Parâmetros	b ₀	b ₁	b ₂	R ² aj.	CV(%)	F
(5)	4,70726 (<.0001)	0,02005 (0.0358)	-3,82062 (0.0096)	0,66 -	11,00 -	33,46 (<.0001)

Sendo: b₀, b₁, b₂ = coeficientes da equação; R²aj. = coeficiente de determinação ajustado; CV% = coeficiente de variação; F = valor do teste F da equação; () = p – valor.

O modelo ajustado apresentou-se altamente significativo (F=33,46; <.0001), com precisão estatística capaz de explicar até 66% da variância total. A transformação da variável objetivo proporcionou melhor ajuste ao modelo, tendo alterado o R² de 0,53 para 0,66 e o CV de 45 para 11%. Na análise de sensibilidade dos coeficientes verificou-se que o acréscimo de 10% nas variáveis DAP e h/d, resultaram em incremento de 2,46 e 5,83% na variável LNIPAg, respectivamente.

Mattos (2007) avaliando o crescimento de *Cedrela fissilis* em floresta não manejada ajustou um modelo de crescimento utilizando o termo quadrático do DAP como variável preditora, o qual conseguiu explicar 62% da variância. Outros modelos ajustados pelo mesmo autor apresentaram maior precisão estatística, principalmente quando incluídas variáveis relacionadas aos níveis de competição.

Para modelar o incremento em área basal (*ig*) de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, Zanon (2007) também incluiu ao modelo variáveis relacionadas à competição, assim como variáveis de copa e vitalidade dos indivíduos amostrados, tendo obtido uma precisão estatística descrita por R^2_{aj} de 0,84 e CV de 46,54%.

4.4.3 Análise dos resíduos

Os resultados dos testes realizados para a distribuição dos resíduos indicaram que os mesmos apresentavam homogeneidade nas variâncias, definido pelo teste de White ($Pr > \chi^2 = 0,1401$), e normalidade na distribuição, apontado pelo resultado do teste de Shapiro-Wilk ($SW = 0,85$; $Pr < .0001$). Também foi verificada a não correlação entre os valores residuais, segundo o teste de Durbin-Watson.

A avaliação residual foi também realizada pela análise gráfica da distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de IPAg (Figura 31).

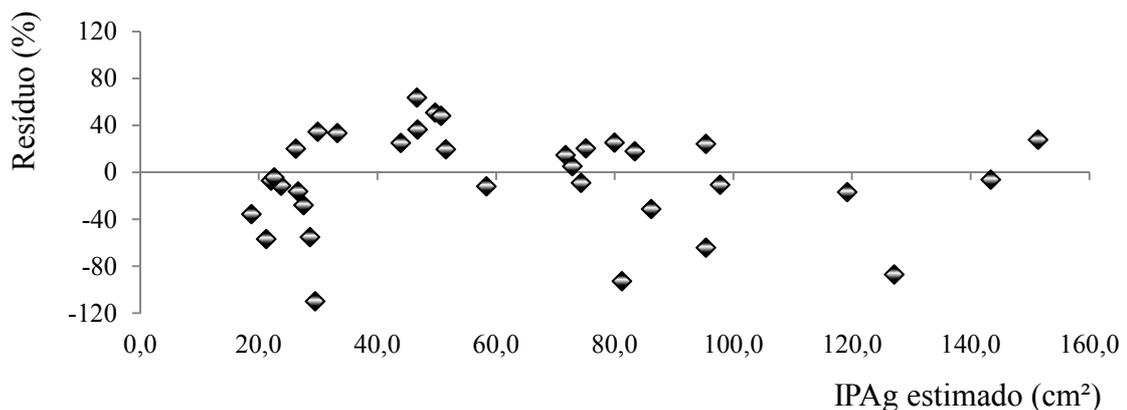


Figura 31 – Distribuição dos erros percentuais em função dos valores estimados de IPAg (cm²).

Na dispersão dos resíduos observa-se uma distribuição homogênea dos mesmos, com alguns resultados tendo sido superestimados pelo modelo.

O efeito da superestimativa ocorre em situações nas quais o valor definido pela equação encontra-se acima do valor observado, ou seja, nestes casos o crescimento real

apresenta-se aquém do crescimento predito. Esse tipo de resultado é comumente observado em grupos amostrais nos quais se verifica grande variância nos dados observados.

4.5 Descrição e caracterização do incremento

Na avaliação do incremento corrente anual (ICA) foram observadas taxas acima de 2,5 cm em todas as classes diamétricas, sendo esse valor superior aos encontrados por Costa et al. (2009), em SAFs implantados com castanho do Brasil (*Bartholletia excelsa*), na Amazônia Central, onde os valores de ICA chegaram a 2,26 cm. Pretzsch (2009), em avaliações de *Pinus sylvestris*, encontrou valores de ICA de 0,18 a 1,4 cm, para avaliações em florestas de até 50 anos de idade.

O potencial de crescimento das árvores isoladas de *Cedrela fissilis* pôde ser avaliado quando comparado com espécies exóticas de rápido crescimento como o *Eucalyptus saligna*, que em rebrota de povoamentos comerciais atingiu taxa de 3,5 cm de ICA, verificados por Cavichiolo et al. (2003).

Para o crescimento periódico anual em área basal (IPAg) foram observados valores altamente significativos em todas as classes diamétrica, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 – Estatística descritiva do incremento periódico anual em área basal (IPAg) de 2007 a 2011, por classe diamétrica, das 35 árvores isoladas de *Cedrela fissilis*.

Parâmetros/CC	15	25	35	45	55
IPAg médio (cm ²)	20,09	57,33	95,64	75,52	128,61
IPAg mínimo (cm ²)	13,56	45,76	65,58	33,78	67,99
IPAg máximo (cm ²)	32,91	73,63	128,48	125,73	209,50
CV (%)	28,73	17,91	20,61	41,63	47,02
Contagem	10	6	7	8	4

Sendo: IPAg = incremento periódico anual em área basal; CV(%) = coeficiente de variação; CC = centro de classe de diâmetro.

Nos resultados da estatística descritiva do IPAg observa-se que as classes diamétricas 25 e 35 cm apresentaram maior homogeneidade nas taxas de incremento, indicada pelo menor

valor de CV(%). Verificou-se também que os dados de IPAg médios das classes diamétricas 25, 35 e 45 cm foram bastante elevados e significativamente superiores ao observado por Mattos (2007) em árvores de *Cedrela fissilis* avaliadas em ambiente florestal, nas quais o IPAg médio para o período de 1995 a 2003 foi de 34,7 cm². O resultado está de acordo com o esperado e justifica a importância da avaliação do incremento de árvores de crescimento livre, nas quais pode ser mais bem avaliado o potencial de crescimento de cada espécie. Quanto ao comportamento do incremento periódico anual em diâmetro (IPAd), o mesmo foi avaliado e descrito graficamente de acordo com sua magnitude em cada classe diamétrica (Figura 32).

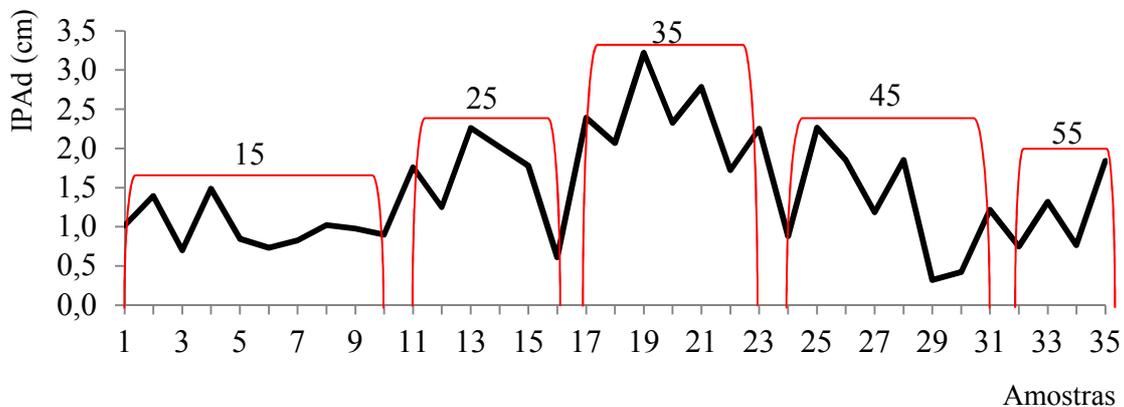


Figura 32 – Dinâmica do crescimento periódico anual em diâmetro (IPAd) em função das 35 árvores amostradas, por classe diamétrica.

Os resultados apresentados no gráfico do IPAd demonstram a elevada taxa de incremento médio, com as árvores de 20 a 50 cm de diâmetro apresentando IPAd > 1,5 cm. Mattos et al. (2010), em árvores de *Cedrela fissilis* avaliadas na Reserva Florestal EMBRAPA/EPAGRI, nas quais foram verificadas taxas de IPAd (cm) com valores de 0,57 e 0,70 cm, para períodos de 20 e 10 anos, respectivamente. Assim como as avaliações do incremento em área basal, os dados de IPAd comprovam o potencial de crescimento da espécie, que em ótimas condições de luz pode apresentar IPAd quatro vezes maior que árvores localizadas em florestas não manejadas.

Para espécies como *Hovenia dulcis*, avaliada em um período de 15 anos, e *Tabebuia pentaphylla*, num período de 21 anos, observadas em distintas condições de sítio e clima, Chagas (2009) encontrou taxas de IPAd de 0,91 e 0,64 cm, respectivamente.

Apesar das grandes variações observadas nas taxas de IPg, os resultados demonstraram que o crescimento médio verificado é superior a valores encontrados em uma série de espécies nativas já avaliadas, chegando a ter os maiores valores comparados ao crescimento de espécies exóticas comerciais.

As grandes diferenças observadas refletem a importância em se avaliar características de sítio e clima, em análises de árvores isoladas. O objetivo de prescrever o crescimento máximo de uma espécie, a partir de exemplares com crescimento livre, pode ser seriamente comprometido por tamanha variação encontrada nos padrões de crescimento, mesmo em amostragens objetivas.

5 CONCLUSÕES

A avaliação realizada em árvores isoladas de *Cedrela fissilis*, direcionadas a descrever o comportamento da copa e fuste, possibilitou concluir que existe uma forte relação entre as diferentes variáveis relacionadas ao desenvolvimento da copa e o crescimento do fuste. Outra conclusão importante refere-se a metodologia utilizada, a qual demonstrou ser bastante prática e precisa para a análise de árvore isoladas, quando existe a possibilidade de se realizar fotos de qualidade suficiente para posterior análise no AutoCAD.

Os resultados comprovaram que a tendência natural de crescimento das árvores, quando não expostas a competição, é a de serem tornarem gradativamente mais estáveis (menor relação h/d), com copas mais profundas e de maiores diâmetros. Para a espécie avaliada pôde-se compreender a dinâmica do crescimento das copas, onde em médias as mesmas apresentaram diâmetro 20 vezes maiores que o DAP e altura de copa de aproximadamente 2,5 e 11,7 na classe diamétrica 10-20 e > 60 cm, respectivamente.

Quanto ao crescimento da copa anual, concluiu-se que o mesmo está correlacionado com o desenvolvimento observado em períodos anteriores, assim como, com as taxas de incremento anuais do fuste (ICA). A correlação entre ICA e crescimento da copa comprova a possibilidade de se modelar o crescimento da parte aérea, apesar da dificuldade em se adquirir bons ajustes nos modelos, devido principalmente as discrepantes taxas de crescimento da copa observadas em um mesmo ano avaliado (3,0 a 91 cm), e também, em um mesmo indivíduo.

Referente aos modelos de crescimento é possível concluir que a construção e ajuste de equações que descrevam o crescimento da copa têm sua maior limitação relacionada a grande variância nos dados observados, principalmente quando se pretende modelar os diâmetros da copa e diferentes alturas relativas (DChi). O modelo ajustado para o manto da copa (MC) apresentou bom ajuste estatístico com $R^2_{aj.} = 0,92$ e $CV = 6,12\%$, assim como os modelos ajustados para os alongamentos anuais da copa (ALG) e o crescimento em diâmetro da copa (CCD). Para as diferentes variáveis objetivo avaliadas observou-se a necessidade em recorrer a transformações tanto nas variáveis explanatórias como nos termos dependentes, como recurso para cumprir com os critérios estatísticos do método dos mínimos quadrados ordinários.

Recomendações

Em pesquisas realizadas em árvores de crescimento livre, onde o objetivo seja descrever o crescimento máximo observado em determinada espécie, algumas recomendações podem ser feitas para posteriores estudos.

- i) Na modelagem dos diâmetros da copa sugere-se que seja feita a estratificação da amostra considerando características mais específicas relacionadas a condição da copa, como medida mitigadora da heterogeneidade da variância dos dados observados.
- ii) Para a descrição e modelagem do crescimento da copa, condições de sítio, relevo e natureza do solo também poderão ser consideradas como parâmetros de estratificação ou como variáveis explanatórias.
- iii) Variáveis relacionadas às condições das copas como densidade, integridade e o índice morfométrico porcentagem de copa (PC%) poderiam ser considerados na estratificação das árvores amostradas para o ajuste de equações de incremento em diâmetro.
- iv) A ocorrência de dois alongamentos em um mesmo período de crescimento poderia ser identificada e caracterizada para que tais fenômenos pudessem ser posteriormente relacionados às variáveis climáticas observadas no mesmo período.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ANTON, H. **Cálculo, um novo horizonte**, v.1, ed.6, 578p. Drexel University, 2000.

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

BAWA, K. S.; ASHTON, P. S. **Conservation of rare trees in tropical rain forests: a genetic perspective**. In: HOISINGER, D; FALK, A. (Ed.) Genetics and conservation of rare plants. St. Louis. MO. P. 62-74, 1991.

BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P.A.; MARTÍNEZ-RAMOS, M. Attaining the canopy in dry and moist tropical forests: strong diverences in tree growth trajectories resect variation in growing conditions. **Oecologia**, v.163, n.2, p.485-496, 2010.

BRIENEN, R. ZUIDEMA, P.A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. **Oecologia**, 2005.

BRIENEN, R. J. et al. Climate-growth analysis for a Mexican dry forest tree shows strong impact of sea surface temperatures and predicts future growth declines. **Global Change Biology**, p.1–12. 2009.

BROWNA, P.L.; DOLEYA, D. ; KEENANA, R.J. Stem and crown dimensions as predictors of thinning responses in a crowded tropical rainforest plantation of *Flindersia brayleyana* F. Muell. **Forest Ecology and Management**, v.196, p.379-392, 2004.

BURGER, H.B. Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. **Mitt. Schweiz. Anst. f. forstl. Vers. Wesen**, v. 21, p. 147-176, 1939

CANNEL, M. G. R.; GRACE J. Competition for light: deteetion, measurement and quantification. **Canadian Journal of Forest Research**, v.23, p. 1969-1979,1993.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA - CNPF; Brasília: EMBRAPA - SPI, 1994. 640 p.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**, Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1v. 1039 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras).

CAVICHIOLO, S.R.; DEDECEK, R.A.; GAVA, J.L. Avaliação do efeito do sistema de preparo em solos de diferentes texturas, na sua resistência mecânica e na produtividade da rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Bol. Pesq. Fl.**, Colombo, n. 47, p. 83-98, 2003

CHAGAS, M.P. **Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” 2009.

CHMURA, D.J.; RAHMAN, M.S.; TJOELKER, M.G. Crown structure and biomass allocation patterns modulate aboveground productivity in young loblolly pine and slash pine. **Forest Ecology and Management**, v.243, p.219-230. 2007.

CHMURA, D.J.; TJOELKER, M.G. Leaf traits in relation to crown development, light interception and growth of elite families of loblolly and slash pine. **Tree Physiology**, v.28, p.729-742. Victoria, Canada. Herron Publishing, 2008.

CHOI, J. et al. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests. **Forest Ecology and Management**, v.152, p.235-258. 2001.

CIANCIO, O. et al. Conversion of clearcut beech coppices into high forests with continuous cover: a case study in central Italy. **Forest Ecology and Management**, v.224, p.235-240 2006.

CLAVEAU, Y. et al. Growth and crown morphological responses of boreal conifer seedlings and saplings with contrasting shade tolerance to a gradient of light and height. **Canadian Journal of Forest Research**, v.32, 458-468. 2002.

COSTA, J. R.; CASTRO, A. B. C.; WANDELLI, E. V.; CORAL, S. C. T.; SOUZA, S. A. G. Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 4, p. 843-850, Manaus, 2009.

DA CUNHA, T.A. **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Floresta Amazônica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DA CUNHA, T.A.; CAVALLI, J.P.; FINGER, C.A. Relação entre alongamento anual da copa e o incremento diamétrico de árvores singulares de *Cedrela fissilis* (Vell). **Ciência Florestal**, Santa Maria, 2012.

DAY, J. Architecture of juvenile *Pennantia corymbosa*, a divaricate shrub from New Zealand. **New Zealand Journal of Botany**, v.36, P.141-148, 1998.

DE MATTOS, R.B. **Produtividade e incremento de *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* (Vell.) e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud., em floresta nativa no rio grande do sul.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DODUEVA, E. V. et al. CLE Peptides Are Universal Regulators of Meristem Development. **Journal of Plant Physiology**. V.59. n.1. 2012. 14-27 p. Department of Genetics and Breeding, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia.

DOS SANTOS, D.L. et al. Morphological and Physiological Responses of *Cedrela Fissilis* Vellozo (Meliaceae) Seedlings to Light. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.49, n.1, 171-182 p. 2006

DURIGAN, G. et al. Sementes e mudas de árvores tropicais. São Paulo: Páginas & letras editora e gráfica, 2. ed. São PauloSP. 65p. 2002.

DURLO, M.A.; SUTILI, F.J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* (Vell.) **Ciência Florestal**, v.14, p.79-89, 2004.

DURLO, M. A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart. **Ciência Florestal**, v.11, n 1, p.141- 149, 2001.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F. da; PINTO, J. R. **Idade e crescimento das árvores.** Comunicações Técnicas Florestais, Brasília, v. 7, n. 1, p. 1-25, dez. 2005.

ESAU, K. **Plant Anatomy**. 2ed. New York, John Wiley and Sons, 1965.

FACCO, R.; DO NASCIMENTO, V.B.; WERLANG, M.K. Variabilidade De temperaturas médias mensais em Santa Maria/RS no período de 2004/2011. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.2, n.4, p.1103 – 1110, 2012.

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

FRITTS, H.C.; SWETNAM, T.W. Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. **Advances in Ecological Research** v.19. p.111-175. 1989.

FOLI, E.G. Modeling growing space requirements for some tropical forest tree species. **Forest Ecology and Management**, v.173, p.79-88. 2003.

GETZIN, S. et al. Scale-dependent competition at the stand level assessed from crown areas. **Forest Ecology and Management**, v.255, p.2478-2485. 2008.

GIELEN, B. Crown architecture of *Populus spp.* is differentially modified by free-air CO₂ enrichment (POPFACE). **New Phytologist**, v.153, p. 91–99, 2002.

GOUDIE, J. W.; POLSSON, K. R.; OTT, P. K. An empirical model of crown skyness for lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* [Engl.] in British Columbia. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 321-331, 2009.

HALLE F, OLDEMAN RAA, TOMLINSON PB. **Tropical trees and forests an architectural analysis**. Springer New, York .1978. 441p.

HEIN, S. et al. Modelling branch characteristics of Norway spruce from wide spacings in Germany. **Forest Ecology and Management**, v.242, 155-164 p. 2007.

HASENAUER, H. Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten- Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. **Fostliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur**, Wien. Band 8, 152 p. 1994

HASENAUER, H.; MONSERUD, R. A. A crown ratio model for Austrian forest. **Forest Ecology and Management**, v. 84, p. 49-60, 1996

HASENAUER, H. Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. **Forest Ecology an Management**, v.96, p.197-206. 1997.

HEMERY, G.E.; SAVILL, P.S.; PRYOR, S.N. Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. **Forest Ecology and Management**, v.215, 2005. p.285-294.

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

IWASAKI-MAROCHI, C. **Anéis anuais de crescimento do cedro (*Cedrela fissilis* - Meliaceae) aplicados à avaliação da taxa de crescimento e dendroclimatologia.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

JANKOWSKY, I. P. et al. **Madeiras brasileiras.** Spectrum, 172p. Caxias do Sul, 1990.

KOHYAMA, T. Growth pattern of *Abies mariesii* saplings under conditions of open-growth and suppression. **Bot. Mag.** v.93, 13-24 p. Tokyo, 1980.

KOHYAMA, T. A functional model describing sapling growth under a tropical forest canopy. **Functional Ecology**, v.5, 83–90. 1991.

KOZLOWSKI, T.T. **Growth and Development of Trees.** Academic Press, v.1, New York, NY, 1971.443 p.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G.A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia.** Ciências Exatas, S. Maria, v.2, n.1, p.171-182, 2001.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos.** Eschborn: GTZ, 343p. 1990.

LEITES, L.P.; ZUBIZARRETA-GERENDIAIN, A.; ROBINSON, A.P. Modeling mensurational relationships of plantation-grown loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v.289, p.455-462. 2012.

LI, S. et al. A stand dynamic model for red pine plantations with different initial densities. **New Forests**, 2010.

LINTUNEN, A.; KAITANIEMI, P. Responses of crown architecture in *Betula pendula* to competition are dependent on the species of neighbouring trees. **Trees**, 24 ed. 411-424 p. Springer-Verlag. 2010.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Nova Odessa: **Plantarum**, 1998. v.1. 352p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Nova Odessa: **Plantarum**, v.2. ed. 2. 2002.

MAGUIRE, D.A.; BENNETT, W.S. Patterns in vertical distribution of foliage in young coastal Douglas-fir. **Canadian Journal Forest Research**, v.26, 1991-2005. 1996.

MAGUIRE, D.A.; MOEUR, M.; BENNETT, W.S. Models for describing basal diameter and vertical distribution of primary branches in young Douglas-fir. **Forest Ecology and Management**, v.63, p.23-55. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 1994.

MÄKELA, A.; SIEVÄNEN, R. Height Growth Strategies in Open-grown Trees. **J. theor Biol.** v.159, p.443-467. 1992.

MARCATI, C. R.; ANGYALOSSY, V.; EVERT, R. F. Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). **IAWA Journal**, v. 27 ed.2, 199-211 p. 2006.

MATTOS, J. R. **Contribuição ao estudo do cedro – *Cedrela fissilis* Vell.** Porto Alegre, RS: Instituto de Pesquisa de recursos Naturais Renováveis “AP”, 1980. 54p. Publicação IPRNR”AP” n.4.

MATTOS, P.P. **Aceleração do crescimento em diâmetro de espécies da Floresta Ombrófila Mista nos últimos 90 anos.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 30, n. 64, p. 319-326, 2010.

MONSERUD, R.A.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and Management**, v.80, 57-80 p. 1996.

MONTERO, G.; CAÑELLAS, I.; RUÍZ-PEINADO, R. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. **Invest. Agr.: Sist. Recur. For**, v. 10, n.1, 2001.

MUTKE, S. et al. Crown architecture of grafted Stone pine (*Pinus pinea* L.): shoot growth and bud differentiation. **Trees**, v.19, p.15-25. 2005

NIKINMAA, E. et al. Shoot growth and crown development: effect of crown position in three-dimensional simulations. **Tree Physiology**. Ed.23. 129-136 p. Heron Publishing. Victoria, Canada. 2003.

NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAS, W. **Applied Linear Statistical Models**, ed.4. New York: McGraw Hill. 1996. 713p.

NUTTO, L. Manejo do crescimento diamétrico de *Araucária angustifolia* (Bert.) O. Ktze. Baseado na árvore individual, **Ciência Florestal**, v.11, n.2, p. 9-25, 2001.

OLIVER, C.D.; LARSON, B.C. **Forest Stands Dynamics**, USA, 1996. 509p.

ORELLANA, E.; KOEHLER, A.B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 229-237. 2008.

OSADA, N.; TAKEDA, H. Branch Architecture, Light Interception and Crown Development in Saplings of a Plagiotropically Branching Tropical Tree, *Polyathia jenkinsii* (Annonaceae). **Annals of Botany**, v.91, 55-63 p. 2003.

O'HARA, K.L.; GERSONDE, R.F. Stocking control concepts in uneven-aged silviculture. **Forestry**, v.77, n.2, 2004.

O'HARA, K.L. The Silviculture of transformation – a commentary. **Forest Ecology and Management**, v.151, 81-86 p. 2001.

O'HARA, K.L.; HASENAUER, H.; KINDERMANN, G. Sustainability in multi-aged stands: an analysis of long-term plenter systems. **Forestry**, v. 80, n. 2, 2007

PENNINGTON, T. D.; STYLES, B. T. Meliaceae. **Flora Neotropica**. New York: New York Botanical Garden, Monograph v.28 p.470, 1981.

PINKARD, E.A.; NIELSEN, W.A. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, v.172, 215-227. 2003.

PRETZSCH, H.; BIPER, P.; DURSKY, J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**, v.162, p.3-21. 2002.

PRETZSCH, H. Models for Forest Ecosystem Management: A European Perspective. Oxford Journals. **Annals of Botany**, v.101, p. 1065–1087. 2008.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yields**, 684 p. 2009.

PRODAN, M. et al. **Mensura Forestal**. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, San José, Costa Rica, 1997.

REITZ, J. R. Meliaceae. **Flora Ilustrada Catarinense**, Itajaí, 1984.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul, Porto Alegre**: Secretaria da Agricultura e Abastecimento. 1988. 525p.

RODRIGUES, B.P. **Caracterização dendrológica e anatômica de *Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae)** p. 1-4. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

SACHS, T. Self-organization of tree form: a model for complex social systems. **Journal of Theoretical Biology**, Department of Plant Sciences, The Hebrew University, Jerusalem, Israel. 2004. ed. 230. p. 197-202.

SANTAROSA, E. Crescimento Sazonal em *Araucaria angustifolia*: Evidências Anatômicas. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 618-620. 2007.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: Ed. da FACOS, 2008, p. 566

SCHNITZLER, A.; CLOSSET, D. Forest dynamics in unexploited birch (*Betula pendula*) stands in the Vosges (France): structure, architecture and light patterns. **Forest Ecology and Management**, v.183, 205-220 p. 2003.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. **Análise de regressão aplicada a Engenharia Florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS, 2009. 294 p.

SHUKLA, R.P.; RAMAKRISHNAN, P.S. Architecture and growth strategies of tropical trees in relation to seccessional satatus. **Journal of Ecology**, v.74, 33-46. 1986.

SKOVSGAARD, J.P.; VANCLAY, J.K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, v. 81, n. 1, 2008.

SOUZA, D.R.; SOUZA, A.L. Emprego do método BD-q de seleção após a exploração florestal em floresta ombrófila densa de terra firme, Amazônia Oriental. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.4, p.617-625, 2005.

SPECTOR, T.; PUTZ, F.E. Crown retreat of open-grown Southern live oaks (*Quercus virginiana*) due to canopy encroachment in Florida, USA. **Forest Ecology and Management**, v.228, 168-176. 2006.

STAMPFER, E. **Solitar dimensionen osterreichischer Baumarten**. Diplomarbeit. Universitat fur Bodenkultur, Wien. 1995. 102p.

SUZUKI, A. Influence of shoot architectural position on shoot growth and branching patterns in *Cleyera japonica*. **Tree Physiology**, v.22. 885-890 p. Heron Publishing. Victoria, Canada. 2002.

THANG, H.C. Forest management system for tropical high forest, with special reference to Peninsular Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v.21, p.3-20, 1987.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. **Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 40, n.7, p. 633-638, 2005.

VOSPERNIKA, S.; MONSERUDB, R.A.; STERBA, H. Do individual-tree growth models correctly represent height:diameter ratios of Norway spruce and Scots pine? **Forest Ecology and Management**, v.260, 1735-1753 p. 2010.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis and transpiration in Sitka spruce: application of a model (Maestro). **Tree Physiol.** v.7, 297-316 p. 1990.

WEBER, K.S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

WEISKITTEL, A.R.; MAGUIRE, D.A.; MONSERUD, R.A. Response of branch growth and mortality to silvicultural treatments in coastal Douglas-fir plantations: Implications for predicting tree growth. **Forest Ecology and Management**, v.251, p.182-194. 2007.

WORBES, M. How to measure growth dynamics in tropical trees: a review. **Iawa Journal**, v.16, n.4. p.337-351. 1995.

WORBES, M. et al. Tree ring analysis reveals age structure, dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. **Forest Ecology and Management**. v.173, p.105-123. 2003.

ZANON, M.L.B. **Crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze diferenciado por dioicia**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ZEIDE, B. Quality as a characteristic of ecological models, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, **Ecological Modelling**. ed.55, v.161, p.161-174. 1991.