

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE BEHLING

**A PRODUÇÃO DE BIOMASSA E O ACÚMULO DE CARBONO EM
POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS
BIOCLIMÁTICAS**

CURITIBA

2014

ALEXANDRE BEHLING

A PRODUÇÃO DE BIOMASSA E O ACÚMULO DE CARBONO EM
POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS
BIOCLIMÁTICAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração de Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ph.D. Carlos Roberto Sanquetta

Co-orientador: Prof. Dr. Ana Paula Dalla Corte

CURITIBA

2014

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Behling, Alexandre

A produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra em função de variáveis bioclimáticas / Alexandre Behling . – 2014
158 f. : il.

Orientador: Prof. Ph.D. Carlos Roberto Sanquetta

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 13/01/2014.

Área de concentração: Manejo Florestal

1. Biomassa vegetal. 2. Plantas – Efeito da radiação. 3. Acácia. 4. Carbono. 5. Teses. I. Sanquetta, Carlos Roberto. II. Corte, Ana Paula Dalla. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.548

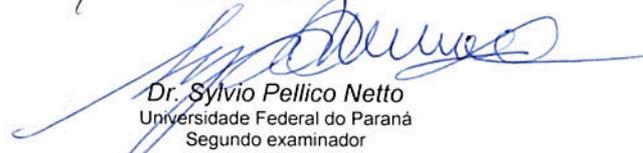


Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da
Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

PARECER
Defesa n.º. 1004

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Alexandre Behling* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**A PRODUÇÃO DE BIOMASSA E O ACÚMULO DE CARBONO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS BIOCLIMÁTICAS**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.


Dr. Bráulio Otomar Caron
Universidade Federal de Santa Maria
Primeiro examinador


Dr. Sylvio Pellico Netto
Universidade Federal do Paraná
Segundo examinador


Dr. Carlos Roberto Sanquetta
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 13 de janeiro de 2014.


Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Jorge Luis Monteiro de Matos
Vice-coordenador do curso

Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico - CAMPUS III - CEP 80210-170 - Curitiba - Paraná
Tel: (41) 360-4212 - Fax: (41) 360-4211 - <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao>



Ao meu pai, Bruno (*in memoriam*).
A minha mãe, Lorena.
Ao meu amor, Juliana.
Ao mestre, Prof. Bráulio.
Ao amigo-irmão, Francis.

AGRADECIMENTOS

Deus, obrigado por todas as bênçãos alcançadas, por sempre revigorar e guiar meu caminho.

Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, sou grato pela oportunidade de estudar nessa instituição de excelência. Aos professores da pós, obrigado pelos conhecimentos transmitidos.

Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, obrigado pela bolsa de estudos, sem ela, seria difícil poder dedicar todo o tempo para com a pesquisa. Ela foi essencial para minha formação.

TANAC S.A., agradeço por manter sua porta aberta, confiar em meu trabalho e oportunizar a realização da pesquisa.

BIOFIX – Laboratório de Excelência em Pesquisas de Fixação de Carbono na Biomassa, obrigado por me acolher, me propor tantos ensinamentos, oportunidades e me incentivar a cada dia a buscar o melhor.

Professor *Sanquetta* e professora *Ana Paula*, orientador e co-orientadora, meus agradecimentos pelas oportunidades oferecidas, pelos caminhos mostrados, confiança, liberdade e por todas as orientações.

Professor *Higa* e Professor *Mochiutti*, obrigado por ceder seus dados e confiar neste estudo.

Laboratório de Agroclimatologia, aos inestimáveis professores *Braulio, Denise e Velci* e também demais colegas, minha gratidão. Não vejo como mensurar o que representam para mim.

Professor *Braulio*, você é o cara! É isso.

Professor *Dimas*, agradeço pelo acolhimento em seu laboratório e por me receber em seu lar sempre tão bem.

Professor *Péllico Netto*, obrigado pelos trabalhos que pareciam complicados, mas que depois de realizados com dedicação se tornaram simples.

Professor *Pedrosa*, minha gratidão pelos ensinamentos e pelas aulas práticas de “costelão”.

Juliana, MEU AMOR, a palavra TUDO se identifica com você.

Marieli, Heloísa, Guilherme, Sérgio, Luana, Gabriel, Renata, obrigado pelas suas dedicações para com essa pesquisa e pela parceria. As suas vontades com o aprendizado me inspiram.

Aos colegas da universidade, aqueles do BIOFIX, do Laboratório de Manejo de Nativas, do Laboratório de Energia de Biomassa Florestal e em especial aos colegas da minha turma de Engenharia Florestal, sintam-se abraçados! Todos vocês tem meu apreço.

Luis Augusto, Augusto Simon, Jackson, Jaílson, Rivaldo e todos aqueles da TANAC S.A., meu agradecimento por oferecerem seu tempo e dedicação para conduzir essa pesquisa.

Minha família, mãe Lorena, Jayme, Valdecir, Jeane, Mônica, Denilson, Sandra, Luiz, Marcos, Janice, Oneila, Valdecir, Jolberto, Cleni, Jéssica, Juarez, Sônia, sobrinhos e sobrinhas. Obrigado por fazerem parte de minha vida.

Aos queridos Inês e Celso que acolheram a mim e a Juliana como filhos em Curitiba, oferecendo sua companhia, carinho e alegria nos momentos de descanso dos estudos.

Amigos de todo o Rio Grande amado, de Tucunduva a Piratini.... Da Argentina também! Obrigado pela torcida, parceria e por me ajudarem a enfrentar a vida!

*O que acho que você deve fazer é aquilo que já fizeste várias vezes:
não desista.*

Augusto Arlindo Simon (2010)

RESUMO

A pesquisa foi conduzida com a espécie acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.), uma das essências florestais de maior importância no Brasil. O estudo a que se propôs teve objetivo de avaliar o efeito de variáveis bioclimáticas na produção de biomassa e no acúmulo de carbono da referida espécie. Foi conduzido em povoamentos comerciais situados nas regiões agroecológicas que concentram os seus plantios no Rio Grande do Sul: Encosta do Sudeste e Serra do Sudeste. A produção de biomassa total e o acúmulo de carbono são correlacionados com as variáveis bioclimáticas: radiação fotossinteticamente ativa interceptada, soma térmica, precipitação acumulada, temperatura média mínima do ar, temperatura média do ar e umidade relativa do ar. A variável com maior correlação, a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, foi selecionada via o método *stepwise* para compor um modelo de predição. Essa variável dependente de vários fatores, que podem ser descritos por meio de variáveis biofísicas, tais como o coeficiente de extinção de luz e o índice de área foliar, que, por sua vez, interage com o ambiente. Dessa maneira, a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, sendo uma variável associada à área de folhas (representada pelo índice de área foliar), bem como a dinâmica da interceptação da luz pelas folhas (denotada pelo coeficiente de extinção de luz), é influenciada pelas condições do ambiente em que as plantas são cultivadas e também pela própria estrutura da planta (caracterizada pelas mudanças morfométricas e morfológicas das folhas). Assim, ela é uma variável que tem grande chance de trazer boas respostas quanto à predição da biomassa e do acúmulo de carbono em diversas situações em que as plantas são cultivadas. Nesse sentido, a produção de biomassa ou o acúmulo de carbono (Y) de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada acumulada pelas folhas (RFA_{iac}) e da eficiência com que a ela converta essa energia radiante em fotoassimilados (ϵb), por meio do processo fotossintético. O modelo resultante, $Y = \epsilon b RFA_{iac} + \epsilon i$, demonstrou-se apropriado para a predição da biomassa e do acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra, revelando-se estável quanto às estatísticas de ajuste e resultados dos coeficientes quando testados em diferentes conjuntos de dados.

Palavras-chave: Radiação fotossinteticamente ativa. Índice de área foliar. Coeficiente de extinção de luz. *Acacia mearnsii*.

ABSTRACT

This research was conducted with black wattle (*Acacia mearnsii* De Wild.), one of the most important forest species in Brazil. This paper had the objective of assessing the effects of bioclimatic variables on biomass production and carbon accumulation of the aforementioned species. An experiment was conducted on commercial stands located on agroecological regions in which plantations of black wattle are concentrated, in the state of Rio Grande do Sul: Southeastern Slope and Southeastern Mountain Range. Biomass total production and carbon accumulation were correlated with the following bioclimatic variables: intercepted photosynthetically active radiation, thermic sum, accumulated precipitation, mean air minimum temperature, air mean temperature and air relative humidity. The variable which showed higher correlation the intercepted photosynthetically active radiation, was selected by the stepwise method to compose a prediction model. This variable depends on several factors, which can be described by biophysical variables, such as light extinction coefficient and leaf area index, which, in turn, interact with the environment. Thus, intercepted photosynthetically active radiation, being a variable associated with leaf area (represented by leaf area index), as well as leaf light interception dynamics (denoted by light extinction coefficient), is influenced by environmental conditions in which plants are grown as well as plants structure (characterized by leaves morphometric and morphological changes). Therefore, this variable has a great chance to come up with good answers for biomass production and carbon accumulation in different environmental conditions in which plants are cultivated. In accordance to this, biomass production and carbon accumulation (Y) of a plant depends on the amount of photosynthetically active radiation intercepted by its leaves (intPARac) and its conversion efficiency (ϵ_b) of radiant energy into photoassimilates, by its photosynthetic process. The resulting model, $Y = \epsilon_b \text{intPARac} + \epsilon_i$, demonstrated itself to be appropriate for biomass production and carbon accumulation prediction for black wattle stands, revealing to be stable by its fitting statistics and results obtained when used with another database.

Keywords: Photosynthetically active radiation. Leaf area index. Light extinction coefficient. *Acacia mearnsii*

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DOS COEFICIENTES DO MODELO PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA DE FOLHAS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	41
TABELA 2 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DOS COEFICIENTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + e_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	43
TABELA 3- ANÁLISE DE COVARIÂNCIA ENTRE OS AJUSTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + e_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	45
TABELA 4 - ESTATÍSTICA DO AJUSTE DO MODELO $AF = B_1 MSF + e_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	47
TABELA 5 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA ÁREA DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	48
TABELA 6 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAR AS MÉDIAS DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	49
TABELA 7 - TESTE F PARA IDENTIFICAR O GRAU DA EQUAÇÃO DAS TENDÊNCIAS DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS EM FUNÇÃO DA IDADE DO POVOAMENTO DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	50
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO HORIZONTE SUPERFICIAL DO SOLO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA SITUADOS NOS MUNICÍPIOS DE CRISTAL E PIRATINI, NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	51
TABELA 9 - CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	52
TABELA 10 - VALORES DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, RIO GRANDE DO SUL E ASSOCIADOS À IDADE DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA AMOSTRADOS.....	55

TABELA 11 - CORRELAÇÃO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS COM A ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	55
TABELA 12 - ESTATÍSTICA DE AJUSTE PARA OS MODELOS OBTIDOS PELO MÉTODO <i>STEPWISE</i> PARA ESTIMATIVA DA ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.....	57
TABELA 13 - CORRELAÇÃO DOS TEORES DE ARGILAS COM OUTROS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO OBSERVADO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	58
TABELA 14 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA REGRESSÃO AJUSTADA COM VARIÁVEL <i>DUMMY</i> (D) DA ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ACUMULADA (RGAC) E DOS TEORES DE FÓSFORO (P) E ARGILA EM DO SOLO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	61
TABELA 15 - VALORES DE ÁREA FOLIAR OBSERVADOS POR MOCHIUTTI (2007) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA E ESTIMADOS PELA EQUAÇÃO OBTIDA NO PRESENTE TRABALHO, A QUAL LEVA EM CONSIDERAÇÃO A RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ACUMULADA (RGAC) E OS TEORES DE FÓSFORO (P) E ARGILA, OU SEJA: $AF = 20,0836 + 0,0004 RGAC + 1,4799 P - 0,3561 ARG$	61
TABELA 16 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ AO LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA (7 ANOS) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	72
TABELA 17 - TESTE <i>t</i> PARA COMPARAÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA COM MÉDIAS APRESENTADAS NA LITERATURA.....	72
TABELA 18 - TESTE <i>t</i> PARA COMPARAÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA COM MÉDIAS APRESENTADAS NA LITERATURA.....	73
TABELA 19 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	74
TABELA 20 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAR AS MÉDIAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	75
TABELA 21 - TESTE F PARA IDENTIFICAR O GRAU DA EQUAÇÃO PARA DESCREVER AS TENDÊNCIAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL	77

TABELA 22 - CORRELAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (K) COM A ÁREA FOLIAR (AF), ALTURA TOTAL (h), VOLUME DE COPA (vc), BIOMASSA DE GALHOS (BG), BIOMASSA DE FOLHAS (BF), BIOMASSA TOTAL (BT) E DIÂMETRO DE COPA (dc) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	80
TABELA 23 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ AO LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA (7 ANOS) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	93
TABELA 24 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA ENTRE OS VALORES DE EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA OBTIDOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	97
TABELA 25 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA PARA DIVERSAS ESPÉCIES.....	98
TABELA 26 - COEFICIENTES AJUSTADOS DO MODELO $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij} \ln(dap) + b_{ij} \ln(h) + \varepsilon_i$ OBTIDOS PELO AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA POR COMPARTIMENTO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	119
TABELA 27 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DO MODELO $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij} \ln(dap) + b_{ij} \ln(h) + \varepsilon_i$ OBTIDOS PELO AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA POR COMPARTIMENTO E TOTAL EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	120
TABELA 28 - ESTATÍSTICA DOS MODELOS OBTIDOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA TOTAL (BT) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	123
TABELA 29 - ESTATÍSTICA DOS MODELOS OBTIDOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA (B) DO FUSTE EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....	124
TABELA 30 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO TEOR DE CARBONO (%) POR COMPARTIMENTO DA BIOMASSA LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA (7 ANOS) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	129

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - TENDÊNCIAS DOS AJUSTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA DE FOLHAS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....43
- FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS POR MEIO DE AJUSTES DE MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA DE FOLHAS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....44
- FIGURA 3 - TENDÊNCIA DO AJUSTE E RESÍDUOS OBTIDOS POR MEIO DE AJUSTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....46
- FIGURA 4 - TENDÊNCIAS DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....50
- FIGURA 5 - VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS (FIGURAS A ESQUERDA) E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS (FIGURAS A DIREITA) DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ACUMULADA (R_{gac}) E DOS TEORES DE FÓSFORO (P) E ARGILA DO SOLO.....60
- FIGURA 6 - MENSURAÇÃO DA BIOMASSA DE FOLHAS, ÁREA FOLIAR EM RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICAMENTE ATIVA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.....67
- FIGURA 7 - ANÁLISE DAS MÉDIAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE MÉDIAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA MINÚSCULA NA VERTICAL E MAIÚSCULA NA HORIZONTAL, NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE PELO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE.....76
- FIGURA 8 - TENDÊNCIAS DO ÍNDICE ÁREA FOLIAR (A E B), VALORES MÉDIOS DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (C), SENDO QUE MÉDIAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE PELO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE, TENDÊNCIA DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (D), RELAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (E) E RELAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA E O ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (F) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....77
- FIGURA 9 – ANÁLISE DE MÉDIAS POR MEIO DO TESTE t PARA COMPARAR VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM

POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA AO LONGO DO CICLO DE CULTIVO. MÉDIAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA NA COLUNA NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE PELO TESTE DE t A 5% DE PROBABILIDADE.....79

FIGURA 10 - CORRELAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ COM O ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (A), ÁREA FOLIAR (B), BIOMASSA DE FOLHAS (C), VOLUME DE COPA (D), BIOMASSA DE GALHOS (E), ALTURA (F), BIOMASSA TOTAL (G) E DIÂMETRO DE COPA (H) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....81

FIGURA 11 - MENSURAÇÃO DA BIOMASSA, ÁREA FOLIAR EM RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA. SEPARAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DA BIOMASSA (A), PESAGEM DA BIOMASSA DE FOLHAS (B), PESAGEM DA AMOSTRA DE FOLHAS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE (C), SECAGEM DA AMOSTRA (D), FOLHA ESTENDIDA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA FOLIAR (E), INTEGRADOR DE ÁREA FOLIAR (F), INSTALAÇÃO DOS PONTOS DE LEITURAS DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (A 30 CM DE ALTURA DA SUPERFÍCIE) (G), LEITURAS DA RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA (H).....90

FIGURA 12 - ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE DURANTE O CICLO DE CULTIVO DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NOS MUNICÍPIOS DE CRISTAL (DIREITA) E PIRATINI (ESQUERDA) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....94

FIGURA 13 - CORRELAÇÃO ENTRE A BIOMASSA TOTAL (INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO MÉDIOS) COM A RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....95

FIGURA 14 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA TOTAL OBTIDA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL....96

FIGURA 15 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA DE FLORES E FRUTOS (A e B), FOLHAS (C e D), GALHOS (E e F) E DO FUSTE (G e H) OBTIDA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE: RFA_{iac} = RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA, BFF_a = BIOMASSA DE FOLHAS ACUMULADA, BFa = BIOMASSA DE FOLHAS ACUMULADA, BGa = BIOMASSA DE GALHOS ACUMULADA E BMC = BIOMASSA DO FUSTE ACUMULADA..... 101

FIGURA 16 - PARTIÇÃO DA BIOMASSA AO LONGO DO CICLO DE CULTIVO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....102

FIGURA 17 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA TOTAL, FUSTE, GALHO, FOLHAS E FLORES + FRUTOS, OBTIDAS POR MEIO DE AJUSTAMENTO INDEPENDENTE (A) E SIMULTÂNEO (B) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE: R_{Fiac} = RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA E B_a = BIOMASSA ACUMULADA.....103

FIGURA 18 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA TOTAL E DA COPA, OBTIDAS POR MEIO DE AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....104

FIGURA 19 - TENDÊNCIA DO AJUSTE E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA TOTAL (BT) E DO FUSTE (BF) EM RELAÇÃO A BIOMASSA ESTIMADA POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....125

FIGURA 20 - EQUAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA TOTAL, FUSTE E COPA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL.....127

SUMÁRIO

1	ASPECTOS GERAIS.....	16
1.1	INTRODUÇÃO.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	A CULTURA DA ACÁCIA NEGRA.....	21
2.2	O CRESCIMENTO DA FLORESTA, AS VARIÁVEIS BIOFÍSICAS E BIOCLIMÁTICAS.....	23
2.3	A BUSCA POR MODELOS COM MAIOR CAPACIDADE GENERALISTA.....	28
3	A ÁREA FOLIAR DA ACÁCIA NEGRA AO LONGO DE SEU CICLO DE CULTIVO.....	34
3.1	INTRODUÇÃO.....	34
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.3	ORIGEM DOS DADOS.....	36
3.4	TRATAMENTO DOS DADOS.....	38
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
3.5.1	Relação entre o peso seco de folhas e área foliar.....	41
3.5.2	Variação da área foliar da acácia negra ao longo do ciclo de crescimento e local de plantio.....	48
3.5.3	Relação entre os atributos químicos do horizonte superficial do solo com a área foliar.....	51
3.5.4	Relação dos elementos meteorológicos com a área foliar.....	54
3.5.5	Relação entre os atributos químicos do horizonte superficial do solo e elementos meteorológicos com a área foliar.....	57
3.6	CONCLUSÕES.....	62
4	ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ AO LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA.....	63
4.1	INTRODUÇÃO.....	63
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	64
4.3	ORIGEM DOS DADOS.....	65
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.5	CONCLUSÕES.....	71

5	EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA NA CULTURA DA ACÁCIA NEGRA.....	84
5.1	INTRODUÇÃO.....	84
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	85
5.3	ORIGEM DOS DADOS.....	86
5.4	TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	90
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
5.6	CONCLUSÕES.....	104
6	A PRODUÇÃO DE BIOMASSA E O ACÚMULO DE CARBONO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS BIOCLIMÁTICAS.....	105
6.1	INTRODUÇÃO.....	105
6.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	107
6.3	ORIGEM DE DADOS DE BIOMASSA PARA CONSTRUÇÃO DOS MODELOS (BASE DE DADOS 1).....	108
6.4	ORIGEM DE DADOS DE TEOR DE CARBONO, RELAÇÃO BIOMASSA DE FOLHAS / ÁREA FOLIAR, COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ E BIOMASSA (BASE DE DADOS 2).....	111
6.5	ORIGEM DOS DADOS METEOROLÓGICOS.....	114
6.6	TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	114
6.7	MODELOS DE PREDIÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E DO ACÚMULO DE CARBONO GERADOS PELO PROCEDIMENTO <i>STEPWISE</i>	116
6.7.1	Avaliação da melhor equação.....	117
6.7.2	Desempenho dos modelos e validação das equações.....	117
6.8	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	117
6.9	CONCLUSÕES.....	129
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
	REFERÊNCIAS.....	133

1 ASPECTOS GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

Os estudos de biomassa florestal têm sido realizados com propósitos variados, como, por exemplo, para a quantificação de ciclagem de nutrientes, fins energéticos, estudos de fixação de carbono e propriamente para avaliação do crescimento da floresta. Em qualquer dos casos referidos, eles são de grande importância para a tomada de decisões de gestão de recursos florestais.

Nesse sentido, a avaliação do crescimento em biomassa é importante para o planejamento da indústria, que depende da matéria-prima florestal e também para silvicultores que dependem da venda da biomassa. A informatização de processos de suporte a decisões, em especial pelo emprego de modelos matemáticos, pode minimizar riscos ambientais, reduzir custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade ao planejamento agrícola. Schneider (1993) destaca que as estimativas do crescimento de uma árvore ou do povoamento são essenciais para o planejamento de um empreendimento florestal, uma vez que várias decisões dependem dela.

Desse modo, uma das tendências da Ciência Florestal é gerar modelos de simulação de crescimento que, além de prever rendimentos em função das condições em que as plantas se desenvolvem, permite analisar fatores que limitam o seu crescimento. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento de modelos matemáticos que simulam a produção de biomassa torna-se uma importante ferramenta para o planejamento das atividades florestais, tanto para empresas como para produtores que praticam a atividade silvicultural.

Nesse sentido, há interesse na busca de modelos que aumente sua capacidade generalista, ou seja, modelos que resultam em adequado desempenho em função de uma série de condições do ambiente. Em muitos casos, estudos têm reportado a geração de parâmetros e coeficientes que expressam numericamente o crescimento e produção das culturas em função de variáveis biofísicas, bioclimáticas e até mesmo do solo. Para tanto, tem-se como premissa que o envolvimento dessas

variáveis aumente a capacidade generalista dos modelos, uma vez que a “causa ambiental” no “efeito biológico” está intrinsecamente modelada, demonstrando-se, portanto, conceitualmente mais segura no sentido de extrapolações.

A interceptação da luz é o primeiro passo para desencadear uma sequência de eventos da fotossíntese, que resultam no crescimento da floresta. Assim, todo o processo fotossintético é resultado de uma cadeia de interações complexas, que ocorrem no dossel e de forma global, representado pelo sistema solo-floresta-atmosfera. As interações que ocorrem no dossel estão associadas à interceptação da radiação fotossintética, que, por sua vez, podem ser representadas por variáveis biofísicas, tais como o índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz.

Por outro lado, a relação entre o crescimento e a interceptação da luz pode ser quantitativamente determinada pela eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelas folhas em biomassa produzida. Desse modo, a produção de biomassa de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada pelas folhas e da eficiência com que a espécie converta essa energia radiante em fotoassimilados, por meio do processo fotossintético.

Nesse sentido, a radiação fotossinteticamente ativa interceptada vem se destacando nas pesquisas nos últimos 50 anos, constituindo, assim, uma das variáveis bioclimáticas mais importante. Monteith (1994) realça a produção de biomassa de uma cultura em função de três termos: disponibilidade do recurso por unidade de área cultivada; eficiência de captura do recurso pela cultura e taxa de produção de matéria seca por unidade de recurso capturado. Com isso, o autor sugere um modelo simples de crescimento, baseado na relação entre produção de biomassa e radiação fotossinteticamente interceptada.

A quantidade de radiação interceptada é um fator determinante na produtividade de uma cultura. A conversão dessa radiação em matéria seca depende da fotossíntese, que, por sua vez, varia conforme a espécie, a qualidade e quantidade da radiação, a temperatura do ar e a fração de carbono fixado, não consumido na respiração conforme destacam Gallagher e Biscoe (1978). Entretanto, também há de se considerar outras variáveis que influenciam no crescimento de uma floresta, conforme Cromer (1984), o incremento da biomassa depende de fatores edafoclimáticos, tais como: temperatura, radiação solar, disponibilidade de água e nutrientes.

A influência das condições ambientais está diretamente relacionada com a eficiência do desenvolvimento das plantas (CARON *et al.*, 2003). Nesse sentido, trabalhos têm sido desenvolvidos buscando relacionar tais fatores com o crescimento da floresta, destacando-se entre eles a precipitação e a temperatura do ar. Entretanto, essas relações na maioria das vezes são complexas, pois as variáveis meteorológicas podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas sob diferentes formas nas diversas fases do ciclo da cultura.

A previsão do crescimento da planta requer o conhecimento de sua resposta ao ambiente (HUANG, 1993). Conforme Dourado Neto (1998) o modelo de crescimento e desenvolvimento de uma cultura, tem como objetivo obter informações de algumas interações planta x ambiente, maximizando, assim, a utilização de recursos naturais para uma dada condição de cultivo.

Dessa maneira, modelos que envolvem variáveis do ambiente e estão relacionadas com o crescimento de uma cultura podem fornecer informações que permitam a tomada de decisões. De acordo com Caron *et al.* (2007), quando esse modelo é utilizado coerentemente, torna-se uma ferramenta importante para técnicos e produtores no planejamento e na avaliação da atividade agrícola. Quando o desempenho de um sistema é representado matematicamente por equações, tem-se então um modelo matemático definindo quantitativamente por hipóteses assumidas sobre o sistema real, permitindo deduzir suas consequências conforme destaca Dourado Neto (1998).

Desde sua introdução no estado do Rio Grande do Sul, em 1918, por Alexandre Bleckmann (SCHNEIDER e TONINI, 2003), o cultivo da acácia-negra tornou-se uma importante atividade econômica, trazendo benefícios para cerca de 40 mil famílias direta e indiretamente por meio das alternativas criadas pela espécie (STEIN e TONIETTO, 1997). Simon (2005) destaca que a acácia-negra é a principal fonte de casca para a indústria de taninos vegetais em nível mundial, utilizados principalmente no curtimento de peles. A madeira dessa espécie apresenta qualidade para a produção de celulose e papel, que atualmente constitui seu principal destino (STEIN e TONIETTO, 1997).

A elaboração de modelos matemáticos que simulam a produção de biomassa em função de variáveis bioclimáticas se constitui numa importante ferramenta para o planejamento das atividades florestais com esta espécie, tanto para empresas que comprem matéria-prima e cultivam a acácia-negra, como para

produtores que vendem a biomassa do fuste (casca + madeira) para fins diversos. A partir disso, planejamentos da produção poderão ser feitos, até mesmo a avaliação da produção em locais não tradicionais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a dependência da produção de biomassa e do acúmulo de carbono em função de variáveis bioclimáticas.

Os objetivos específicos foram:

- a) Analisar a área foliar em povoamentos de acácia negra ao longo do ciclo de cultivo;
- b) Avaliar o índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz em povoamentos de acácia negra ao longo do ciclo de cultivo;
- c) Determinar a eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada em biomassa na cultura da acácia negra;
- d) Desenvolver e validar equações de simulação de produção de biomassa e acúmulo de carbono em plantios de acácia-negra, tomando como variáveis independentes a temperatura média, média máxima, média mínima do ar, umidade relativa do ar, soma térmica, precipitação e radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos foram desenvolvidos quatro estudos, sendo os três primeiros destinados a produzir e discutir variáveis para o cumprimento do quarto. A apresentação do trabalho foi organizada em seções e capítulos, de forma a facilitar a compreensão e discussão dos resultados de cada estudo.

Na seção 1 estão a introdução, os objetivos e a revisão da literatura. A seção 2 é composta pelos estudos realizados e foi dividida em quatro capítulos, organizados na forma de artigo, constando de introdução, material e métodos, resultados e discussão, e conclusões. Por fim, na seção 3, são apresentadas as discussões e conclusões gerais da pesquisa, e as referências citadas em todas as seções.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA ACÁCIA NEGRA

A espécie *Acacia mearnsii* De Wild pertence à família Fabaceae, o nome comum é acácia negra e faz referência à coloração escura da casca e folhagem (KANNEGIESSER, 1990). Marchiori (1997) descreveu a espécie como árvore de porte médio, de copa arredondada e casca castanho-escura, rica em tanino. É originária do sudeste da Austrália, ocorrendo principalmente entre as latitudes 34 a 44° sul e longitudes de 140 a 151° leste de Greenwich, e em altitudes que variam do nível do mar até 1.070 m (BOLAND *et al.*, 1984).

No Brasil, a espécie foi introduzida no estado do Rio Grande do Sul por Alexandre Bleckmann em 1918, especificamente no município de São Leopoldo. Porém, os primeiros plantios comerciais foram efetuados por Julio Lohman dez anos mais tarde no município de Estrela (OLIVEIRA, 1960, 1968; SCHNEIDER e TONINI, 2003) e o resultado disso motivou o aumento das plantações em 1930. Em 1941 iniciou-se a utilização comercial da espécie com a criação da Sociedade Extrativa de Tanino de Acácia Ltda – SETA (MÜLLER, 2006) e em 1948 foi fundada a TANAC S.A., sendo a maior empresa brasileira na atividade, líder do mercado interno e grande exportadora (TANAC, s.d).

Desde então, a cultura da acácia negra passou a desempenhar um importante papel no setor florestal no estado do Rio Grande do Sul, onde se concentra exclusivamente os plantios. Schneider *et al.* (2000) destacam que é uma sólida atividade econômica e que tem trazido benefícios e prosperidade para vários municípios e milhares de famílias. Para se ter uma ideia, a espécie é cultivada em mais de quarenta municípios (SCHNEIDER e TONINI, 2003) e por aproximadamente 40 mil famílias (STEIN e TONIETTO, 1997; SCHNEIDER e TONINI, 2003).

O cultivo da espécie atinge área superior a 174 mil hectares (ABRAF, 2011), ficando somente atrás dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. As plantações ocorrem nos locais próximos aos centros consumidores de madeira e casca, concentrando-se na encosta da Serra Gaúcha, Depressão Central e Serra do Sudeste (DEDECEK *et al.*, 1998; MÜLLER, 2006; MORA, 2002). A maior parte dos plantios é conduzida em

minifúndios, ou seja, por pequenos e médios produtores (HIGA *et al.*, 1998; MÜLLER, 2006), que detêm aproximadamente 60% das plantações (FILGUEIRAS, 1990; MÜLLER, 2006). Stein e Tonietto (1997) e Simon (1999) destacam que o programa anual de plantio oscila entre 15 a 20 mil hectares.

Nas pequenas propriedades a acácia negra é cultivada em sistemas agrossilvipastoris, o que de acordo com Schneider *et al.* (2001) ajudou na aceitação do seu cultivo. Nos primeiros anos, enquanto as árvores são pequenas, é realizado consórcio com milho, melancia, mandioca e outras culturas e mais tarde após o fechamento do dossel, a área é aproveitada para o pastoreio, ou seja, integração com a pecuária (GRANJA, 1979; FLEIG, 1993; CONTO *et al.*, 1997, SCHNEIDER *et al.*, 2001; MÜLLER, 2006). A rotação se estende entre 7 a 9 anos de idade (CALDEIRA *et al.*, 2002), quando a floresta é colhida e se exporta todo o tronco (madeira e casca).

De acordo com Higa (1996) a produção aos oito anos é de 200 m³ ha⁻¹ de madeira e 16 t ha⁻¹ de casca, já Stein e Tonietto (1997) relatam uma produção de madeira de 175 st ha⁻¹ e casca de 15,8 t ha⁻¹ e Mora (2002) cita a de madeira na ordem de 22,8 a 31,4 st ha⁻¹ ano⁻¹ e casca de 10,5 a 19 t ha⁻¹ ano⁻¹. Schneider *et al.* (1999) destacam que a rentabilidade dessa cultura é superior a de muitas essências, embora o rendimento quantitativo de madeira seja inferior. Segundo Fleig (1993), aos sete anos é a idade na qual o produtor detém a maior renda líquida e conforme Rodigheri e Graça (2001), nesse período a taxa interna de retorno é de 46,01%, valor presente líquido de R\$ 2.400,35 por hectare e valor equivalente anual de R\$ 429,99 por hectare.

O papel da cultura da acácia negra vai além do socioeconômico, pois oferece uma alternativa de uso do solo viável econômica e ecologicamente (FLEIG, 1993). Segundo Kannegiesser (1990) a espécie é eficiente fixadora de nitrogênio, possui capacidade de adaptação a uma variedade de ambientes e habilidade de colonizar áreas que tenham perdido quase todo o solo superficial. Também contribui para a fertilização do solo, por meio da fixação de nitrogênio atmosférico ao solo, que de acordo com Salas (1987), Franco e Döberiner (1994) e Auer e Silva (1992), pode chegar a 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Além disso, permite a coexistência de outras espécies vegetais no subbosque e isso favorece o estabelecimento de espécies da fauna silvestre (MÜLLER, 2006). Apesar de que as florestas são conduzidas com fins econômicos, durante seu ciclo realizam a fixação de carbono em sua biomassa,

contribuindo assim para a melhoria da qualidade do ar (CALDEIRA *et al.*, 2003; MÜLLER, 2006).

A cultura da acácia negra também é de fundamental importância para indústrias de tanino, chapas e celulose. A casca é matéria prima para a extração do tanino e, de acordo com Simon (2005), essa espécie é a principal fonte de matéria prima em nível mundial para a indústria de taninos. O tanino é utilizado principalmente no curtimento de couro, mas também é empregado em outros fins, tais como: na produção de tintas, inibidores de corrosão, promotores de fluxo de líquidos em tubos, produtos farmacêuticos, adesivos, floculantes (SEIGER, 2002), na clarificação de cervejas e vinhos (FOWLER *et al.*, 2000). O teor médio de tanino na casca em povoamentos com sete anos é de 27% (MAESTRI *et al.*, 1987).

A madeira é fonte para vários usos. Além do emprego tradicional como lenha e carvão, é principalmente utilizada na fabricação de celulose e papel (RESENDE *et al.*, 1992), devido a boa qualidade para tal fim (MARTINS *et al.* 1983; RESENDE *et al.*, 1992; STEIN e TONIETTO, 1997). Muneri (1997), comparando a produção de celulose pelo processo *kraft* entre acácia negra e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, observou que para cada metro cúbico de madeira a produção de celulose é de 323 e 224 kg, respectivamente. As árvores mortas, bem como a ponteira dos troncos, são aproveitadas para lenha e produção de carvão, considerando, o alto poder calorífico (KANNEGIESSER, 1990).

2.2 O CRESCIMENTO DA FLORESTA, AS VARIÁVEIS BIOFÍSICAS E BIOCLIMÁTICAS

O crescimento de uma determinada floresta é o resultado do saldo de biomassa acumulada pela fotossíntese. Assim, a dependência de processos fotossintéticos em relação ao ambiente é de interesse para profissionais ligados à grande área das Ciências Agrárias, pois a produtividade vegetal e, em consequência, o rendimento de um cultivo, dependem das taxas fotossintéticas em um ambiente (TAIZ e ZEIGER, 2004).

A interceptação da luz é o primeiro passo para desencadear uma sequência de eventos da fotossíntese que resultam na produção da biomassa florestal. Assim, todo o processo fotossintético é resultado de uma cadeia de interações complexas que ocorrem no dossel e de forma global, representado pelo sistema solo-floresta-atmosfera. As interações que ocorrem no dossel estão associadas à interceptação da radiação fotossintética, que, por sua vez, podem ser representadas por variáveis biofísicas, tais como o índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz.

Landsberg (2003) destaca que para entender o crescimento florestal é preciso caracterizar os processos responsáveis por tal efeito, o que permite identificar os mecanismos que causam tais respostas, estando entre as principais variáveis a serem avaliadas, a dinâmica da radiação no dossel e o índice de área foliar. Stape et al. (2004) complementaram que as interações entre o meio e as plantas faz parte da ecofisiologia florestal e visa compreender o crescimento da floresta por meio do conhecimento dos processos que o governa, permitindo, assim, identificar o seu manejo em sintonia com o uso dos recursos naturais.

Dentre esses recursos, a energia radiante, ou a radiação fotossinteticamente ativa, constitui uma fonte energética essencial para o crescimento e produção de qualquer espécie cultivada. De modo geral, a radiação fotossintética interceptada por uma cultura é uma função da radiação solar incidente nas plantas, do índice de área foliar e do coeficiente de extinção da luz, que, por sua vez, expressa a influência das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel na atenuação da luz (VARLET-GRANCHER *et al.*, 1989).

A atenuação da radiação na cobertura vegetal, denotada pelo coeficiente de extinção de luz, depende, principalmente, da densidade da folhagem, do arranjo das folhas no interior da vegetação, arquitetura do dossel, ângulo existente entre a folha e a radiação incidente e do coeficiente de extinção (MONTEITH e UNSWORTH, 1990). A densidade das folhas, arquitetura do dossel e arranjo das plantas pode ser quantitativamente determinada por meio do índice de área foliar, que foi definido por Watson (1947) como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo ($m^2 m^{-2}$), sendo, portanto, adimensional.

Essa variável é determinante nos processos produtivos, estando relacionada com a interceptação da radiação fotossintética, troca de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, evapotranspiração, superfície assimiladora de dióxido de carbono, produtividade da cultura e estratégias da planta no seu processo evolutivo.

Também denota grande importância para vários modelos de produção primária, modelos globais de clima, hidrologia, biogeoquímica e ecologia (NORMAN e CAMPBELL, 1989; LANG e McMURTRIE, 1992; CARUZZO e ROCHA, 2000; BRÉDA, 2003; XAVIER e VETTORAZZI, 2003; MÜLLER *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2005).

A área foliar é uma variável do indicativo de produtividade, pois o crescimento das plantas (quando as condições de nutrição do solo, disponibilidade de água e temperatura não são fatores limitantes) depende da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e da eficiência de utilização dessa energia no processo fotossintético para produção de fitomassa (MONTEITH, 1965, 1977). Desse modo, a área foliar é uma das características biofísica da planta mais importante, porque é ela quem determina a interceptação da energia luminosa para a realização da fotossíntese, estando, portanto, relacionada com o crescimento e produção (LINHARES *et al.*, 2000; VILLA NOVA *et al.*, 2003; XAVIER e VETTORAZZI, 2003).

A concepção da relação entre o crescimento e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi desenvolvida por Montheith (1965, 1972, 1977), em experimentos com culturas agrícolas. Mais tarde, tal concepção foi aplicada em espécies arbóreas. Assim, por esse método, o crescimento florestal é proporcional à radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelas folhas e multiplicada pela eficiência de conversão (BINKLEY *et al.*, 1994). Desse modo, a radiação fotossinteticamente ativa interceptada tem sido uma das variáveis bioclimáticas mais importantes nos estudos de crescimento, sendo alvo de pesquisas de diversos autores: Linder (1985); Cannel (1989); Wang *et al.* (1991); Saldarriaga e Luxmoore (1991); Landsberg e Hingston (1996); Dewar (1996); Landsberg e Waring (1997); Kiniry (1998); McCrady e Jokela (1998); Gower *et al.* (1999); Sinclair e Muchow (1999); Mariscal *et al.* (2000); Stape (2002); Stape *et al.* (2008); Caron *et al.* (2012); Caron *et al.* (2013b) e Campoe *et al.* (2013).

A associação da produção da biomassa com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, proposta por Montheith (1965, 1972, 1977), é um dos modelos mais simplificados para a estimativa do crescimento e da produção. Ela tem sido a base teórica em modelos ecofisiológicos que levam em conta a interceptação da radiação fotossintética pelas folhas (WANG e JARVIS, 1990; LANDSBERG e WARING, 1997), de grande importância para estudos relacionados

à ecofisiologia florestal (BINKLEY *et al.*, 2004), e pode ser utilizada para diversas aplicações, como indicam os trabalhos realizados por Stape (2002) e Stape, Binkley e Ryan, (2004a) em plantios de eucalipto no Brasil.

Entretanto, também há outras variáveis bioclimáticas que influenciam no crescimento e desenvolvimento de uma floresta. Vários estudos já foram conduzidos e tratam de identificar as relações que ocorrem, como por exemplo, com a precipitação e temperatura do ar, com o crescimento das culturas. Em espécies agrícolas, essas pesquisas são frequentes, enquanto que em espécies florestais há poucos estudos (SANDS e LANDSBERG, 2002).

Allen e Albaugh (1999) destacam que em plantios de *Pinus taeda* L. a baixa disponibilidade de água e temperaturas extremas afetam negativamente a área foliar, conseqüentemente reduzem a interceptação e o uso da radiação. Desse modo, a produção tende a ser menor, já que ela depende da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

Stape (2002) concluiu que a precipitação está extremamente relacionada com a produção do eucalipto, a qual explicou 80% da variação do incremento médio anual. Outros trabalhos, tais como de Benson *et al.* (1992), Snowdon e Benson (1992), Samuelson *et al.* (2004) e Williams e Gresham (2006), em ensaios com irrigação, também observaram a dependência da produção em relação à disponibilidade de água no solo.

Outros autores (SANDS e MULLIGAN, 1990; BLAKE e TSCHALPLINSKI, 1992; LANDSBERG, 2003) destacam que a água é um dos fatores mais limitante à produtividade florestal por controlar a abertura e o fechamento estomático, absorção de nutrientes do solo e por ser o meio onde ocorrem as reações químicas e bioquímicas da fotossíntese. De acordo com Binkley *et al.* (2004) uma folha com o suprimento de água adequado, tem condições de fixar mais carbono por unidade de luz interceptada do que uma folha com estresse hídrico e estômatos fechados. Outros estudos, conduzidos com eucalipto, relatam acréscimo na produção primária líquida com o aumento da disponibilidade de água para a floresta, havendo acréscimo na interceptação de luz e na eficiência fotossintética (BINKLEY *et al.*, 2004; RYAN *et al.*, 2010; STAPE *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de uma determinada espécie também depende de outros fatores ambientais e, entre eles, destaca-se a temperatura do ar (HODGES, 1991; YAN e HUNT, 1999; STRECK, 2002; GRAMIG e STOLTENBERG, 2007). A

temperatura do ar afeta as taxas dos processos metabólicos ao agir na atividade do sistema enzimático, de forma a impactar o crescimento da planta, especialmente no balanço de carbono, por meio da influência na fotossíntese, respiração, balanço de energia, transpiração e desenvolvimento do ciclo da planta (LANDSBERG e SANDS, 2011). Além disso, temperaturas extremas, tais como em dias de ocorrência de geada, podem ocasionar danos aos tecidos e interromper o crescimento temporário ou permanente, sendo significativa fonte de estresse abiótico (LARCHER, 2000; LANDSBERG, 2003). Na acácia negra, em plantas com um ano de idade, Caron *et al.* (2011) evidenciaram que mais de 60% das plantas tiveram 100% da área foliar danificada e mais de 31% apresentaram entre 75 a 99% de dano. Mais de 20% das plantas apresentaram no caule entre 75 a 99% de dano. Pouco mais de 16% entre 50 a 75%, 26% entre 25 a 49% e mais de 33% apresentaram menos de 25% de dano. Somente em 3% das plantas não foram observados danos visíveis no caule.

Altas temperaturas podem reduzir a assimilação de carbono da planta, devido ao aumento da transpiração e ao fechamento dos estômatos. Por outro lado, em temperaturas baixas, tais como em dias com ocorrência de geadas, também ocorre redução da atividade fotossintética por certo período de tempo em consequência do congelamento das células (LARCHER, 2000). De acordo com McMaster e Wilhelm (1997), em dias com temperatura abaixo da base não ocorre desenvolvimento ou este é tão pequeno que pode ser considerado desprezível. Do mesmo modo, ocorre quando a temperatura está acima da máxima e entre esses limites há uma faixa ótima, onde o crescimento se dá com maior velocidade.

Nesse contexto, a soma térmica é uma variável que representa o efeito da temperatura do ar sobre o crescimento das plantas (GILMORE e ROGERS, 1958; ARNOLD, 1960). No cálculo dessa variável bioclimática são acumulados os valores de temperatura média diária do ar acima da temperatura base e abaixo da superior, ou seja, dentro dos limites térmicos de uma determinada espécie.

Conforme Ometto (1981), a temperatura basal mínima é o menor valor que aciona os dispositivos metabólicos da planta, de modo que somente estados energéticos acima desse mínimo são propícios ao crescimento. Da mesma forma, também há um nível energético máximo, denotado pela temperatura basal máxima, ou seja, valores energéticos tais que acima desse limite a planta cessa suas atividades metabólicas. Tais limites, determinados pelas temperaturas cardeais,

variam em função do genótipo e do subperíodo de desenvolvimento (STRECK, 2002; STRECK *et al.*, 2003; STRECK *et al.*, 2005).

A soma térmica é um método simples e uma melhor medida de tempo biológico em plantas do que em dias do calendário civil (GILMORE e ROGERS, 1958), e é um índice largamente utilizado para estimativa da duração do ciclo de diversas culturas em virtude da sua simplicidade, apesar das suas limitações (WANG, 1960). Diversos autores (GILMORE e ROGERS, 1958; ARNOLD, 1959; ARNOLD, 1960, BROWN, 1970; McMASTER e WILHELM, 1997) têm relacionado a soma térmica acumulada com o desenvolvimento de plantas, especialmente em culturas agrícolas, mas também em espécies florestais, tais como em mudas de eucalipto por Oliveira *et al.* (2012).

2.3 A BUSCA POR MODELOS COM MAIOR CAPACIDADE GENERALISTA

O crescimento de um ou mais indivíduos de uma floresta é resultado do aumento de suas dimensões num determinado período de tempo, o qual é influenciado pelas características da espécie que interage com o ambiente (PRODAN *et al.*, 1997; VANCLAY, 1999). É uma variável de grande importância e por isso muitos estudos são conduzidos no intuito de conhecer seu comportamento e também criar mecanismos que permitam sua estimativa. Schneider (1993) destaca que as estimativas do crescimento de uma árvore ou do povoamento são essenciais para o planejamento de um empreendimento florestal, uma vez que várias decisões dependem dela.

O crescimento das plantas pode ser representado pela biomassa produzida, já que é uma função do saldo de biomassa acumulada pela fotossíntese. Assim, desenvolver modelos matemáticos que simulam a produção de biomassa torna-se uma importante ferramenta para o planejamento das atividades florestais, tanto para empresas como para produtores que praticam a atividade de silvicultural.

Cromer (1984) destaca que o crescimento da biomassa depende de fatores edafoclimáticos, tais como: temperatura, radiação solar, disponibilidade de água e nutrientes. Nesse sentido, Paulo *et al.* (2002) afirmam que a estimativa de biomassa das florestas é de grande interesse, não só a nível científico, mas também prático,

sendo necessário além de quantificar, ajustar e elaborar modelos matemáticos que sirvam para a predição de biomassa, possibilitando, assim, a tomada de decisão.

Desse modo, há uma tendência da grande área de Ciências Agrárias em gerar modelos de simulação, que além de predizer a produção em função das condições que as plantas se desenvolvem, fornecem a possibilidade de analisar fatores que limitam o seu crescimento. Assim, o emprego de modelos, que simulam o crescimento e desenvolvimento, pode minimizar riscos ambientais, reduzir custos da produção e proporcionar maior sustentabilidade ao planejamento agrícola.

A previsão do crescimento da planta requer o conhecimento das respostas com o ambiente (HUANG, 1993). Conforme Dourado Neto (1998) o modelo de crescimento e desenvolvimento de uma cultura, tem como objetivo obter informações de algumas interações planta e ambiente, maximizando assim a utilização de recursos naturais para uma dada condição de cultivo. Vanclay (1999) aponta que modelos referem-se a um sistema de equações que podem predizer o crescimento e a produção do povoamento florestal sob uma grande variedade de condições e segundo Tomé (1991) devem apresentar duas características importantes: precisão e flexibilidade. Os modelos podem ser classificados em três categorias: empíricos, baseados em processos – mecanicistas e híbridos – combinação do empírico com o mecanicista (KIMMINS *et al.*, 1990; LANDSBERG e WARING, 2011).

Na área florestal, os empíricos, utilizados para estimar o crescimento e produção por meio de variáveis dendrométricas associadas às idades, foram os primeiros a serem utilizados (CLUTTER, 1980), desenvolvidos na Alemanha antes do fim do século XVIII (SPURR, 1952), geram boas respostas (CLUTTER, 1983), são os mais empregados e há muitos estudos sobre eles. Segundo BURKHART (1997), são profundamente práticos e úteis para descrever situações do mundo real e aplicáveis para a resolução de muitos problemas. Portanto, são necessários para o planejamento e manejo econômico dos povoamentos.

Já os modelos mecanicistas, são definidos por Johnsen *et al.* (2001) como representações matemáticas de sistemas biológicos que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos baseados em teorias científicas. De acordo com Sanquetta (1996), eles procuram explicar como funciona um sistema, enfatizando a explicação dos fatos mais que o ajuste e as predições. Nessa modelagem, a luz, temperatura e nutrientes do solo, são

adicionados ao sistema, além de modelar fotossíntese, respiração e distribuição dos fotoassimilados nos compartimentos da biomassa - raízes, caule e folhas (VANCLAY, 1999).

Nos últimos anos houve um grande progresso no uso de modelos florestais baseados em processos, alicerçados pelo avanço da tecnologia computacional (LANDSBERG e GOWER, 1997; ALMEIDA *et al.*, 2003). Assim, vários modelos baseados em processos fisiológicos foram desenvolvidos, a exemplo dos trabalhos de: Pastor e Post (1985), Wang e Jarvis (1990), Weinstein *et al.* (1991), Frunnig e Gower (1992), McMurtrie *et al.* (1992), Alber e Federer, (1992), Comins e McMurtrie, (1993), Landsberg e Waring(1997), Wang e Jarvis (1990), Medlyn (2004), Battaglia *et al.* (2004) e Corbeels *et al.* (2005).

Desde então, uma série de estudos tem sido desenvolvidos com aplicações desses modelos e, em especial, do 3-PG (LAW *et al.*, 2000; LANDSBERG *et al.*, 2001; SANDS e LANDSBERG, 2002; STAPE, 2002; WARING e McDOWELL, 2002; LANDSBERG, WARING e COOPS, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2004; DYE *et al.*, 2004; ESPREY *et al.*, 2004; STAPE *et al.*, 2004; COOPS *et al.*, 2005; FONTES *et al.*, 2006; PAUL *et al.*, 2007; ZHAO *et al.*, 2009; STAPE *et al.*, 2010; CHRISTINA *et al.*, 2011; LANDSBERG e SANDS, 2011). No entanto, as dificuldades encontradas para a utilização deste *software* no Brasil é que ele precisa ser adaptado e validado por inúmeros dados resultantes de pesquisas, principalmente em condições brasileiras, apesar de estudos já terem sido realizados com eucaliptos, tais como os de Almeida *et al.* (2004), Stape *et al.*, (2004), Silva (2006), Borges (2009), Alvares (2011), Londero (2011) e Rascon (2012).

Modelos processuais são mais flexíveis para realizar simulações do crescimento e da produção frente a mudanças ambientais e de manejo quando comparados com os empíricos. Stape *et al.* (2004) conduziram um estudo com eucalipto em locais com variabilidade de precipitação e fez um comparativo entre modelos empíricos e o modelo ecofisiológico 3-PG. Foi observado que o empírico proporcionou boas estimativas em condições ambientais médias, porém, frente a diferenças de precipitação, o ecofisiológico foi mais eficiente.

Entretanto, os modelos baseados em processos ainda levam desvantagem em relação aos empíricos, pois necessitam de muitos recursos para inicializar, explorar, interpretar, demandando tempo, habilidade e multidisciplinariedade de conceitos para utilizá-los (LANDSBERG e COOPS, 1999; LANDSBERG, 2003;

TAYLOR *et al.*, 2009). Passioura (1996) destaca que em alguns casos a sua aplicação tem falhado por serem baseados em suposições não testadas sobre os processos que controlam o crescimento.

Por outro lado, o emprego de modelos baseados em processos contribui para a compreensão e identificação de fatores ambientais que afetam o crescimento, conferindo assim, maior capacidade de predição do crescimento e maior abrangência de aplicação (VANCLAY, 1999; JOHNSEN *et al.*, 2001). Uma importante aplicação desses modelos é na simulação da produtividade potencial em áreas sem histórico da cobertura florestal e em diferentes condições ambientais (ALMEIDA *et al.*, 2002), apesar de que interpolações são sempre mais seguras que extrapolações (VANCLAY, 1999).

Tal aplicação, não é aconselhável para modelos empíricos, pois em função de sua natureza, não se pode esperar sucesso em situações para fora da base de dados originais (PASSIOURA, 1996). Burkhart (1997) destaca que raramente equações de natureza empírica apresentarão bons resultados na ocasião de entrada de novos conjuntos de dados, principalmente para aquelas que foram ajustadas de maneiras complexas, como ocorre com os modelos não lineares.

Taylor *et al.* (2009) destacam que a escolha de qual modelo a ser utilizado na estimativa do crescimento e da produção florestal depende das informações disponíveis para sua calibração, validação, nível de detalhe e acurácia desejada. De acordo com Sanquetta (1996) em qualquer caso também é fundamental a necessidade de serem construídos de acordo com os objetivos do uso especificado.

Levins (1996) descreve que em um modelo são desejadas três propriedades: precisão, realidade e generalidade, e que normalmente uma dessas não é totalmente atendida, porém nas outras duas se atinge um alto nível de aceitação. Burkhart (1997) afirma que, no caso dos modelos tradicionais, é dada maior ênfase para a precisão, enquanto à generalidade fica em segundo plano.

Entretanto, há um interesse na busca de modelos que aumente sua capacidade generalista, tendo em vista a importância de se conhecer a potencialidade econômica do cultivo de uma espécie em função de uma série de condições do ambiente. Em muitos casos, estudos têm reportado a geração de variáveis e coeficientes que expressam numericamente o crescimento e produção das culturas em função de variáveis do ambiente (elementos meteorológicos e do solo, entre outras). Já outros, tratam da adição das variáveis do ambiente aos

próprios modelos empíricos, tendo-se como premissa que o envolvimento de variáveis ambientais aumente a sua capacidade generalista.

Assim, para o desenvolvimento de modelos com maior capacidade generalista, Burkhart (1997) menciona dois pontos principais: a ligação de modelos empíricos com os processuais por meio do desenvolvimento e a identificação de um ponto em comum; e a inclusão de variáveis ambientais na própria formulação matemática dos modelos.

Em alguns casos, a modelagem do crescimento se dá por meio exclusivo entre as variáveis do ambiente, tais como nas pesquisas desenvolvidas por: Hunter e Gibson (1984), Carter *et al.* (1984), Kayahara *et al.* (1998), Soares e Leite (2000), Pereira *et al.* (2004) e Villa Nova *et al.* (2003). Em outros, há inclusão de variáveis ambientais em modelos empíricos, como, por exemplo, nos propostos por: Nautival e Couto (1984); Snowdon *et al.* (1999); Soares (1999); Robert (2003) e Temps (2005). Nos estudos citados, todos observaram resultados positivos na simulação das variáveis biométricas.

A modelagem matemática, conforme destacam Bassanezi e Ferreira Júnior (1988), aborda primeiramente o estudo de problemas e situações reais de um dado tema de relevância. A partir dessa pesquisa, a modelagem é utilizada como linguagem para compreensão, simplificação e resolução desse sistema complexo, por meio da devida escolha das variáveis e suas relações e formulação de hipóteses baseadas em conhecimentos de fenômenos análogos anteriores, visando uma possível tomada de decisão com relação ao problema levantado. A substituição da linguagem natural por matemática específica é a fase da resolução, e seu estudo depende da complexidade do modelo.

Para verificação da confiabilidade dos resultados gerados pelo modelo, existe a fase da validação, que consiste na comparação da solução obtida via resolução do modelo com os dados reais, obtidos em experimentos. O grau de aproximação desejado será o fator preponderante na decisão, e o principal obstáculo para a aceitação de um modelo é sua praticidade. A busca do aperfeiçoamento dos modelos propostos é o que dinamiza a modelagem e, após a aceitação do modelo, esse será aplicado na situação real, para previsões, tomada de decisões, explicar e entender o fenômeno e participar do processo com capacidade de influenciar em mudanças (BASSANEZI e FERREIRA JUNIOR, 1988).

Tsuji *et al.* (1994) destacam que ao se ajustar modelos, cuidados devem ser levados em conta, tais como: os experimentos de campo e de laboratório devem obedecer critérios estatísticos rigorosos, efetuar controle de qualidade com a análise prévia no tratamento dos dados; observar critérios estatísticos para o teste de modelos, incluindo: análise de variância e teste F, análise gráfica de resíduos, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa.

Na etapa de validação, segundo esses autores, os modelos ajustados devem ter sua eficiência testada com dados de outros experimentos, que não compuseram o conjunto de valores utilizados nos ajustes. Assim, há possibilidade de se verificar sua precisão e acurácia, inclusive para outras regiões.

3 A ÁREA FOLIAR DA ACÁCIA NEGRA AO LONGO DE SEU CICLO DE CULTIVO

3.1 INTRODUÇÃO

A espécie acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) é uma essência florestal de destaque no estado do Rio Grande do Sul, cuja extensão de seus povoamentos situa-se logo após a dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Conforme Simon (2005) a acácia negra é a principal fonte de casca para a indústria de taninos vegetais em nível mundial, utilizados principalmente no curtimento de peles. A madeira dessa espécie apresenta qualidade para a produção de celulose e papel, que atualmente constitui seu principal destino, sendo que seu cultivo beneficia cerca de 40 mil famílias, exercendo, portanto, importante papel socioeconômico (STEIN e TONIETTO, 1997).

Uma das tendências da Ciência Florestal é gerar modelos de simulação de crescimento que, além de prever rendimentos em função das condições que as plantas se desenvolvem, possibilitam analisar fatores que limitam o crescimento e o potencial produtivo da cultura. Desse modo, a determinação de variáveis biofísicas, tais como a área foliar, tem se tornado importante, uma vez que a partir dela outros estudos podem ser conduzidos, como a modelagem do crescimento e produção e a simulação do efeito de variações climáticas e da fertilidade do solo sobre o potencial produtivo. Esses modelos, quando utilizados coerentemente tornam-se uma adequada ferramenta para o planejamento das atividades florestais, tanto para empresas que compram matéria-prima e cultivam a acácia negra (espécie alvo do presente estudo), como para produtores que vendem a biomassa do fuste (casca + madeira) para fins diversos.

A área foliar é uma variável do indicativo de produtividade, pois o crescimento das plantas (quando as condições de nutrição do solo, disponibilidade de água e temperatura não são fatores limitantes) depende da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada e da eficiência de utilização dessa energia no processo fotossintético para produção de fitomassa (MONTEITH, 1965, 1977). Assim, a área foliar é uma das características biofísicas da planta mais

importante, porque é ela quem determina a interceptação da energia luminosa para a realização da fotossíntese, estando, portanto, relacionada com o crescimento e produção (LINHARES *et al.*, 2000; VILLA NOVA *et al.*, 2003; XAVIER e VETTORAZZI, 2003).

A maioria dos estudos que trata sobre o crescimento de área foliar foi conduzida em culturas anuais (soja, milho, arroz, feijão), sendo escassas as pesquisas em povoamentos florestais e entre as razões para que isso ocorra, está a dificuldade de mensurá-la devido ao maior porte das plantas, custo e tempo. Quando conduzidos, a maioria deles trata do índice de área foliar, uma importante variável para modelar as características do dossel (MAcFARLANE *et al.*, 2000; LEBLANC e CHEN, 2001) e que pode ser obtida de forma rápida e fácil por meio de determinações indiretas (MAcFARLANE *et al.*, 2000; JONCKHEERE *et al.*, 2004; WEISS *et al.*, 2004).

Portanto, gerar indicadores numéricos da área foliar, bem como verificar seu comportamento ao longo do ciclo de cultivo e os fatores que estão relacionados ao seu crescimento, permitirá conduzir novos estudos, tendo em vista as relações que ocorrem entre a área foliar e a produção (quer seja em volume de madeira ou biomassa) de uma espécie. Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar a área foliar em povoamentos de acácia negra ao longo do ciclo de cultivo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram avaliados plantios comerciais de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) situados nas regiões de maior concentração de plantios no estado do Rio Grande do Sul, nos municípios de Cristal e Piratini. Em cada município foram estudados povoamentos em uma sequência de idades após o plantio: um, três, cinco e sete anos, de forma a abranger toda a rotação praticada pelos silvicultores.

No município de Cristal, os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul 30° 55' S e 52°10' W, enquanto no município de Piratini os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul 31° 24' S e Oeste 52°57' W.

Para as duas regiões os plantios foram estabelecidos, tanto em áreas novas (primeira rotação), como em áreas de reformas da plantação (segunda rotação). Para todos os casos, o preparo do solo foi realizado na linha de plantio (cultivo mínimo), com uma subsolagem com três hastes a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens. Os plantios foram realizados com espaçamento de 3 x 1,75 metros (1.904 plantas por hectare) para o ano um e 3 x 1,5 metros para as demais idades (2.222 plantas por hectare) e no plantio foi adicionado 50 gramas de NPK (5-30-15) por planta.

3.3 ORIGEM DOS DADOS

O estudo compreendeu a amostragem de 8 povoamentos (4 em cada local de estudo), a instalação de 24 parcelas (3 em cada povoamento) e a amostragem de 48 árvores (2 árvores por parcela).

Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte em que foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior da pendente. O tamanho das parcelas foram de 9 x 16 metros para os povoamentos com um ano de idade e 9 x 14 metros para as demais idades, equivalendo a quatro linhas de plantio e 10 plantas em cada linha.

Nas parcelas todas as plantas foram mensuradas quanto à circunferência a altura do peito utilizando-se fita métrica graduada. As duas árvores que se aproximaram da média aritmética da circunferência a altura do peito em cada parcela foram selecionadas para avaliação da biomassa de folhas e área foliar.

A avaliação da biomassa de folhas, por árvore, consistiu em separar esse compartimento dos demais (fuste, galhos e flores + frutos) para então ser determinada sua massa fresca por meio de pesagem, utilizando-se uma balança digital (*Portable Electronic Scale*) de precisão de 0,5 gramas. Para a determinação da massa seca foram retiradas amostras de 200 gramas (uma por árvores) e imediatamente pesadas para determinação da massa fresca. Posteriormente, essas amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 75°C e após a constatação de massa constante, novamente o material foi pesado, possibilitando,

assim, a obtenção do teor de umidade e, conseqüentemente, a massa seca das folhas por meio da expressão:

$$MSF = \frac{MUF * MS_A}{MU_A} \quad (1)$$

em que:

MSF = massa seca de folhas, em kg;
 MUF = massa fresca das folhas, em kg;
 MS_A = massa seca da amostra, em kg;
 MU_A = massa fresca da amostra, em kg.

Para a determinação da área foliar foram retiradas três amostras de 50 gramas cada, sendo realizada a amostragem de folhas ao longo da copa de cada árvore. Os folíolos foram separados do pecíolo e ráquis e estendidos para a obtenção de uma superfície totalmente aberta, utilizando-se para tanto uma prancha de ferro aquecida a 65° C, para então, determinar a área foliar utilizando-se um integrador (3000 *Canopy Analyser*, Li-Cor). Ao final do processo, todo o material (pecíolo, ráquis e folíolo) foi seco em estufa de circulação e renovação do ar a 65° C, e após a constatação da massa constante foi pesado em balança analítica. Assim, a área foliar da planta foi calculada pela expressão:

$$AF = \frac{MSF * AF_A}{MS_A} \quad (2)$$

Em que:

AF = área foliar em m²;
 MSF = massa seca total das folhas da árvore, em Kg;
 AF_a = área foliar da amostra, em m²;
 MS_a = massa seca da amostra de folhas, em kg.

Outra avaliação realizada nas parcelas foi das características químicas do horizonte superficial do solo (0-20 cm). Para tanto, foram coletadas 3 amostras em cada parcela utilizando-se um trado e, ao final, todas foram misturadas obtendo-se uma única por povoamento. Essas foram encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solos e Tecidos Vegetal da Universidade Regional Integrada do Alto-Uruguai e das Missões no município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, para

determinação das seguintes variáveis: Ph, Índice SMP (ISMP), argila (Arg), matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio + cálcio, CTC a pH 7, saturação da CTC por base e saturação da CTC por alumínio.

Os dados meteorológicos: temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa do ar, precipitação e número de horas de insolação foram adquiridos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) da Estação Climatológica do município de Pelotas, a mais próxima dos locais de estudo para o período em avaliação dos povoamentos, distante aproximadamente 85 km de Cristal e 70 km de Piratini.

A radiação global incidente foi estimada através da equação de Ångström modificada por Prescott e Penman, conforme desenvolvimento matemático apresentado por Vianello e Alves (2000) e com coeficientes ajustados para o município de Pelotas por Steinmetz *et al.* (1999).

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

Inicialmente foi estudada a relação entre a massa seca de folhas (MSF) e a área foliar (AF) das amostras obtidas. Para tanto o modelo linear $AF = B_0 + B_1 MSF + \varepsilon_i$, foi ajustado e avaliado quanto às estatísticas de ajuste: coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa, significância de F, significância dos coeficientes, intervalo de confiança para os coeficientes e distribuição de resíduos. Para verificar se essa relação, peso seco de folhas e área foliar, foi a mesma ao longo dos anos e entre os locais de plantio foi realizada a análise de covariância (ANACOVA).

A ANACOVA permitiu verificar a necessidade do uso de funções independentes ao longo dos anos e local de plantio, ou seja, testar a hipótese da inclinação das retas. Se a diferença não for significativa para a inclinação uma regressão única pode ser ajustada, ou vice e versa. O teste dos níveis não foi realizado, tendo em vista que o objetivo foi verificar somente o coeficiente angular, o qual define a relação em questão. A ANACOVA foi calculada utilizando o método de

Snedecor, conforme apresentado por Freese (1964). A inclinação das retas foram verificadas através do valor F para 1% de erro para o quadrado médio das diferenças.

O segundo passo, foi estudar a variação da área foliar dos indivíduos médios por meio da análise de variância. O delineamento inteiramente casualizado foi utilizado, consistindo o fator de estudo a combinação local de plantio *versus* idade do povoamento. Inicialmente, foram testadas as pressuposições básicas da análise da variância (homogeneidade) por meio do teste de Bartlett, para, então, determinar a análise de variância e o teste F. Quando algum fator de estudo demonstrou-se significativo ($p < 0,05$) seus efeitos foram desmembrados através do teste de comparação de médias de Tukey e, ainda, quando o fator idade foi significativo, foi realizada análise de regressão e o teste F indicou o grau do polinômio a ser utilizado.

O terceiro passo foi verificar a relação entre os atributos químicos do horizonte superficial do solo e elementos meteorológicos com a área foliar média. Para tanto, foi realizada a análise de correlação de Pearson, que por sua vez, foi avaliada qualitativamente quanto à intensidade, utilizando os seguintes critérios (em módulo) propostos por Callegari-Jacques (2003):

- Correlação nula = 0;
- Correlação fraca = 0 | 0,3;
- Correlação regular = 0,3 | 0,6;
- Correlação forte = 0,6 | 0,9;
- Correlação muito forte: 0,9 | 1,0;
- Correlação plena: 1,0.

A relação entre a área foliar com os atributos químicos do solo e os elementos meteorológicos também foi analisada pela técnica de seleção de variáveis *stepwise*. Draper e Smith (1980) citam que a regressão múltipla "passo a passo" (*Stepwise Multiple Regression*) é um dos métodos mais recomendados para uma seleção criteriosa das variáveis explicativas.

Os modelos obtidos por meio do método *stepwise* foram avaliados quanto às condicionantes da regressão, através do teste de White (homocedasticidade), Shapiro-Wilk (normalidade) e Durbin-Watson (independência). Para os modelos

múltiplos, determinou-se o nível de tolerância e, conseqüentemente, o fator de inflação de variância (VIF), pois esse é um indicador do efeito que as outras variáveis independentes têm sobre o erro padrão de um coeficiente de regressão. Valores de VIF altos (acima de 10) indicam um alto grau de colinearidade ou multicolinearidade (HAIR Jr. *et al.*, 2009), ou seja, aumento da variância dos coeficientes dado pela correlação entre as variáveis independentes. Para os modelos múltiplos também foi realizada regressão com as variáveis padronizadas, eliminando assim o efeito das diferentes unidades de medidas das variáveis independentes e isso permitiu identificar o impacto relativo das variáveis independentes sobre a dependente na mudança de um desvio-padrão.

No modelo escolhido para descrever a área foliar ao longo dos anos foram adicionadas variáveis *Dummy*, possibilitando assim, identificar se as relações entre as variáveis dependente (área foliar) e independente (variáveis selecionadas pelo método *stepwise*) era a mesma entre os dois locais de plantio. Primeiramente, as variáveis *Dummy* assumiram valores de 0 e 1 conforme o local de plantio, ou seja: $D_i = 1$, se a árvore estivesse presente no local i ; e $D_i = 0$, se a árvore estivesse ausente nesse local i . Esse método possibilitou expressar as regressões individuais ajustadas para os dois locais de cultivos avaliados em função de uma regressão linear múltipla, representada pelas variáveis independentes na equação selecionada, de forma que: $AF = f(x; D_i; D_i \cdot x)$, em que AF = área foliar, em m^2 ; x = variáveis selecionadas pelo método *stepwise*; $D_i = Dummy$ (local de plantio, onde $i = 1$ – município de Cristal, 2 – município de Piratini); $D_i \cdot x$ = interação variável D_i com a variável x .

O desempenho da equação obtida foi testado a partir da entrada de um novo conjunto com 4 quatro amostras, que foram provenientes de um estudo conduzido por Mochiutti (2007), no qual foram instaladas parcelas em povoamentos de acácia negra com 3 e 5 anos de idade nos municípios de Cristal e Piratini. Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte e foram determinadas as características químicas do horizonte superficial do solo e também a biomassa de folhas de 27 árvores distribuídas ao longo das classes diamétricas obtidas para cada idade e local. A área foliar foi calculada utilizando os coeficientes da relação massa de folhas / área foliar obtidas no presente trabalho. A avaliação dos ajustes foi realizada somente por meio do teste do Qui-quadrado (χ^2) a 5% de probabilidade.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.5.1 Relação entre o peso seco de folhas e área foliar

A mensuração da área foliar implica em leituras diretas da área de todas as folhas, que pode ser efetuada com diferentes equipamentos e é muito trabalhosa. De modo geral essa avaliação é acompanhada por meio de medições de outras variáveis que expressam as características das folhas, tais como, a medida da massa foliar.

Assim, em conjunto, tais avaliações permitem estabelecer relações para descrever a área foliar, evitando o processo laborioso de medição de todas as folhas. Para o caso da acácia negra, em se tratando de uma espécie que possui folha composta bipinada, a relação entre a medida da área (AF) e a massa foliar (MSF) vem ser uma técnica apropriada para a estimativa da AF, tendo em vista que a correlação entre essas variáveis foi de 0,99, ou seja, uma relação muito forte.

Para os dois locais de plantio (município de Cristal e Piratini) e em todas as idades dos povoamentos amostrados (1, 3, 5 e 7 anos) os interceptos do modelo ($AF = B_0 + B_1 MSF + \epsilon_i$) não foram significativos e as estatísticas do ajuste para os coeficientes estão destacadas na TABELA 1.

TABELA 1 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DOS COEFICIENTES DO MODELO PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA BIOMASSA DE FOLHAS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

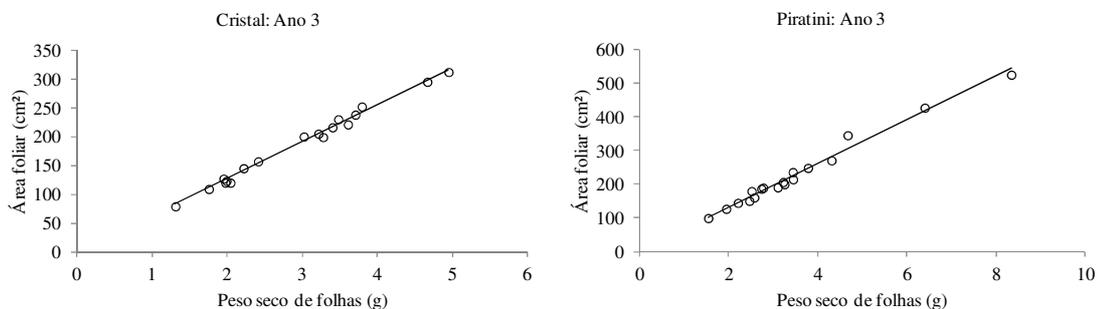
Região	Idade	Coeficientes	Erro padrão	t	$\alpha (t)$	Intervalo de confiança para o coeficiente			
AF = b0 + b1 MSF									
Cristal	1	b ₀	0,84437	1,96	0,43	0,67	-3,30586	≤ Y ≤	4,99461
		b ₁	64,83803	0,60	107,59	2,59E-24	63,56050	≤ Y ≤	66,11556
	3	b ₀	-3,54466	4,52	-0,78	0,44	-13,12194	≤ Y ≤	6,03263
		b ₁	64,69371	1,46	44,32	3,58E-18	61,59950	≤ Y ≤	67,78791
	4	b ₀	-2,27578	9,64	-0,24	0,82	-22,71358	≤ Y ≤	18,16201
		b ₁	63,31210	3,21	19,71	1,20E-12	56,50212	≤ Y ≤	70,12207
	7	b ₀	10,19664	8,43	1,21	0,24	-7,66682	≤ Y ≤	28,06010
		b ₁	56,62245	2,44	23,18	9,71E-14	51,44474	≤ Y ≤	61,80017
Piratini	1	b ₀	11,83234	9,41	1,26	0,23	-8,11690	≤ Y ≤	31,78158
		b ₁	64,44607	1,51	42,56	6,82E-18	61,23580	≤ Y ≤	67,65634

continua

								conclusão	
3	b_0	3,07698	8,06	0,38	0,71	-14,00196	$\leq Y \leq$	20,15592	
	b_1	64,62312	2,10	30,71	1,19E-15	60,16163	$\leq Y \leq$	69,08461	
5	b_0	2,488867	7,99	0,31	0,76	-14,44366	$\leq Y \leq$	19,42139	
	b_1	63,11496	1,54	40,93	1,263E-17	59,84637	$\leq Y \leq$	66,38354	
7	b_0	8,429886	8,12	1,04	0,31	-8,78912	$\leq Y \leq$	25,64889	
	b_1	58,45483	1,72	33,94	2,447E-16	54,80411	$\leq Y \leq$	62,10555	
AF = b_1 MSF									
Cristal	1	b_1	65,08468	0,19	351,01	2,939E-34	64,69348	$\leq Y \leq$	65,47589
	3	b_1	63,60969	0,47	136,70	2,679E-27	62,62792	$\leq Y \leq$	64,59145
	5	b_1	62,58155	0,84	74,77	7,499E-23	60,81570	$\leq Y \leq$	64,34740
	7	b_1	59,45871	0,70	85,42	7,841E-24	57,99015	$\leq Y \leq$	60,92728
Piratini	1	b_1	66,27418	0,43	153,89	3,583E-28	65,36554	$\leq Y \leq$	67,18282
	3	b_1	65,35316	0,86	76,15	5,5E-23	63,54252	$\leq Y \leq$	67,16381
	5	b_1	63,56907	0,49	129,77	6,481E-27	62,53556	$\leq Y \leq$	64,60258
	7	b_1	60,0692	0,74	81,10	1,889E-23	58,50660	$\leq Y \leq$	61,63181

Em que: AF = área foliar e MSF = massa seca de folhas.

Novos ajustes foram realizados de posse do modelo sem intercepto, ou seja, $AF = b_1 MSF + \epsilon_i$, sendo as estatísticas para os coeficientes descritos na TABELA 1 e as tendências são apresentadas na FIGURA 1. As estatísticas de ajuste foram excelentes (TABELA 2), denotando valores de coeficiente de determinação maiores que 93%, erro padrão da estimativa menores que 7%, F altamente significativos ($p < 0,01$) e adequada distribuição dos resíduos (FIGURA 2), revelando assim, que a relação entre área e massa foliar pode ser empregada para a obtenção da área foliar.



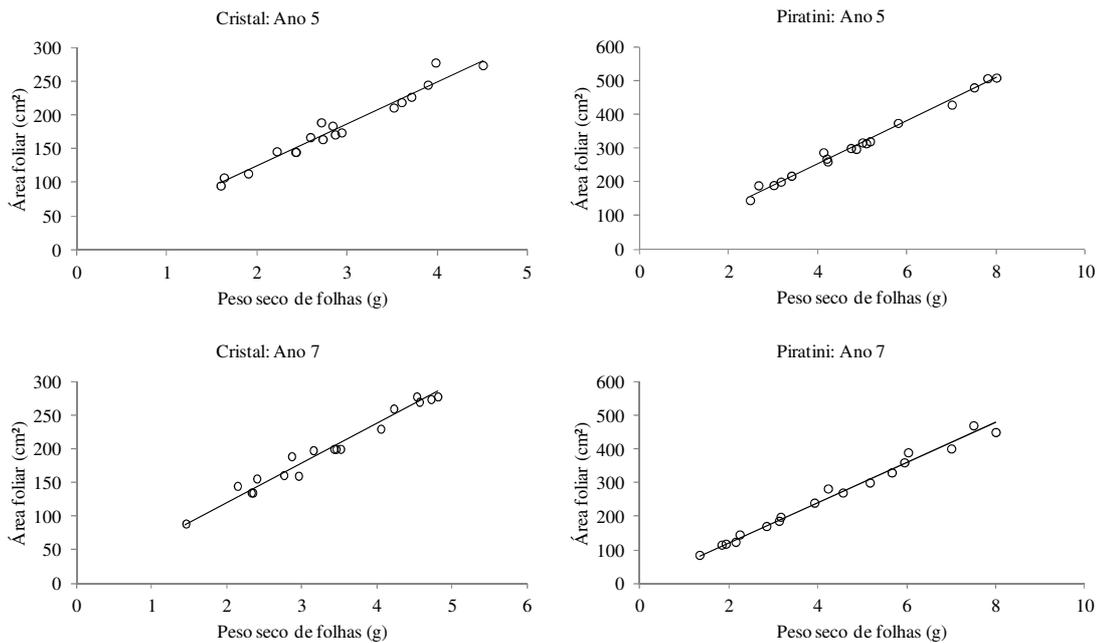


FIGURA 1 - TENDÊNCIAS DOS AJUSTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

FONTE: O autor (2012)

TABELA 2 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DOS COEFICIENTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Estatística do ajuste	Idade do povoamento (anos)			
	1	3	5	7
Município de Cristal				
Coeficiente de Correlação (%)	99,99	99,95	99,85	99,88
Coeficiente de determinação (%)	99,99	99,91	99,70	99,77
Coeficiente de determinação ajustado (%)	94,10	94,03	93,81	93,89
Erro padrão da estimativa ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)	2,56	6,11	10,6	10,19
Erro padrão da estimativa (%)	1,27	3,29	5,90	5,15
F	123207,30	18686,14	5590,80	7296,81
Município de Piratini				
Coeficiente de Correlação (%)	99,96	99,85	0,99	0,99
Coeficiente de determinação (%)	99,93	99,71	0,99	0,99
Coeficiente de determinação ajustado (%)	94,05	93,83	0,94	0,94
Erro padrão da estimativa ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)	11,35	13,94	10,76	14,82
Erro padrão da estimativa (%)	2,86	6,12	4,35	6,63
F	23680,87**	5799,03**	16840,36**	6577,99**

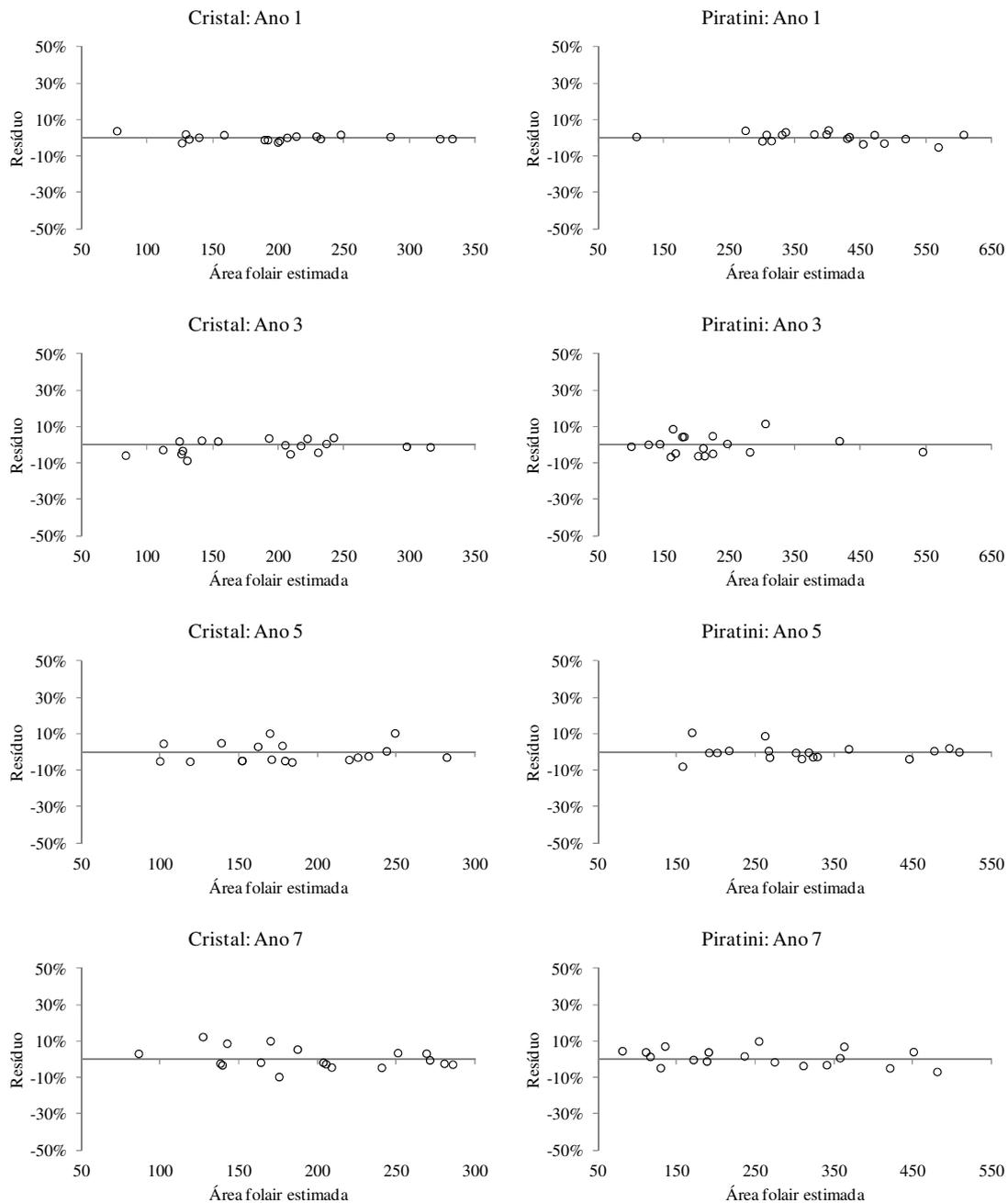


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS POR MEIO DE AJUSTES DE MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL
 FONTE: O autor (2012)

Foi identificado que as relações obtidas não necessitam necessariamente ser utilizadas independentemente, ou seja, uma para cada combinação de idade *versus* região. Por meio da análise de covariância foi possível testar a diferença entre as inclinações (paralelismo), já que essa característica é o que define o coeficiente angular.

Assim, foi observado que o ajuste para um único grupo não seria apropriado devido à soma de quadrado da diferença ser significativa ($p < 0,01$). Então, novas combinações foram testadas, primeiramente entre as idades dentro de cada região, entre as regiões dentro de cada idade e por fim, a combinação entre região *versus* idade.

Vários grupos foram identificados, os quais não apresentaram quadrado médio da diferença significativa ($p > 0,01$), e entre todos, optou-se pela definição de dois: o primeiro expressando povoamentos com até três anos de idade e o segundo para idades maiores. Portanto, a composição do grupo 1 foi dada para povoamentos amostrados no município de Cristal + Piratini em idades menores ou iguais que 3 anos, e para o grupo 2 aqueles amostrados em ambos municípios e em idades maiores que 3 anos (TABELA 3).

TABELA 3 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA ENTRE OS AJUSTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

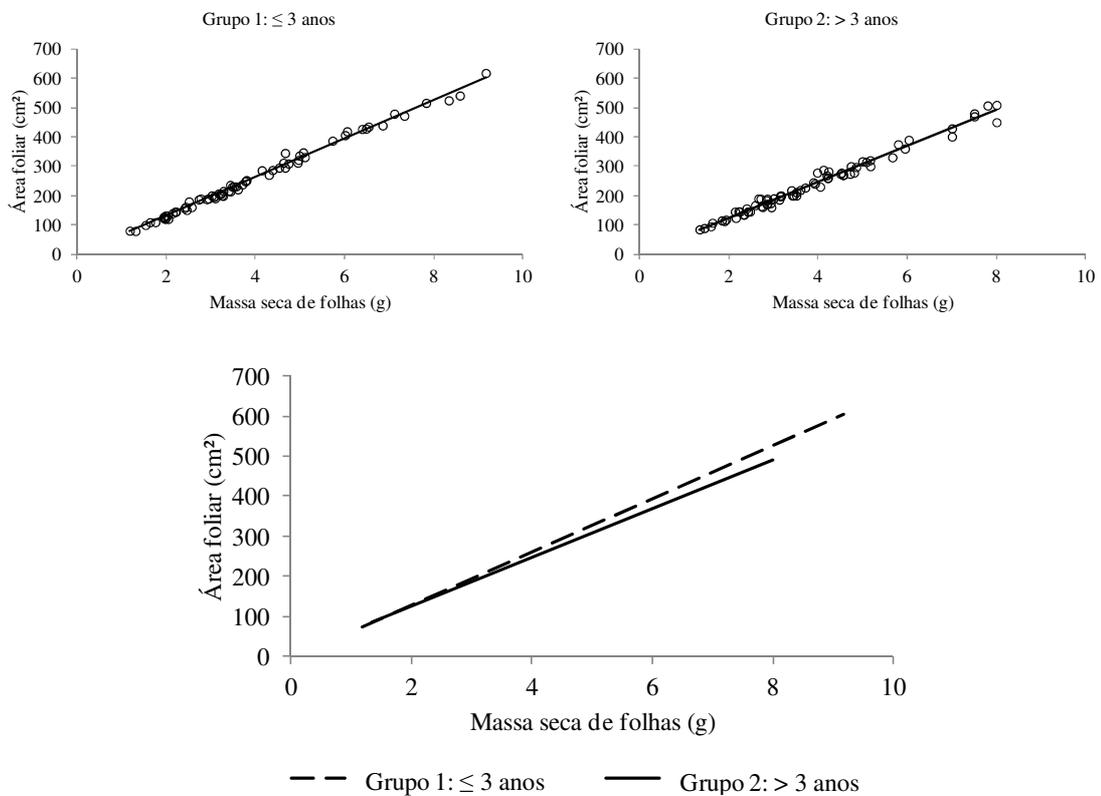
Fator de Variação	GL	QM	F	α F	Igualdade entre o grupo
Diferença para um único grupo (C1+C3+C5+C7+P1+P3+P5+P7)	7	343,699	2,936	0,696%	Não
Diferença - grupo C1+C3+C5+P1+P3+P5	5	18,533	0,180	96,943%	Sim
Diferença - grupo C3+C5+C7+P3+P5+P7	5	468,346	4,049	0,223%	Não
Diferença - grupo C1+C7+P1+P7	3	575,329	5,100	0,316%	Não
Diferença - grupo C3+C7+P3+P7	3	549,320	3,907	1,260%	Não
Diferença - grupo C5+C7+P5+P7	3	330,564	2,351	8,056%	Sim
Diferença - grupo C1+C3+P1+P3	3	0,844	0,009	99,881%	Sim
Diferença - grupo C1+C5+P1+P5	3	22,864	0,244	86,501%	Sim
Diferença - grupo C3+C5+P3+P5	3	23,736	0,196	89,903%	Sim
Diferença - grupo C1+P1	1	2,154	0,033	85,754%	Sim
Diferença - grupo C3+P3	1	0,064	0,001	98,177%	Sim
Diferença - grupo C5+P5	1	0,369	0,003	95,635%	Sim
Diferença - grupo C7+P7	1	46,248	0,289	59,438%	Sim
Diferença para um único grupo (C1+C3+C5+C7)	3	260,576	3,913	1,250%	Não
Diferença - grupo C1+C3+C5	2	9,474	0,172	84,256%	Sim
Diferença - grupo C1+C3	1	0,192	0,009	92,710%	Sim
Diferença - grupo C1+C5	1	1930,441	514,346	2,76E-21	Não
Diferença - grupo C1+C7	1	2218,925	643,529	9,20E-23	Não
Diferença - grupo C3+C5	1	13,483	0,170	68,271%	Sim
Diferença - grupo C3+C7	1	2654,354	601,777	2,56E-22	Não
Diferença - grupo C5+C7	1	308,943	2,792	10,448%	Sim

continua

					conclusão
Diferença para um único grupo (P1+P3+P5+P7)	3	540,857	3,228	2,817%	Não
Diferença - grupo P1+P3+P5	2	34,359	0,228	79,680%	Sim
Diferença - grupo P1+P3	1	0,783	0,005	94,545%	Sim
Diferença - grupo P1+P5	1	1930,441	514,346	2,76E-21	Não
Diferença - grupo P1+P7	1	2218,925	643,529	9,20E-23	Não
Diferença - grupo P3+P5	1	55,377	0,339	56,464%	Sim
Diferença - grupo P5+P7	1	658,427	3,861	5,816%	Sim
Diferença - grupo P3+P7	1	2654,354	601,777	2,56E-22	Não

Em que: Ci = povoamento localizado no município de Cristal com idade "i", em anos. Pi = Povoamento localizado no município de Piratini na idade "i", em anos. α F = área ocupada sob a curva da distribuição.

A relação entre a massa e o peso seco de folhas para o grupo 1 foi de 65,572, ou seja, em um quilograma de folhas tem-se 6,5572 m² de área foliar. Já para o grupo 2 a mesma relação foi de 61,631, ou seja, 6,1631 m² de área foliar em um quilograma de folhas (FIGURA 3).



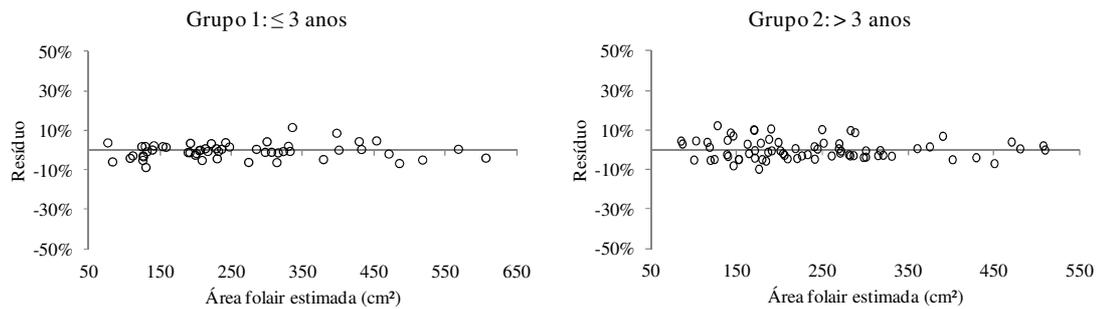


FIGURA 3 - TENDÊNCIA DO AJUSTE E RESÍDUOS OBTIDOS POR MEIO DE AJUSTES DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

FONTES: O autor (2012)

Tal diferença, significativa, expressa a vitalidade das folhas nas idades jovens dos povoamentos independentemente do local de plantio. Ao longo do cultivo, a relação entre massa específica de folha (dada pela massa dos folíolos) com pecíolo + ráquis tende a diminuir, isso porque uma parte das pinas cai dos folíolos. Assim, tem-se mais massa e menos área foliar, e entre as razões para que isso aconteça estão os fatores ligados à competição entre as árvores do povoamento, a formação do dossel ocasionando sombreamento para as folhas da parte inferior da copa, modificações morfofisiológicas e a idade das folhas.

Os dois grupos obtidos foram avaliados quanto às estatísticas de qualidade de ajuste, bem como as condicionantes da regressão. O ajuste para ambos apresentaram excelentes valores de coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa, erro padrão dos coeficientes, adequada distribuição de resíduos (FIGURA 3) e atenderam as condicionantes da regressão, conforme está apresentado na Tabela 4, revelando assim que as relações obtidas podem ser utilizadas para a obtenção da área foliar. Na literatura não foram encontrados trabalhos sobre a relação aqui descrita para a espécie acácia negra.

TABELA 4 - ESTATÍSTICA DO AJUSTE DO MODELO $AF = B_1 MSF + \epsilon_i$ PARA DESCREVER A ÁREA FOLIAR (AF) EM FUNÇÃO DA BIOMASSA SECA DE FOLHAS (MSF) DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Estatística	Grupo 1: ≤ 3 anos	Grupo 2: > 3 anos
Coeficiente de correlação	99,94%	99,86%
Coeficiente de determinação	99,87%	99,72%
Erro padrão ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)	10,14	13,71
Erro padrão	4,01%	5,79%
F	55.218,32**	25.452,73**

continua

						conclusão
White			7,62 ^{ns}			6,24 ^{ns}
Shapiro-Wilk			0,96 ^{ns}			0,98 ^{ns}
Durbin-Watson			1,80 ^{ns}			1,87 ^{ns}
Grupo	Coeficientes	Erro padrão	t	Intervalo de confiança		
1: ≤ 3 anos	b ₁	65,57	0,28	234,99**	65,01	≤ Y ≤ 66,13
2: > 3 anos	b ₁	61,63	0,39	159,54**	60,86	≤ Y ≤ 62,40

** = significativo a 1% de probabilidade. ns = não significativo a 1% de probabilidade.

3.5.2 Variação da área foliar da acácia negra ao longo do ciclo de crescimento e local de plantio

A análise de variância revelou que a interação dos fatores local de plantio e idade do povoamento foi estatisticamente significativa ($p < 0,01$), indicando que seus efeitos não são independentes. Os fatores principais também foram significativos (TABELA 5).

TABELA 5 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Fonte de variação		Grau de liberdade	Quadrado médio
Efeito Principal			
Local de plantio		1	0,0364**
Idade do povoamento		3	0,1293**
Local * idade		3	0,0278**
Coeficiente de determinação			81,01%
Coeficiente de variação			4,31%
Efeito Simples			
	1	1	0,00002 ^{ns}
Idade (anos)	3	1	0,0054 ^{ns}
	5	1	0,0214*
	7	1	0,0927**
Local	Cristal	3	0,0396**
	Piratini	3	0,1175**

** = significativo a 1% de probabilidade. ns = não significativo a 1% de probabilidade.

As médias da área foliar são apresentadas na TABELA 6. Para o município de Cristal os valores de área foliar tenderam a apresentar as maiores médias já no terceiro ano, decrescendo então até os níveis iniciais no quinto, onde as médias entre os povoamentos com 1 e 5 anos de idade foram semelhantes. A partir desse ponto, novamente os valores de área foliar tenderam a ser maiores, chegando aos

níveis máximos no sétimo ano, no qual a média foi idêntica à observada no povoamento com 3 anos de idade, sendo essas duas superiores às demais. Já para Piratini a área foliar tendeu a aumentar até o terceiro ano e estabilizou até o quinto, quando as médias apresentaram-se semelhantes (povoamentos com 3 e 5 anos). O povoamento com 7 anos de idade apresentou a maior média de área foliar, sendo superior às demais. Esse comportamento diferente ao longo das idades dos povoamentos e entre os locais de plantio determinaram a interação (local de plantio *versus* idade) ser altamente significativa.

TABELA 6 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAR AS MÉDIAS DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Local de plantio	Idade do povoamento (anos)			
	1	3	5	7
Cristal	18,44 aB	26,13 aA	20,09 bB	26,90 bA
Piratini	18,55 aC	23,62 aB	24,38 aB	39,82 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Dentro da mesma idade foram observadas diferenças estatísticas entre os locais de plantio somente nos povoamentos com 5 e 7 anos, evidenciados pelo efeito simples da análise de variância (TABELA 5). Aqueles que foram estabelecidos no município de Piratini apresentaram os maiores valores médios de área foliar (TABELA 6).

Com base nesses resultados pode-se afirmar que, para o uso de valores médios de área foliar, é necessário considerar o local de plantio e a idade do povoamento, os quais podem ser estimados pelas curvas de tendência ajustadas para representar a relação entre a área foliar e a idade do povoamento estão apresentadas na FIGURA 4. A relação entre as variáveis foi representada por equações de terceiro grau (TABELA 7), que explicam 55,91% e 89,69% as variações da área foliar em função da idade para os municípios de Cristal e Piratini, respectivamente.

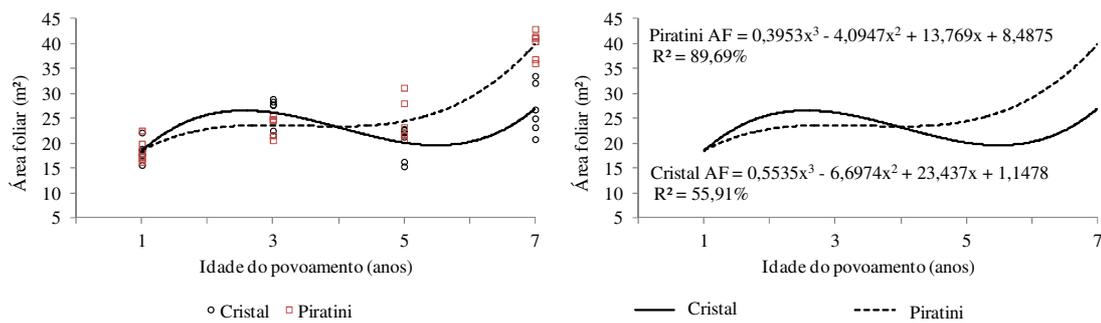


FIGURA 4 - TENDÊNCIAS DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

FONTE: O autor (2012)

TABELA 7 - TESTE F PARA IDENTIFICAR O GRAU DA EQUAÇÃO DAS TENDÊNCIAS DA ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS EM FUNÇÃO DA IDADE DO POVOAMENTO DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Local de plantio	Grau da equação	Grau de liberdade	Quadrado médio
Cristal	Primeiro	1	0,0396**
Cristal	Segundo	1	0,0009 ^{ns}
Cristal	Terceiro	1	0,0783**
Piratini	Primeiro	1	0,3062**
Piratini	Segundo	1	0,0186*
Piratini	Terceiro	1	0,0276**

* = significativo a 5% de probabilidade. ns= não significativo a 5% probabilidade

As variações da área foliar aqui obtida, também foram observadas para a biomassa de folhas de acácia negra para os mesmos locais de estudo e ao longo do ciclo da cultura por Mochiutti (2007), o qual observou que a biomassa de folhas cresceu até a idade de três anos, decresceu até no quarto e estabilizou a partir dos 5 anos. Kozlowski *et al.* (1991) descrevem que a biomassa foliar ou índice de área foliar (conseqüentemente a área foliar) aumenta com a idade do povoamento florestal até atingir um máximo para subsequentemente estabilizar ou reduzir suavemente. Esses autores também destacam que a idade de máxima biomassa foliar e o grau de decréscimo depende da espécie, espaçamento e sítio florestal.

Em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no estado de Minas Gerais, Reis *et al.* (1985) observaram o crescimento em biomassa foliar até os três anos de idade, seguido de um acentuado declínio, e os autores atribuem isso a um desequilíbrio entre a produção e morte das folhas em consequência da diminuição da disponibilidade de nutrientes, especialmente o fósforo. Assim, fica evidenciado que as condições do ambiente em que as plantas são cultivadas corroboram na dinâmica da área foliar e isso despertou o interesse em relacionar essa variável com os

atributos químicos do solo e os elementos meteorológicos, ou seja, fatores que determinam a qualidade do sítio.

3.5.3 Relação entre os atributos químicos do horizonte superficial do solo com a área foliar

As características químicas do horizonte superficial dos solos dos povoadamentos estão apresentadas na TABELA 8. Nos mesmos locais em que o presente estudo foi conduzido, Mochiutti (2007) realizou a classificação dos solos e encontrou no município de Cristal Neossolo Regolítico distrófico e em Piratini Neossolo Litólico distrófico.

TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO HORIZONTE SUPERFICIAL DO SOLO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA SITUADOS NOS MUNICÍPIOS DE CRISTAL E PIRATINI NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Idade Anos	pH	IND. SMP	Argila	M. O.	P	K	Al	Ca	Mg	H + Al	CTC pH7	% Sat. da CTC	
			-----%-----		---mg/L---		----- cmolc/L-----		Bases	Al			
Município de Cristal													
1	4,90	5,80	23,00	1,80	4,30	134,00	0,90	1,60	0,60	4,30	6,80	37,20	26,10
3	4,70	6,00	15,00	1,20	1,70	61,50	1,10	0,10	0,10	3,60	4,00	9,00	75,50
5	4,00	4,50	38,00	3,80	1,40	91,50	5,20	0,10	0,10	13,80	14,20	3,00	92,30
7	4,40	5,50	20,00	2,10	1,40	54,50	2,30	0,30	0,10	5,60	6,10	8,80	81,00
Município de Piratini													
1	5,00	5,80	22,00	3,00	2,20	124,50	0,60	1,70	1,00	4,30	7,30	41,20	16,60
3	4,70	5,50	21,00	2,90	3,90	125,00	1,20	2,40	0,80	5,60	9,10	38,60	25,40
5	4,90	5,50	24,00	3,30	2,20	131,50	0,90	3,30	1,30	5,60	10,50	46,90	15,40
7	5,00	5,80	23,00	2,50	8,80	233,50	0,60	3,30	1,20	4,30	9,40	54,20	10,50

Por meio da análise de correlação linear simples, detectou-se que o elemento fósforo (P) foi a variável de maior correlação com a área foliar ($r=0,71$), denotando uma relação forte. Outras três variáveis apresentaram correlação regular, sendo elas: potássio ($r=0,55$), cálcio ($r=0,39$) e CTC base ($r=0,30$). As demais se demonstraram fracamente correlacionadas com a área foliar ($r < 0,30$), sendo o pH, Mg e ISMP de forma positiva e H+Al, Argila, MO, CTC Al e CTC pH 7 de forma negativa (TABELA 9).

TABELA 9 - CORRELAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Variável	Correlação	Grau da correlação	Variável	Correlação	Grau da correlação
H + Al	-0,28	Fraca	pH	0,23	Fraca
Al	-0,26	Fraca	Mg	0,27	Fraca
Argila	-0,25	Fraca	ISMP	0,27	Fraca
M. O.	-0,20	Fraca	CTC base	0,30	Regular
CTC Al	-0,18	Fraca	Ca	0,39	Regular
CTC pH 7	-0,05	Fraca	K	0,55	Regular
			P	0,71	Forte

Em que: pH = concentração de íons de H⁺; IND. SMP = índice SMP; M.O. = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Al = Alumínio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; H+Al = hidrogênio + alumínio; CTC pH 7 = capacidade de troca de cátions; e % Sat. da CTC = porcentagem da saturação da CTC.

Na literatura não foram encontrados trabalhos que contemplam a relação entre o solo e a área foliar em povoamentos de acácia negra ou de outra espécie florestal. Para acácia negra estudos foram conduzidos para verificar a correlação entre os atributos do solo com variáveis dendrométricas: altura dominante (MOCHIUTTI, 2007), diâmetro à altura do peito (RACHWAL *et al.*, 1997) e volume de madeira (RACHWAL *et al.*, 1997; MOCHIUTTI, 2007). Isso evidencia a inter-relação entre o solo e a área foliar e, conseqüentemente, o crescimento e produção da espécie.

O efeito do P em variáveis dendrométricas em povoamentos de acácia negra já é conhecido. Mochiutti (2007), avaliando a influência dos atributos físicos e químicos do solo sobre o crescimento dessa espécie (para os mesmos locais do presente estudo), constatou que as únicas variáveis do solo que apresentaram correlação significativa com a altura dominante foram P, Al e CTC do horizonte A, apesar da relação ser de baixa magnitude ($r=0,237$; $-0,232$ e $-0,219$, respectivamente).

Além disso, esse autor observou que na avaliação do efeito da aplicação de Ca e Mg e da adubação com P e K sobre o crescimento e produção de volume de madeira de acácia negra aos três anos de idade, demonstrou que o P foi o nutriente mais importante para crescimento e produção. De acordo com Stein e Tonietto (1997) esses nutrientes fazem parte da adubação básica utilizada no cultivo da espécie e segundo Mochiutti (2007) o crescimento poderá ser melhorado por adubações adequadas nas áreas em que o P e K apresentarem menor disponibilidade. Na Serra do Sudeste, também no estado do Rio Grande do Sul, em solos Neossolo Litólico, Cambissolo e Argissolo, Rachwal *et al.* (1997) observaram

correlações entre o dap da acácia negra com outros atributos: saturação de alumínio ($r=-0,65$), Ca + Mg ($r=0,55$) e a saturação de bases ($r=0,60$) do horizonte superficial, evidenciando, assim, que a composição do solo exerce efeitos no crescimento do povoamento dessa cultura.

O método *stepwise* resultou em um único passo, no qual somente a variável mais correlacionada entrou e se manteve no modelo, obtendo-se então a equação $AF = 18,4050 + 1,9571 P$. O ajuste apresentou um coeficiente de determinação de 50,05% e erro padrão da estimativa de 21,34% e todos os coeficientes do modelo significativos. Ainda, verificou-se que os sinais algébricos dos coeficientes da regressão foram positivos, indicando assim um aumento da área foliar sobre um acréscimo unitário de P, estando adequado à expectativa prévia, ou seja, relação direta entre essas variáveis. O valor positivo de b_1 encontrado no modelo pode ser interpretado como um aumento da área foliar na ordem de 1,9571 m² no acréscimo de 1 mg L⁻¹ de P no solo.

A relação entre os teores de P no solo e a área foliar foi evidenciada em mudas de espécies florestais. Fernandes *et al.* (2003), avaliando o efeito de diferentes doses de P e de zinco (Zn) sobre o crescimento de mudas da capuaçuzeiro em um Latossolo Vermelho Escuro, observaram que as doses de P e Zn promoveram efeitos significativos na área foliar. Na ausência do Zn ocorreu aumento linear proporcionado pelas doses de P, porém menores do que aqueles promovidos pela presença dos dois nutrientes, exceto para a dose mais elevada de P. Vieira *et al.* (2011) também observaram maior área foliar de plantas de *Campomanesia adamantium* (Cambess) O. Berg, sob a maior dose de P (380 kg ha⁻¹) e de nitrogênio (114 kg ha⁻¹). Em plantas de cinco espécies de eucalipto (*Eucalyptus pellita* F. Muell, *E. camaldulensis* Dehn, *E. citriodora* Hook, *E. cloeziana* F. Muell e *E. urophylla* St. Blake) Gonçalves e Passos (2000) também constataram tendência de aumento da área foliar nas maiores doses de P (300 mg L⁻¹).

A relação entre os teores de P no solo e a área foliar também foi constatada para outras culturas. Melo (2005) verificou para o primeiro crescimento do capim-Marandu, a área foliar aumentou até a dose máxima de P aplicada ao solo (330 mg dm⁻³) e para o segundo crescimento observou aumento de até duas vezes na área foliar quando comparada com a dose mínima (10 mg dm⁻³). Moreira *et al.* (2001) também evidenciaram maior área foliar em alface através da aplicação de doses de P e Zn. Eichler *et al.* (2008) avaliando os efeitos combinados de N em cada dose de

P verificaram um aumento da área foliar com a aplicação de P em capim-mombaça. Na ausência de aplicação de P, os aumentos em área foliar foram significativamente menores. Assim, os resultados observados no presente trabalho estão condizentes a várias pesquisas já conduzidas sobre o efeito do P na área foliar.

Vieira *et al.* (2011) destacam que o P é considerado um elemento essencial, por participar de forma direta nos compostos e reações vitais para as plantas, e indireta, pois na sua ausência a planta não completa seu ciclo de vida. Por causa de seu papel na síntese de proteínas, sua falta se reflete no menor crescimento da planta (MALAVOLTA, 1980), e esse efeito também foi constatado na área foliar da acácia negra. Deficiência de fósforo pode afetar negativamente o ciclo de Calvin, como exposto por Walker (1983).

A produção de massa seca resulta da atividade fotossintética das folhas, cuja eficiência apresenta dependência do tamanho, forma, posição e estrutura dos órgãos que realizam a fotossíntese (HERLING *et al.*, 2001). Assim, conhecer o comportamento da área foliar (órgão responsável pela maior parte da fotossíntese) em função das modificações ambientais, como as alterações nos atributos do solo, é de extrema importância, pois permite estabelecer relações e estimar a superfície fotossinteticamente ativa, a qual determinará a interceptação de luz e subsequente crescimento e produção, quer seja em volume de madeira ou biomassa. Ficou evidenciado que o P explicou somente a metade da variabilidade da área foliar, indicando assim que outros fatores também interagem, o que evidenciou a necessidade de se incluir no presente trabalho estudos sobre a relação entre a área foliar com os elementos meteorológicos.

3.5.4 Relação dos elementos meteorológicos com a área foliar

Os elementos meteorológicos relacionados com a área foliar foram: precipitação acumulada, temperatura do ar média máxima, média mínima e média, umidade relativa do ar e radiação solar global acumulada. O cálculo dessas variáveis foi realizado considerando o período desde a data do plantio até a época de avaliação dos povoamentos (TABELA 10).

TABELA 10 - VALORES DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, RIO GRANDE DO SUL E ASSOCIADOS À IDADE DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA AMOSTRADOS

Local	Idade(anos)	Precac	Tmax	Tmin	Tmed	UR	Rgac
Cristal	1	1304,50	23,77	14,16	18,96	78,48	7386,78
Cristal	3	4303,40	23,51	14,11	19,39	79,68	17928,17
Cristal	5	7470,10	23,27	13,85	17,88	79,61	30014,76
Cristal	7	9567,60	23,39	13,90	18,19	79,40	40365,41
Piratini	1	1515,80	23,11	13,61	17,73	78,82	8603,61
Piratini	3	3609,00	22,85	13,50	17,96	80,18	14470,46
Piratini	5	5811,40	23,41	14,04	18,70	79,68	24147,76
Piratini	7	9310,40	23,50	14,00	18,90	79,36	39717,80

Onde: Idade é expressa em anos; Precac = precipitação acumulada, em mm; Tmax = temperatura média máxima do ar, em °C; Tmin = temperatura média mínima do ar, em °C; Tmed = temperatura média do ar, em °C; UR = umidade relativa do ar, em %; e Rgac = radiação solar global acumulada, em MJ m⁻².

Por meio da análise de correlação linear simples, detectou-se que a radiação solar global acumulada (Rgac) foi a variável de maior correlação com a área foliar ($r=0,71$) e a segunda foi a precipitação acumulada ($r=0,69$), denotando uma relação forte para ambos os casos. A temperatura média demonstrou-se regularmente correlacionada com a área foliar ($r=0,41$) e as demais variáveis: temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar mostraram-se fracamente relacionadas (TABELA 11). Caron *et al.* (2003) também observaram que maiores correlações entre a fitomassa de alface com a radiação solar e baixas correlações com a temperatura média do ar.

TABELA 11 - CORRELAÇÃO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS COM A ÁREA FOLIAR DE INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS AMOSTRADOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Variável	Correlação	Grau da correlação
Temperatura máxima	0,17	Fraca
Temperatura mínima	0,23	Fraca
Umidade relativa	0,28	Fraca
Temperatura média	0,41	Regular
Precipitação	0,69	Forte
Radiação solar global acumulada	0,71	Forte

O método *stepwise* resultou somente em um único passo, no qual somente a variável mais correlacionada entrou e se manteve no modelo, obtendo-se então a seguinte equação: $AF = 16,1080 + 0,0004 Rgac$. O ajuste apresentou um coeficiente de determinação de 50,41% e erro padrão da estimativa de 21,27%, e todos os coeficientes do modelo significativos. Ainda, verificou-se que os sinais algébricos

dos coeficientes da regressão foram positivos, indicando assim um aumento da área foliar sobre um acréscimo unitário de R_{gac} , estando adequado à expectativa prévia, ou seja, relação direta entre essas variáveis. O valor positivo de b_1 encontrado no modelo pode ser interpretado como um aumento da área foliar de $0,0004 \text{ m}^2$ no acréscimo de 1 MJ m^{-2} de R_{gac} .

Era esperado que a variável precipitação acumulada entrasse ou fosse inserida em um segundo passo do método *stepwise*, tendo em vista sua forte correlação com a área foliar. Entretanto, ela não apresentou um coeficiente de correlação parcial significativo ($\alpha_F < 0,15$, valor fixado para a variável entrar no modelo) dado que a R_{gac} já estava no modelo.

Na literatura não foram encontrados trabalhos que simulam ou relacionam o crescimento em área foliar com a radiação solar global acumulada. Normalmente os modelos para a estimativa da área foliar têm utilizado como variável dependente os graus-dia, a qual se baseia no acúmulo térmico dentro dos limites nos quais a planta se desenvolve, definidos pelas temperaturas bases inferior e superior. Gallardo *et al.* (1996) destacam que para fins de modelagem o índice de área foliar (ou conseqüentemente a área foliar) pode ser estimado utilizando-se os graus dia e posteriormente usá-lo na finalidade de predição da fitomassa.

A radiação solar é reconhecidamente um fator ligado à produção vegetal, pois interfere diretamente na formação da fitomassa. Trabalhos apresentados por Scaife e Jones (1987), Wurr *et al.* (1988, 1992), Lopes *et al.* (2004) e Caron *et al.* (2003) também propõem equações de estimativa da fitomassa que consideram a radiação solar como sendo uma das variáveis de entrada que apresentou melhor desempenho na modelagem do crescimento da cultura da alface. Essa situação também pode ser atribuída para explicar as variações da área foliar da acácia negra.

Ficou evidenciado que tanto os elementos meteorológicos ou os atributos químicos do solo não conseguiram explicar individualmente mais que a metade da variabilidade da área foliar. Isso despertou o interesse em estudar a relação entre a área foliar com os elementos meteorológicos e os atributos químicos do solo de forma simultânea.

3.5.5 Relação entre os atributos químicos do horizonte superficial do solo e elementos meteorológicos com a área foliar

O método *stepwise* resultou em três passos, a primeira variável a entrar no modelo foi a radiação solar global acumulada (Rgac), no segundo os teores de fósforo (P), e no terceiro os teores de argila (Arg).

No primeiro passo obteve-se a equação $AF = 16,1080 + 0,0004 Rgac$, e o ajuste apresentou um coeficiente de determinação de 50,41%, erro padrão da estimativa de 21,27% e todos os coeficientes do modelo significativos. No segundo passo a equação obtida foi $AF = 12,3566 + 0,0003 Rgac + 1,6174 P$, denotando um coeficiente de determinação de 83,10%, erro padrão da estimativa de 13,60% e todos os coeficientes no modelo significativos ($p < 0,05$). A participação dessas duas variáveis já era esperada, pois como visto anteriormente, elas foram as que mais se correlacionaram com a área foliar (TABELA 12).

No terceiro passo, o teor de argila (Arg) foi a variável que apresentou o maior coeficiente de correlação parcial significativo ($\alpha_F < 0,15$, valor fixado para a variável entrar no modelo) dado que Rgac e P já estavam na equação, resultando então em: $AF = 20,0836 + 0,0004 Rgac + 1,4799 P - 0,3561 Arg$, a qual apresentou coeficiente de determinação de 93,84% e erro padrão da estimativa de 9,18%. A variável argila foi a única a apresentar o valor da significância do coeficiente maior que 5% ($\alpha_t = 0,058$) fato ligado à fraca correlação obtida entre ela com a área foliar (TABELA 13).

TABELA 12 - ESTATÍSTICA DE AJUSTE PARA OS MODELOS OBTIDOS PELO MÉTODO *STEPWISE* PARA ESTIMATIVA DA ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Modelo	R ²	R ² aj	Syx	F	α (F)	W	SW	DW
$AF = b_0 + b_1 Rg$	50,41%	42,14%	21,27%	6,099	0,048	4,37 ^{ns}	0,97 ^{ns}	1,54*
$AF = b_0 + b_1 Rg + b_2 P$	83,10%	76,34%	13,60%	12,295	0,012	6,41 ^{ns}	0,91 ^{ns}	3,08*
$AF = b_0 + b_1 Rg + b_2 P + b_3 Arg$	93,84%	89,22%	9,18%	20,317	0,007	8,00 ^{ns}	0,25 ^{ns}	2,19 ^{ns}
Modelo	Coeficientes		Syx	t	α (t)	Intervalo de confiança		
$AF = b_0 + b_1 Rgac$	b ₀	16,1078	3,96	4,07	0,007	6,4178	≤ Y ≤	25,7978
	b ₁	0,0004	0,00	2,47	0,048	0,000003	≤ Y ≤	0,0008
$AF = b_0 + b_1 Rgac + b_2 P$	b ₀	12,3566	2,80	4,41	0,007	5,1467	≤ Y ≤	19,5665
	b ₁	0,0003	0,00	3,13	0,026	0,0001	≤ Y ≤	0,0006

continua

								conclusão
	b_2	1,6174	0,52	3,11	0,027	0,2807	$\leq Y \leq$	2,9542
	b_0	20,0836	3,48	5,76	0,004	10,4083	$\leq Y \leq$	29,7589
$AF=b_0+b_1Rgac+b_2$	b_1	0,0004	0,00	5,13	0,007	0,0002	$\leq Y \leq$	0,0006
$P+b_3 Arg$	b_2	1,4799	0,35	4,17	0,014	0,4947	$\leq Y \leq$	2,4650
	b_3	-0,3561	0,13	-2,64	0,058	-0,7305	$\leq Y \leq$	0,0183

Onde: R = coeficiente de determinação; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão; F = valor de F; b_i = coeficiente do modelo; AF = área foliar; Rgac = radiação solar global acumulada, em $MJ m^{-2}$; P = teor de fósforo, em MG/L; Arg = teor de argila, em %; W = White, SW = Shapiro-Wilk, DW = Durbin-Watson.

TABELA 13 - CORRELAÇÃO DOS TEORES DE ARGILAS COM OUTROS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO OBSERVADO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Variável	Correlação	Grau da correlação	Variável	Correlação	Grau da correlação
ISMP	-0,91	Muito forte	K	0,09	Fraca
pH	-0,61	Forte	CTC Al	0,26	Fraca
CTC base	-0,20	Fraca	M. O.	0,78	Forte
Ca	-0,11	Fraca	Al	0,80	Forte
P	-0,10	Fraca	CTC pH 7	0,91	Muito forte
Mg	-0,09	Fraca	H + Al	0,92	Muito forte

Em que: pH = concentração de íons de H^+ ; IND. SMP = índice SMP; M.O. = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Al = Alumínio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; H+Al = hidrogênio + alumínio; CTC pH 7 = capacidade de troca de cátions; e % Sat. da CTC = porcentagem da saturação da CTC.

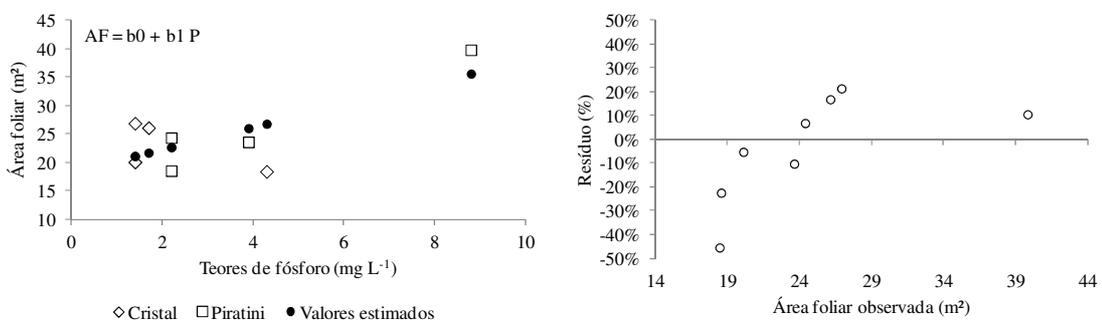
Os teores de argila no solo são fortemente correlacionados com os de alumínio (Al), e também possui uma relação muito forte com a combinação de hidrogênio + alumínio (H + Al), elementos que são considerados prejudiciais para o crescimento das plantas (TABELA 13). Correlações negativas entre os teores de Al e o dap ($r=-0,65$) foram observados em povoamentos de acácia negra por Rachwal *et al.* (1997), assim como observado entre o Al e H + Al e a área foliar ($r=-0,26$ e $r=-0,28$, respectivamente). Assim a inclusão dos teores de argila no modelo é válida, mesmo que ela apresente correlação fraca com a área foliar (-0,25). Caron *et al.* (2003) e Machado *et al.* (2008) também obtiveram as melhores equações no que se refere ao indicadores de ajuste e precisão quando todas as variáveis foram envolvidas nos modelos, inclusive com as de baixa correlação linear simples.

Verificou-se que todos os sinais algébricos dos coeficientes estão adequados à expectativa prévia, ou seja, relação direta entre a área foliar e as variáveis Rgac e P e inversa com Arg. Além disso, constatou-se que os modelos incluindo Rgac e Rgac + P não atenderam a todas as condicionantes da regressão testadas, pois o teste da independência da distribuição de resíduos foi significativo. Logo, o único que atendeu todas as condicionantes da regressão

(homocedasticidade, homogeneidade e independência) foi o modelo obtido no terceiro passo, incluindo a R_{gac} , P e Arg (TABELA 13). Ainda foi verificado, que esse modelo não detém problemas de multicolinearidade, tendo em vista que os valores de tolerância variaram entre 0,90 e 0,84 e fator de inflação da variância foi menor que 10 (variando entre 1,06 a 1,10), ou seja, as variáveis independentes que o compõem não são correlacionadas entre si.

Para eliminar o efeito das diferentes unidades de medidas das variáveis independentes e verificar o impacto relativo sobre a variável dependente foi realizada a padronização das variáveis antes da estimativa dos coeficientes do modelo $AF = b_0 + b_1 R_{gac} + b_2 P - b_3 Arg$. Assim, foi possível alcançar uma unidade comum e determinar qual variável tem maior impacto. A equação obtida: $AF = 0,6699 R_{gac} + 0,5350 P - 0,3390 Arg$ possibilitou identificar que R_{gac} é a variável de maior influência para explicar a variação da área foliar, seguida do P e da Arg , que por sua vez, foi a que tem menor peso.

Assim, foi identificado que nem o solo ou os elementos meteorológicos conseguem explicar individualmente a maioria das variações da área foliar ao longo do ciclo de crescimento da acácia negra (FIGURA 5), pois a previsão do crescimento da planta de acordo com Huang (1993) requer o conhecimento das respostas com o ambiente. Quando os fatores de solo e clima são estudados juntos, como no caso por meio do modelo: $AF = b_0 + b_1 R_{gac} + b_2 P + b_3 Arg$, o qual apresentou coeficiente de correlação múltiplo de 96,87%, bem como adequada distribuição de resíduos (FIGURA 5), torna-se uma ferramenta apropriada para explicar as variações da área foliar.



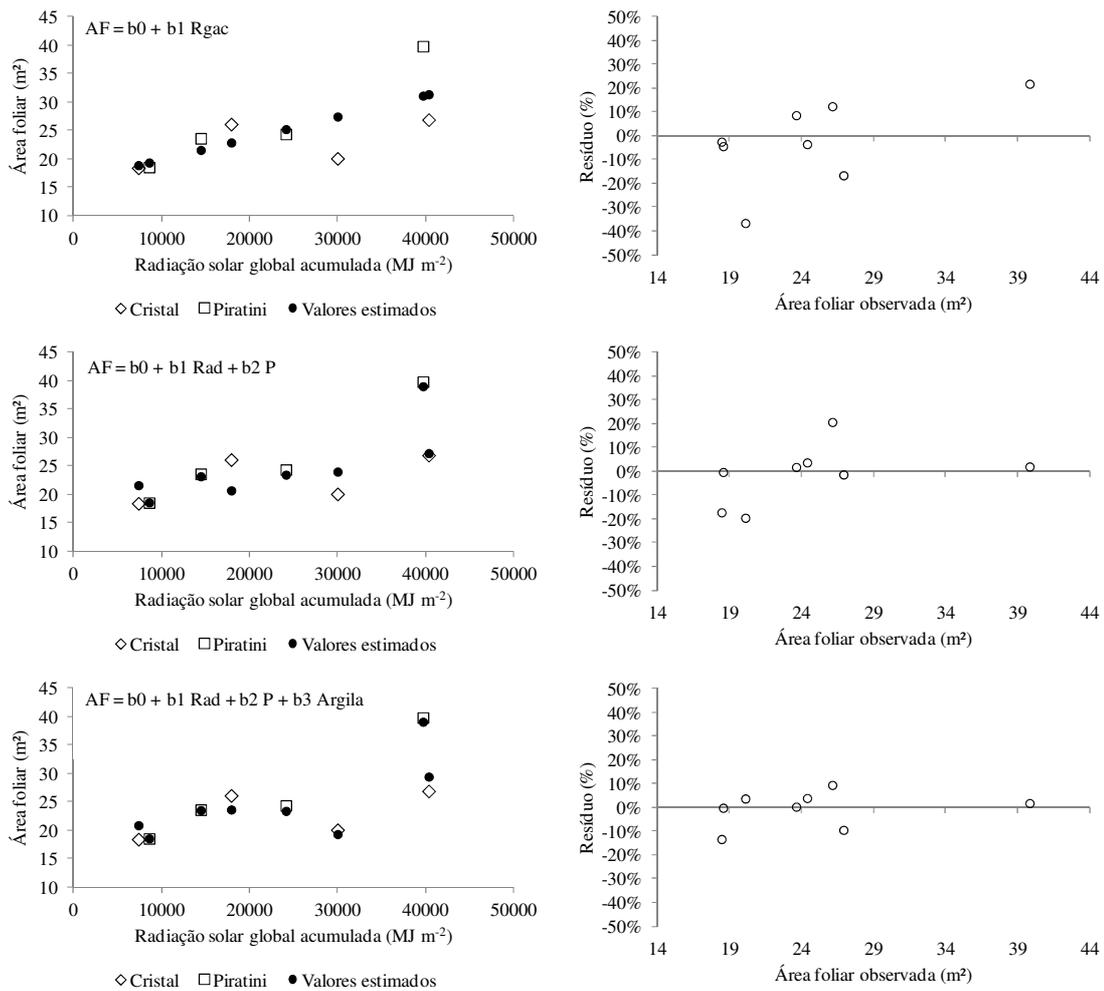


FIGURA 5 - VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS (FIGURAS A ESQUERDA) E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS (FIGURAS A DIREITA) DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ACUMULADA (Rgac) E DOS TEORES DE FÓSFORO (P) E ARGILA DO SOLO
 FONTE: O autor (2012)

Conforme Dourado Neto (1998) o modelo de crescimento e desenvolvimento de uma cultura, tem como objetivo obter informações de algumas interações planta x ambiente, maximizando assim a utilização de recursos naturais para uma dada condição de cultivo. Quando este modelo é utilizado coerentemente, torna-se uma ferramenta importante para técnicos e produtores no planejamento e na avaliação da atividade agrícola (CARON *et al.*, 2007). O modelo obtido, mesmo que com um pequeno conjunto de dados, demonstra ser adequado para simular o efeito de variações climáticas e da fertilidade do solo sobre a área foliar e, conseqüentemente, do crescimento e produção do povoamento de acácia negra.

Na equação obtida, os dados de área foliar em função da Rgac e dos teores de P e Arg foram relacionados com os respectivos locais de plantio e submetidos à análise de regressão com o emprego de variável *Dummy*. Assim, foi detectado que é

possível se ajustar somente uma única equação, pois as variáveis *Dummy* utilizadas para verificar o efeito do local de plantio não foram significativas (TABELA 14).

TABELA 14 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA REGRESSÃO AJUSTADA COM VARIÁVEL *DUMMY* (D) DA ÁREA FOLIAR EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ACUMULADA (RGAC) E DOS TEORES DE FÓSFORO (P) E ARGILA EM DO SOLO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio	α F
Modelo	5	64,3549	0,0959
Rad	1	168,8793	0,037
P	1	109,5282	0,0555
Argila	1	35,9776	0,145
D1	1	2,0123	0,6368
D2	0	---	---
Rgac * D1	1	5,3767	0,4626
Rgac * D2	0	---	---
Erro	2	6,621	
Total	7	47,8595	
Coeficiente de determinação		96,05%	
Coeficiente de variação		10,40%	

Em que α F é a área ocupada sob a curva da distribuição.

Para verificar o desempenho da equação obtida, ela foi testada a partir da entrada de um novo conjunto com quatro amostras. Esses dados são provenientes de estudo conduzido por Mochiutti (2007), no qual foram instaladas parcelas em povoamentos de acácia negra com 3 e 5 anos de idade nos municípios de Cristal e Piratini.

De posse dos valores médios de área foliar e dos teores de P e argila e do acúmulo de radiação solar global, estimou-se a área foliar com a: $AF = 20,0836 + 0,0004 Rgac + 1,4799 P - 0,3561 Arg$ e os valores estimados foram comparados aos observados pelo teste de Qui-Quadrado. O valor do Qui-quadrado não foi significativo ($\alpha=0,2277$) o que implica em não haver diferenças entre os valores observados e estimados (TABELA 15). Isso evidencia que as relações aqui obtidas podem ser aplicadas para a prognose da área foliar.

TABELA 15 - VALORES DE ÁREA FOLIAR OBSERVADOS POR MOCHIUTTI (2007) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA E ESTIMADOS PELA EQUAÇÃO OBTIDA NO PRESENTE TRABALHO, A QUAL LEVA EM CONSIDERAÇÃO A RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ACUMULADA (RGAC) E OS TEORES DE FÓSFORO (P) E ARGILA, OU SEJA: $AF = 20,0836 + 0,0004 RGAC + 1,4799 P - 0,3561 ARG$

Região	Idade (ano)	AF observada (m ²)	Rgac	P	Argila	AF estimada (m ²)
Cristal	3	17,64	9742,49	4,67	13,60	26,04

continua

						conclusão
Cristal	5	27,84	25533,81	5,33	15,70	32,60
Piratini	3	24,26	14742,49	10,67	35,67	29,07
Piratini	5	25,99	20227,57	8,67	36,70	27,93

3.6 CONCLUSÕES

A área foliar é correlacionada com a massa seca de folhas, de tal modo que a relação é muito forte.

A relação entre área foliar e a massa seca de folhas não é influenciada pelo local de plantio, mas sim pela idade do povoamento.

Os coeficientes da relação área foliar / massa seca de folhas podem ser utilizados para a estimativa da área foliar.

A área foliar varia em função da idade do povoamento e do local de cultivo.

A área foliar é correlacionada com os atributos do solo, principalmente com o teor de fósforo. Do mesmo modo, também é correlacionada com os elementos meteorológicos, especialmente com a radiação solar global acumulada.

O modelo obtido, que envolve a radiação solar global acumulada e dos teores de fósforo e argila, demonstra-se adequado para explicar as variações da área foliar.

4 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ AO LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA

4.1 INTRODUÇÃO

A interceptação da luz é o primeiro passo para desencadear uma sequência de eventos da fotossíntese que resultam na produção da biomassa florestal. Assim, todo o processo fotossintético é o resultado de uma cadeia de interações complexas que ocorrem no dossel e está associado à interceptação da radiação fotossintética, que, por sua vez, é influenciado por variáveis como o índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz, e também, de forma global, representado pelo sistema solo-floresta-atmosfera.

Landsberg (2003) destaca que para entender o crescimento florestal é preciso caracterizar os processos responsáveis por tal efeito, o que permite identificar os mecanismos que causam tais respostas, estando entre as principais variáveis a serem avaliadas a dinâmica da radiação no dossel e o índice de área foliar. Stape *et al.* (2004) complementaram que as interações entre o meio e as plantas faz parte da ecofisiologia florestal e visa compreender o crescimento da floresta por meio do conhecimento dos processos que o governa, permitindo, assim, identificar o seu manejo em sintonia com o uso dos recursos naturais.

A radiação fotossinteticamente ativa constitui uma fonte energética essencial para o crescimento e produção de qualquer espécie cultivada. De modo geral, a radiação fotossintética interceptada por uma cultura é uma função da radiação solar incidente nas plantas, do índice de área foliar e do coeficiente de extinção da luz, que expressa a influência das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel na atenuação da luz (VARLET-GRANCHER *et al.*, 1989).

A radiação solar ao atravessar o dossel vegetal sofre atenuação exponencial com o aumento do IAF (LARCHER, 2000; LONGDOZ *et al.*, 2004), ou seja, de modo similar ao descrito pela lei de Beer-Lambert-Bouguer. Assim, a atenuação da luz na cobertura vegetal é expressa pelo coeficiente de extinção, que revela o grau de diminuição da luz ao penetrar nas camadas do dossel, causada pela absorção ou espalhamento, conforme destacam Monteith (1973) e Campbell (1986). Esse

coeficiente é definido por esses autores como a área sombreada pelo dossel em uma superfície horizontal dividida pela área foliar.

A atenuação da radiação na cobertura vegetal depende, principalmente, da densidade da folhagem, do arranjo das folhas no interior da vegetação, arquitetura do dossel, ângulo existente entre a folha e a radiação incidente e do coeficiente de extinção (MONTEITH e UNSWORTH, 1990). A densidade das folhas, arquitetura do dossel e arranjo das plantas podem ser quantitativamente determinadas por meio do índice de área foliar, que foi definido por Watson (1947) como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo ($m^2 m^{-2}$), sendo, portanto, adimensional.

Essa variável é determinante nos processos produtivos, estando relacionada com a interceptação da radiação fotossintética, troca de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, evapotranspiração, superfície assimiladora de dióxido de carbono, produtividade da cultura, estratégias da planta no seu processo evolutivo, e de importância para vários modelos de produção primária e modelos globais de clima, hidrologia, biogeoquímica e ecologia (NORMAN e CAMPBELL, 1989; LANG e McMURTRIE, 1992; CARUZZO e ROCHA, 2000; BRÉDA, 2003; XAVIER e VETTORAZZI, 2003; MÜLLER *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2005).

Do ponto de vista dos cultivos de acácia negra, é importante quantificar o índice de área foliar bem como o coeficiente de extinção de luz, pois a partir dessas informações, torna-se possível, a utilização dessas, como variáveis de entrada em outros estudos, tais como a modelagem do crescimento em função da eficiência de conversão da radiação fotossintética ou de uma série de outros modelos ecofisiológicos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar o índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz em povoamentos de acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) ao longo do ciclo em dois locais no estado do Rio Grande do Sul.

4.2 MATERIAS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram avaliados plantios comerciais de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) situados nas regiões de

maior concentração de plantios no estado do Rio Grande do Sul, nos municípios de Cristal e Piratini. Em cada município foram estudados povoamentos em uma sequência de idades após o plantio: um, três, cinco e sete anos, de forma a abranger toda a rotação praticada pelos silvicultores.

No município de Cristal, os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul 30° 55' S e 52°10' W e os de Piratini sob coordenadas centrais Sul 31° 24' S e Oeste 52°57' W.

As características químicas do horizonte superficial dos solos dos povoamentos estão apresentadas na Tabela 8. Os solos do município de Cristal foram classificados como Neossolo Regolítico distrófico e os de Piratini como Neossolo Litólico distrófico, conforme estudo realizado por Mochiuti (2007) para os mesmo locais.

Para as duas regiões os plantios foram estabelecidos, tanto em áreas novas (primeira rotação), como em áreas de reformas da plantação (segunda rotação). Para todos os casos, o preparo do solo foi realizado na linha de plantio (cultivo mínimo), com uma subsolagem com três hastes a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens. Os plantios foram realizados com espaçamento de 3 x 1,75 metros (1.904 plantas por hectare) para o ano um e 3 x 1,5 metros para as demais idades (2.222 plantas por hectare) e no momento dessa operação foi adicionado 50 gramas de NPK (5-30-15) por planta.

4.3 ORIGEM DOS DADOS

O estudo compreendeu a amostragem de 8 povoamentos (4 em cada local de estudo), a instalação de 24 parcelas (3 em cada povoamento) e a amostragem de 48 árvores (2 árvores por parcela).

Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte nas quais foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior da pendente. O tamanho das parcelas foram de 9 x 16 metros para os povoamentos com um ano de idade e 9 x 14 metros para as demais idades, equivalendo a quatro linhas de plantio e 10 plantas em cada linha.

Nas parcelas todas as plantas foram mensuradas quanto à circunferência a altura do peito utilizando-se fita métrica graduada. As duas árvores que se aproximaram da média aritmética da circunferência a altura do peito em cada parcela foram selecionadas para avaliação de sua biomassa, área foliar, altura, volume e diâmetro da copa. Em cada parcela foi também avaliada a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o solo.

A mensuração da biomassa foi realizada por compartimento da árvore: madeira do tronco + casca, galhos vivos, galhos mortos, folhas e flores + frutos, sendo cada separado e pesado para a determinação da biomassa úmida (FIGURA 6) com balança digital (*Portable Eletronic Scale*), com acurácia de 0,5 gramas.

Para a determinação da biomassa seca, foram retiradas amostras de aproximadamente 200 gramas dos compartimentos galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos e imediatamente pesadas para determinação da massa úmida (FIGURA 6). Já para o fuste e casca foram retirados 5 discos de 2 centímetros de espessura ao longo do fuste de forma a abranger 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (considerada como diâmetro de topo de 4 cm). Posteriormente, essas amostras foram secas em estufa de circulação (FIGURA 6) e renovação de ar a 75°C e, após a constatação de massa constante, o material foi novamente pesado, possibilitando, assim, a obtenção do teor de umidade e, conseqüentemente, a biomassa seca por meio da expressão:

$$Bi = \frac{MU_i * MS_i}{MUa_i} \quad (1)$$

Em que:

Bi = biomassa seca de um dado compartimento, em kg;

MUi= massa fresca de um dado compartimento, em kg;

MS_i= massa seca da amostra, em kg;

MUa_i= massa fresca da amostra, em kg.

A determinação da biomassa total foi realizada pela somatória da biomassa seca de todos os compartimentos (madeira do tronco + casca, galhos vivos, galhos mortos, folhas e flores + frutos).

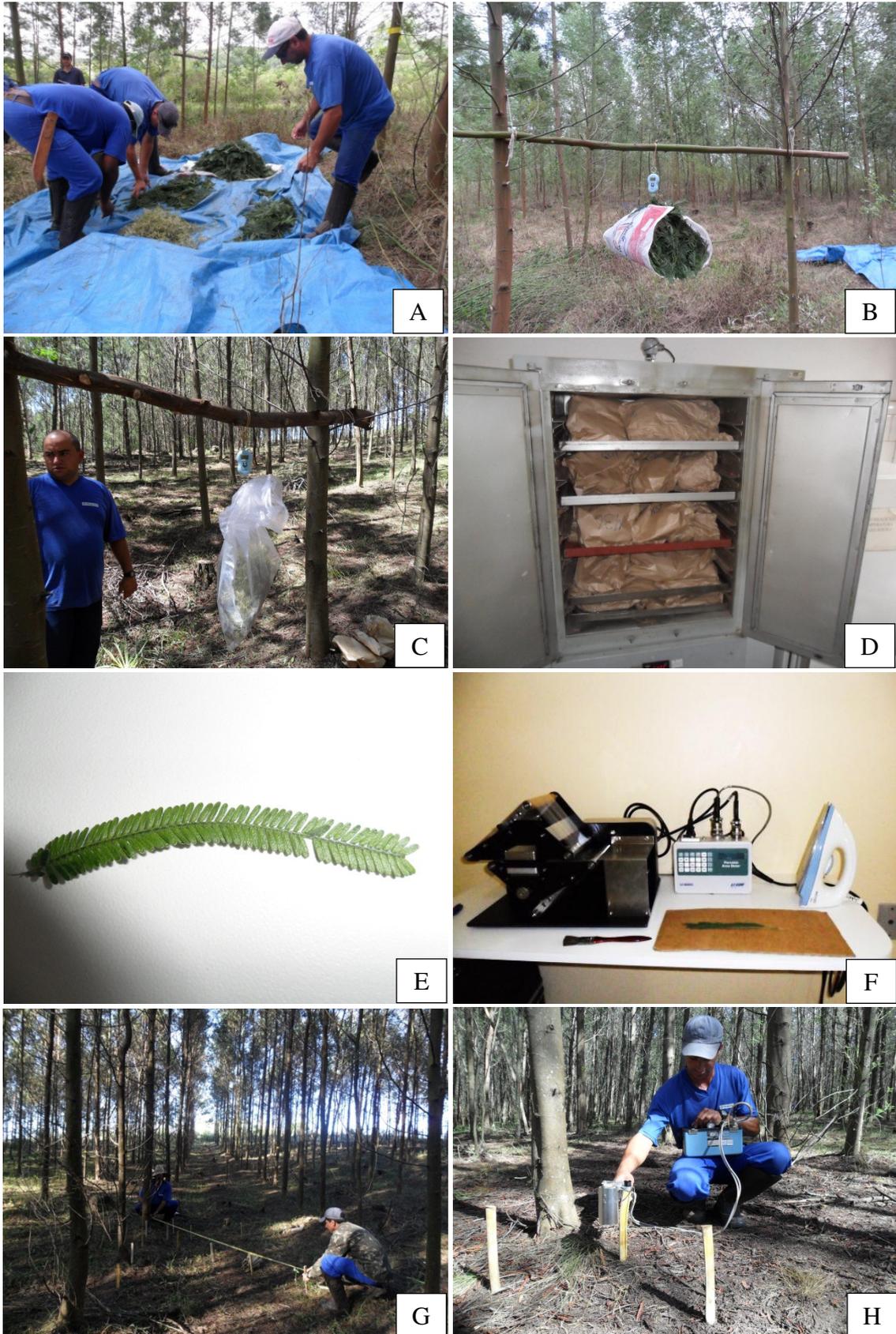


FIGURA 6 - MENSURAÇÃO DA BIOMASSA DE FOLHAS, ÁREA FOLIAR EM RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA. SEPARAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DA BIOMASSA (A), PESAGEM DA BIOMASSA DE FOLHAS (B), PESAGEM DA AMOSTRA DE FOLHAS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE (C), SECAGEM DA AMOSTRA (D), FOLHA ESTENDIDA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA FOLIAR (E), INTEGRADOR

DE ÁREA FOLIAR (F), INSTALAÇÃO DOS PONTOS DE LEITURAS DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (A 30 CM DE ALTURA DA SUPERFÍCIE) (G), LEITURAS DA RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA (H)
 FONTE: O autor (2012)

Para a determinação da área foliar foram retiradas três amostras de 50 gramas cada, sendo realizada a amostragem de folhas ao longo da copa da árvore. Os folíolos foram separados do pecíolo e ráquis e estendidos para a obtenção de uma superfície totalmente aberta (FIGURA 6), utilizando-se, para tanto, uma prancha de ferro aquecida a 65° C, para então determinar a área foliar utilizando-se um integrador (3000 *Canopy Analyser, Li-Cor*) (FIGURA 6). Ao final do processo, todo o material (pecíolo, ráquis e folíolo) foi seco em estufa de circulação e renovação do ar a 65° C, e após a constatação da massa constante foi pesado em balança analítica. Assim, a área foliar da planta foi calculada pela expressão:

$$AF = \frac{BF * AF_a}{BS_a} \quad (2)$$

Em que:

AF = área foliar em m²;

BF = biomassa seca das folhas, em Kg;

AF_a = área foliar da amostra, em m²;

BS_a = biomassa seca da amostra de folhas, em kg.

A altura total e o diâmetro da copa foram mensurados, utilizando uma trena, logo após o corte da árvore. O diâmetro da copa foi medido em duas posições opostas a 90° no sentido horizontal na base da copa e a partir daí a cada metro até atingir a sua altura total. Assim, o diâmetro da copa foi considerado como a maior largura da copa (média das duas posições opostas) obtida após sucessivas medições ao longo da copa.

O cálculo do volume de copa foi realizado utilizando a seguinte expressão:

$$vc = \left(\frac{a_1 + a_2}{2} \right) l + \left(\frac{a_2 + a_3}{2} \right) l + \dots + \left(\frac{a_{n-1} + a_n}{2} \right) l \quad (3)$$

Em que:

vc = somatório dos volume até a última seção da copa (m³);

a₁ = área da copa da seção 1 (m²);

a₂ = área da copa da seção 2 (m²);

a₃ = área da copa da seção 3 (m²);

a_{n-1} = área da copa da penúltima seção (m²);

a_n = área de copa da última seção (m²);

l = comprimento da seção (m).

Para o cálculo da área transversal da copa em cada seção (a_i) foi utilizada a seguinte expressão:

$$a = \frac{\pi * dc^2}{4} \quad (4)$$

Em que:

a = área transversal da copa (m^2);
 dc = diâmetro da copa da seção correspondente (m).

A última seção mensurada foi considerada um cone, utilizando então para o cálculo do volume a fórmula do cone de revolução, ou seja:

$$V_{co} = \frac{1}{3} * a * lc \quad (5)$$

Em que:

v_{co} = volume do cone da copa (m^3);
 a = área transversal da última seção “n” (m^2);
 lc = comprimento do cone.

O volume total da copa de cada indivíduo foi calculado pela soma do volume de todas as seções mais o volume do cone.

A avaliação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) consistiu em realizar 225 leituras utilizando-se um piranômetro (*LI-COR 1600*) ao longo de um dia (às 7h:30min, 9h, 12h, 15h, 16h:30min) no interior do povoamento em cada idade e em cada região, ou seja, 450 mensurações por idade.

Os pontos de avaliação foram instalados sistematicamente no interior de cada parcela em três sentidos: um situado na linha de plantio (1), outro na entre linha do plantio (2) e o terceiro formando um ângulo de 45° entre os pontos 1 e 2. Em cada sentido de avaliação foram fixadas cinco estacas (com altura de 28 centímetros a partir do nível do solo), distantes 75 centímetros entre si (FIGURA 6). A primeira estaca foi fixada a 38 cm da árvore de diâmetro médio da parcela.

As leituras dentro do povoamento foram realizadas a 30 centímetros de altura da superfície (FIGURA 6), já as leituras fora do povoamento, ou seja, as RFAs incidentes sobre o povoamento foram realizadas em locais abertos por meio de cinco determinações antes e cinco depois de cada avaliação no interior do povoamento (conforme o horário de medição).

A partir das leituras dentro e fora do povoamento foi calculada a radiação fotossintética que atinge a superfície do solo, ou seja:

$$RF_{Ass} = \frac{RF_{At}}{RFAi} 100 \quad (6)$$

Em que:

RF_{Ass} = radiação fotossintética que atinge o solo (%);

RF_{At} = radiação fotossinteticamente ativa transmitida pelo dossel que atinge a superfície do solo;

RFA_i = radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o povoamento.

4.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

O índice de área foliar (IAF) foi calculado pela razão entre a área foliar média em cada parcela e o espaçamento do cultivo, ou seja:

$$IAF = \frac{AF}{ASE} \quad (7)$$

Em que:

IAF = índice de área foliar, adimensional;

AF = área foliar média das duas plantas mensuradas por parcela, em m²;

ASE = área de solo explorada pela planta, ou seja, espaçamento de cultivo.

O coeficiente de extinção de luz foi calculado adotando a teoria da lei de Beer, a qual relaciona que a luz solar ao atravessar as várias camadas de folhas justapostas de um dossel vegetativo tem sua intensidade decrescida exponencialmente com o aumento do grau de cobertura vegetal. Assim, o coeficiente médio de extinção (K) foi obtido por:

$$k = - \frac{\ln\left(\frac{RF_{At}}{RFAi}\right)}{IAF} \quad (8)$$

Em que:

K = coeficiente de extinção de luz, adimensional;

RF_{At} = radiação fotossinteticamente ativa transmitida pelo dossel que atinge a superfície do solo; e

RFAi = radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o povoamento.
IAF = índice de área foliar, adimensional;
Ln = logaritmo natural.

O índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz foram analisados utilizando-se a estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e intervalo de confiança), possibilitando assim ter uma análise exploratória. Os valores, de índice de área foliar e coeficiente de extinção de luz, observados neste trabalho foram comparados com as médias apresentadas na literatura pela análise de médias de uma amostra com valor fixo utilizando-se o teste t.

O índice de área foliar e coeficiente de extinção de luz também foram submetidos à análise de variância, consistindo o fator de estudo a combinação local de plantio *versus* idade do povoamento. Inicialmente, foram testadas as pressuposições básicas da análise de variância (homogeneidade) através do teste de Bartlett, para então efetuar a análise de variância e o teste F. Quando algum fator de estudo demonstrou-se significativo ($p < 0,05$) seus efeitos foram desmembrados por meio do teste de comparação de médias de Tukey e ainda, quando o fator idade foi significativo, foi realizada análise de regressão e o teste F indicou o grau do polinômio a ser utilizado.

Por fim, foi verificada a relação entre coeficiente de extinção de luz com as variáveis: altura, diâmetro de copa, volume de copa, biomassa de galhos, biomassa de folhas, biomassa total, área foliar e índice de área foliar. A relação foi estabelecida por meio da análise de correlação de Pearson, que, por sua vez foi avaliada qualitativamente quanto à intensidade utilizando os critérios propostos por Callegari-Jacques (2003).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estatísticas obtidas para todos os valores encontrados de índice de área foliar (IAF) e coeficiente de extinção de luz, sem levar em consideração a idade do povoamento e o local de plantio, estão apresentados na TABELA 16. O (IAF) médio foi de 5,35, para um intervalo de confiança variando de 4,63 a 6,07. O valor mínimo

observado foi de 3,25 e o máximo de 9,10, apresentando um coeficiente de variação de 31,80%.

TABELA 16 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ AO LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA (7 ANOS) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Estatística	Índice de área foliar	Coeficiente de extinção de luz (K)
Média	5,35	0,28
Variância	2,90	0,001
Desvio padrão	1,70	0,04
Erro padrão	0,35	0,007
Mínimo	3,25	0,21
Máximo	9,10	0,33
Intervalo de confiança ($\alpha=5\%$)	$4,63 \leq \mu \leq 6,07$	$0,26 \leq \mu \leq 0,29$

Fonte: O autor (2012)

Já o coeficiente de extinção de luz (K) apresentou uma média de 0,28, para um intervalo de confiança variando de 0,26 a 0,29. O coeficiente de variação foi de 13,07%, para um valor mínimo de 0,21 e máximo de 0,33. Lambers *et al.* (1998) destacam que o K tende a ser baixo para folhas predominantemente eretas, mas é alto para folhas arranjadas horizontalmente, principalmente para folhas ou folíolos de maior tamanho, ou seja, os resultados observados são coerentes. Baixos K são mais efetivos na transferência de radiação para o interior do dossel, resultando em melhor aproveitamento da radiação pelo dossel como um todo.

Os valores de K foram estatisticamente menores aos relatados na literatura para diversas espécies (TABELA 17). Diferenças nos valores de K aqui revelados e os constatados na literatura (embora que o IAF seja diferente) são atribuídos a uma série de fatores, tais como a composição botânica, morfológica, disposição e ângulo das folhas e estrutura do dossel. Essas características morfológicas e estruturais determinam a atenuação da luz ao atravessar as camadas do dossel vegetal, ou seja, define o K, como foi observado por Monteith e Unsworth (1990).

TABELA 17 - TESTE *t* PARA COMPARAÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA COM MÉDIAS APRESENTADAS NA LITERATURA

Espécie	Autor	K	α
<i>Eucalyptus globulus</i>	Gazarini <i>et al.</i> (1990)	0,50	6,06E-20
Diversas	Vose <i>et al.</i> (1994)	0,62	3,47E-24
<i>Eucalyptus globulus</i>	Sands e Landsberg (2002)	0,50	6,06E-20
<i>Eucalyptus grandis x urophylla</i>	Stape <i>et al.</i> (2004)	0,40	3,05E-14

continua

		conclusão
	Silva (2006)	0,47 1,55E-18
	Borges (2009)	0,50 6,06E-20
	Rascon (2012)	0,47 1,55E-18

Em que α = área ocupada sob a curva da distribuição.

FONTE: O autor (2012)

Já os valores de IAF foram para alguns casos estatisticamente maiores, outros menores e outros iguais aos relatados na literatura para diversas espécies (TABELA 18). O IAF é uma variável que expressa a densidade das folhas na vegetação, sendo uma medida adimensional da cobertura vegetal, dada pela razão entre a soma das áreas das folhas e a área de solo ocupada pela planta. Desse modo, o IAF depende de uma série de fatores, tais como o sítio, idade do povoamento, espaçamento de cultivo e da espécie, o que conduz aos diferentes valores de IAF constatados.

TABELA 18 - TESTE *t* PARA COMPARAÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA COM MÉDIAS APRESENTADAS NA LITERATURA

Espécie	Autor	IAF	α
<i>Pinus strobus</i>	Vose and Swank (1990)	5,5	6,72E-01
	Dye e Olbrich (1993)	4,5	2,23E-02
<i>Eucalyptus grandis</i>	Kallarackal & Somen (1997)	2,75	1,31E-07
	Xavier <i>et al.</i> (2002)	2,86	2,66E-07
	Lima (2003)	3,14	1,70E-06
<i>Eucalyptus globulus</i>	Hingston <i>et al.</i> (1998)	2,3	8,33E-09
<i>Abies balsamea</i>	Hunt <i>et al.</i> (1999)	3,0 – 13,0 ($\bar{x} = 8$)	9,64E-08
<i>Eucalyptus nitens</i>	Pinkard <i>et al.</i> (1999)	6	7,44E-02
<i>Picea abies</i>	Kußner e Mosandl (2000)	6,2 – 25,5 ($\bar{x} = 16$)	5,11E-20
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Thomas e Winner (2000)	8,6	2,65E-09
<i>Quercus petraea</i>	Granier <i>et al.</i> (2000)	6	7,44E-02

α F = área ocupada sob a curva da distribuição.

FONTE: O autor (2012)

Além disso, os valores de IAF também dependem da maneira de como foram mensurados, ou seja, por método direto ou indireto (DAUGHTRY, 1990; CHERRY *et al.*, 1998; MACFARLANE *et al.*, 2000; JONCKHEERE *et al.*, 2004; WEISS *et al.*, 2004). De modo geral os diretos são baseados por meio da mensuração direta das folhas por diferentes técnicas (são mais acurados) e os indiretos usualmente baseados na medição da atenuação de radiação pelo dossel. Alguns trabalhos relatam que o método indireto tende a subestimar o IAF, tais como de MacFarlane *et al.*(2007), que trabalhando com instrumentos óticos, encontraram

uma variação de estimativas do IAF inferiores a 55% em plantios de *Eucalyptus globulus* Labill.. Entre as razões para subestimativa do IAF por meio desse método, está a distribuição não aleatória dos elementos foliares dentro do dossel, distribuição angular da inserção das folhas e a distribuição horizontal homogênea das folhas no dossel (CHEN *et al.*, 1991; BREDA, 2003; DOVEY e DU TOIT, 2006). Caso essa situação fosse aplicada para os valores de IAF observados pelo método indireto por Kallarackal e Somen (1997), Xavier *et al.* (2002) e Lima (2003), os valores médios de IAF obtidos pelo método neste trabalho, seriam pelo menos iguais estatisticamente.

Na TABELA 19 estão apresentados os resultados da análise de variância do IAF e do K e o valor de Qui-Quadrado (χ^2) referente ao teste de Bartlett. Os valores χ^2 não foram significativos, indicando que as variâncias dos fatores de estudo (local de plantio e idade do povoamento) são homogêneas, não requerendo a transformação dos dados.

TABELA 19 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio	
		(IAF)	K
Efeito principal			
Local de plantio	1	4,04260*	0,00042 ^{ns}
Idade do povoamento	3	15,58790*	0,00597*
Local de plantio * idade do povoamento	3	3,39378*	0,00264 ^{ns}
χ^2		8,52 ^{ns}	6,96 ^{ns}
Coeficiente de determinação		91,49%	66,32%
Coeficiente de variação		11,12%	10,34%
Efeito simples			
	1	0,0006 ^{ns}	
Idade do povoamento (anos)	3	0,47602 ^{ns}	
	5	1,36327 ^{ns}	
	7	12,38407*	
Local de plantio	Cristal	4,09416*	
	Piratini	44,66257*	

* = significativo a 5% de probabilidade e ns = não significativo.

FONTE: O autor (2012)

A análise de variância revelou que para o IAF a interação dos fatores local de plantio e idade do povoamento foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), indicando que seus efeitos não são independentes. Os fatores principais, local de

plantio e idade do povoamento também foram significativos. Para o K foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) somente para a idade do povoamento, ou seja, seu efeito é dependente somente da idade do povoamento (TABELA 19).

As médias do IAF estão apresentadas na Tabela 20 e Figura 7. Para o município de Cristal os valores de IAF tenderam a apresentar as maiores médias já no terceiro ano, decrescendo no quinto e, a partir desse ponto, novamente os valores IAF tenderam a ser maiores, chegando aos níveis máximos no sétimo ano, no qual a média foi idêntica à observada no povoamento com 3 anos de idade. Assim, os povoamentos com 3 e 7 anos de idade foram os que apresentaram as maiores médias do IAF e não diferiram estatisticamente entre si. Já para o município de Piratini o IAF tendeu a aumentar até o terceiro ano e estabilizou até o quinto, quando as médias apresentaram-se semelhantes (povoamentos com 3 e 5 anos). O povoamento com 7 anos de idade apresentou a maior média de IAF, sendo superior às demais. Esse comportamento diferente ao longo das idades dos povoamentos e entre os locais de plantio determinaram a interação, ou seja, local de plantio *versus* idade do povoamento ser significativa.

TABELA 20 - TESTE DE TUKEY PARA COMPARAR AS MÉDIAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Local de plantio	Idade do povoamento (anos)			
	1	3	5	7
Cristal	3,52aC	5,81aA	4,46aB	5,98bA
Piratini	3,53aC	5,25aB	5,42aB	8,85aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

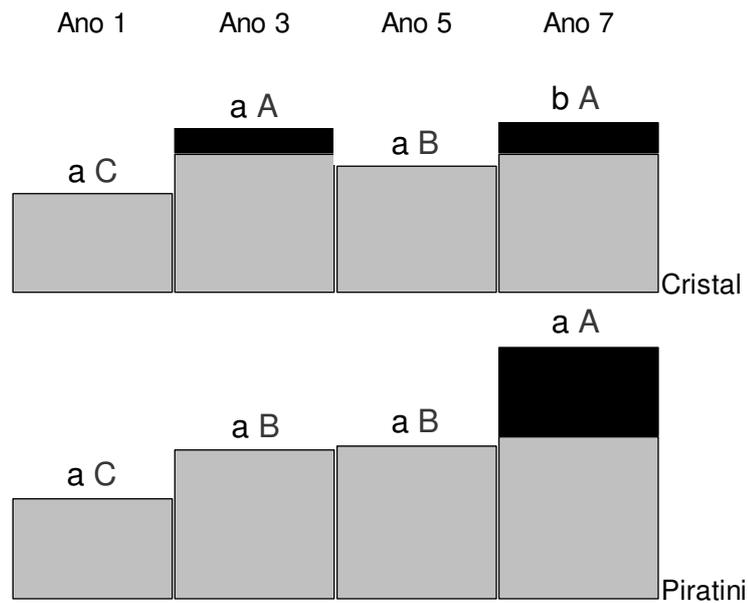
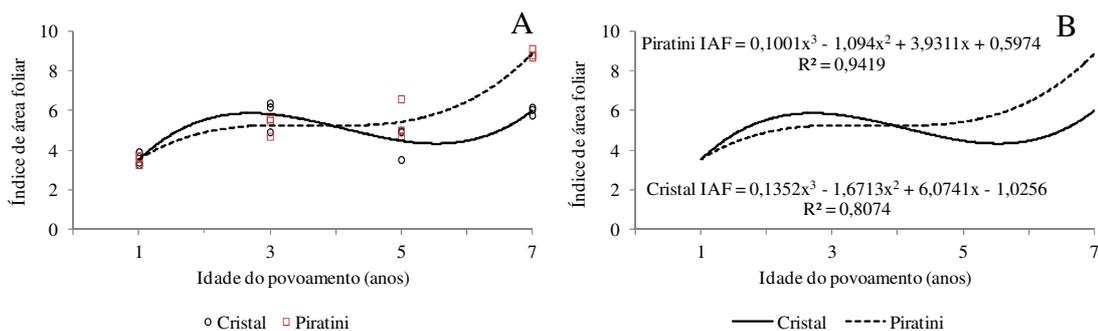


FIGURA 7 - ANÁLISE DAS MÉDIAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE MÉDIAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA MINÚSCULA NA VERTICAL E MAIÚSCULA NA HORIZONTAL, NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE PELO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE

Dentro da mesma idade foram observadas diferenças estatísticas entre os locais de plantio somente nos povoamentos com 7 anos de idade, conforme os efeitos simples da ANOVA (TABELA 19). Aquela estabelecido no município de Piratini apresentou o maior valor médio de IAF (TABELA 20).

Com base nesses resultados pode-se afirmar que, para o uso de valores médios de IAF, é necessário considerar o local de plantio e a idade do povoamento. Esses podem ser oriundos das regressões ajustadas para representar a relação entre o IAF e a idade do povoamento (FIGURA 8). A relação entre as variáveis foi representada por equações lineares de terceiro grau (TABELA 21), que explicam 80,74% e 94,19% as variações da área foliar em função da idade para os municípios de Cristal e Piratini, respectivamente.



C

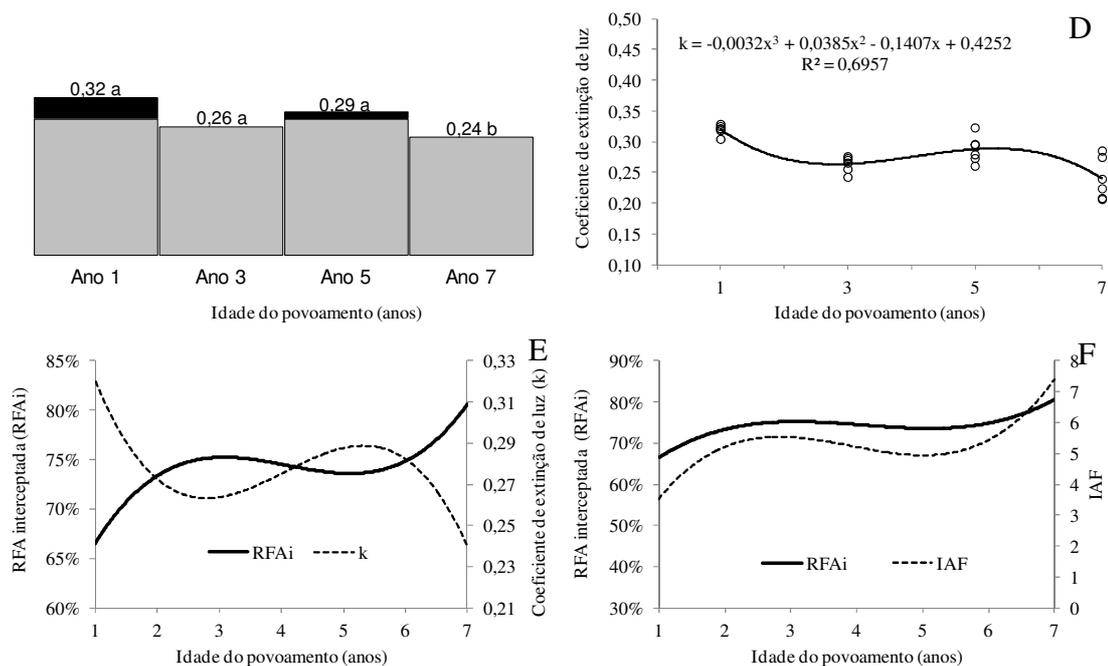


FIGURA 8 - TENDÊNCIAS DO ÍNDICE ÁREA FOLIAR (A E B), VALORES MÉDIOS DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (C), SENDO QUE MÉDIAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE PELO TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE, TENDÊNCIA DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (D), RELAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (E) E RELAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA E O ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (F) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

As diferenças do IAF entre os locais e ao longo das idades dos povoamentos são as mesmas observadas e apresentadas para a variável área foliar no primeiro capítulo desta pesquisa, já que o IAF é uma constante em função da área foliar da planta em relação à área de solo explorada por ela (espaçamento de cultivo).

TABELA 21 - TESTE F PARA IDENTIFICAR O GRAU DA EQUAÇÃO PARA DESCREVER AS TENDÊNCIAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Local de plantio	Grau da equação	Grau de liberdade	Quadrado médio
Índice de área foliar			
Cristal	Primeiro	1	5,47828*
Cristal	Segundo	1	0,46021 ^{ns}
Cristal	Terceiro	1	6,345400*
Piratini	Primeiro	1	38,97816*
Piratini	Segundo	1	2,21880*
Piratini	Terceiro	1	3,46561*
Coeficiente de extinção de luz			
	Primeiro	1	19,06754*
Ambos	Segundo	1	9,21287*
	Terceiro	1	15,24197*

* = significativo a 5% de probabilidade e ns = não significativo.

Em alguns estudos conduzidos para avaliar o IAF ao longo do ciclo da cultura, tais como o de Xavier *et al.* (2002) e Almeida e Soares (2003) em povoamentos de eucalipto, os autores observaram que o IAF (obtido por método indireto) tendeu a diminuir ao longo da idade do povoamento, sendo as maiores médias observadas entre 3 e 4 anos, diminuindo então até o final da rotação. Já Linhares *et al.* (2000), em plantações de pinus não observaram correlação significativa entre IAF e idade, ou seja, não apresentou uma tendência definida.

Para avaliar os valores de IAF obtidos neste trabalho, eles foram comparados com dados de um estudo conduzido por Mochiutti (2007) em povoamentos de acácia negra, tendo a comparação sido realizada por meio da análise de médias de uma amostra com valor fixo pelo teste t. A área foliar foi obtida utilizando-se os coeficientes da relação massa de folhas / área foliar observado para o presente conjunto de dados, e o índice de área foliar foi calculado utilizando-se então a área foliar estimada e o espaçamento de 3 m x 1,5 m.

Os resultados obtidos estão apresentados na FIGURA 9, e foi observada diferença significativa somente entre os povoamentos com 5 anos de idade ($\alpha=0,021$). Nas demais idades, 3 e 7 anos, as médias apresentaram-se estatisticamente iguais ($\alpha=0,627$ e $\alpha=0,663$, respectivamente). Deve-se considerar que se a comparação entre as médias fosse realizada a 1% de probabilidade todas elas seriam declaradas estatisticamente iguais, reforçando que para uma espécie, quando cultivada nas mesmas condições de sítio, o IAF tende ser semelhante. Porém, em algumas situações, tais como a ocorrência de déficit hídrico, a expressão do material genético utilizado, variação em algum atributo químico do solo, o menor acúmulo de radiação solar global, podem conduzir a diferentes valores de IAF, como observado entre os povoamentos com 5 anos de idade.

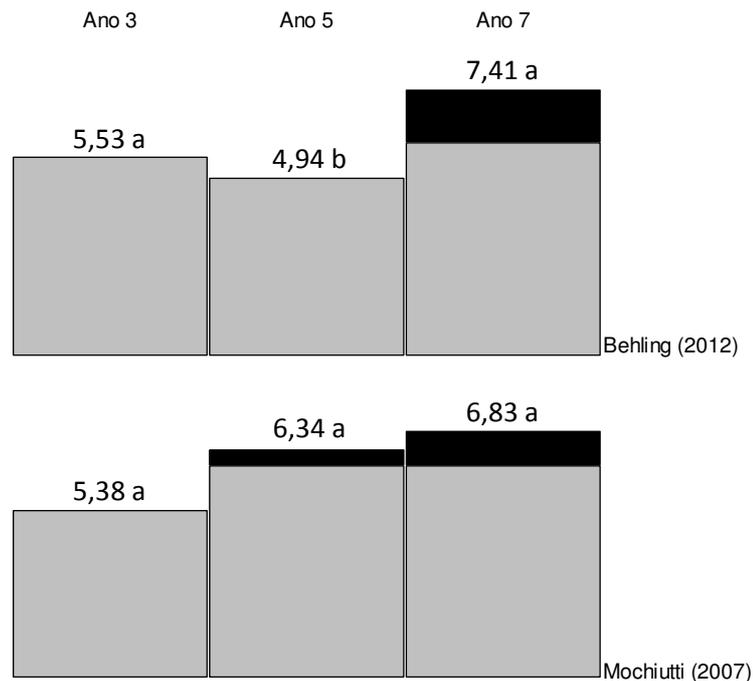


FIGURA 9 - ANÁLISE DE MÉDIAS POR MEIO DO TESTE t PARA COMPARAR VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA AO LONGO DO CICLO DE CULTIVO. MÉDIAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA NA COLUNA NÃO DIFEREM ESTATISTICAMENTE PELO TESTE DE t A 5% DE PROBABILIDADE
 FONTE: O Autor (2012)

As médias do K estão apresentadas na FIGURA 8. Os povoamentos com 1, 3 e 5 anos de idade apresentaram médias semelhantes entre si e superior à observada nos povoamentos com 7 anos de idade. Esse comportamento reflete o que foi observado ao longo dos anos (destacado no primeiro capítulo do presente trabalho), que a relação entre massa específica de folha (dada pela massa dos folíolos) com pecíolo + ráquis tende a diminuir, isso porque uma parte das pinas cai dos folíolos. Isso ocasionou a formação de diferentes grupos (conforme a idade do povoamento em anos) dessa relação, destacando-se entre eles 1x3x5, 1x3, 3x5, 5x7. Se for considerado o grupo 1x3x5 *versus* 7 o resultado é consistente ao observado com o K, já que a formação dos grupos é um resultado direto da modificação da folha e que, por consequência, essa alteração também contribui na mudança de sua geometria e também na estrutura do dossel. Consequentemente, essas mudanças alteram o valor de k, pois essa constante adimensional depende de uma série de fatores e entre eles a das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel vegetal.

A relação entre K e a idade do povoamento foi representada por equação linear de terceiro grau (TABELA 21), que explica 69,57% de sua variação em função

da idade do povoamento (FIGURA 8). Foi observado para o IAF que os coeficientes b_1 , b_2 e b_3 , que expressam os coeficientes angulares de cada intervalo de tempo, para o presente caso, apresentaram os mesmos sinais (positivos para b_1 e b_3 e negativo para b_2), o que indica que ambos os locais de plantio seguiram o mesmo padrão de tendência, entretanto em intensidades diferentes. Já o K apresentou sinais inversos para os mesmos coeficientes quando comparado com o IAF, ou seja, negativos para o b_1 e b_3 e positivo para o b_2 , ou seja, são inversamente proporcionais. Essa condição é coerente, já que a atenuação de luz pelo dossel vegetal é dada pela densidade de folhas (que pode ser expressa pelo IAF) e também pelas características geométricas das folhas e do dossel e das propriedades óticas das folhas.

Ainda, foram verificadas as relações entre o K com as variáveis: altura (h), diâmetro de copa (dc), volume de copa (vc), biomassa de galhos (BG), biomassa de folhas (BF), biomassa total (BT), área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF) (TABELA 22). Foram observadas tendências negativas entre o K com todas as variáveis, sendo essa relação muito forte com o IAF e AF, forte com BF, vc, h, BG, BT e regular com o dc (FIGURA 10).

TABELA 22 - CORRELAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) E COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ (K) COM A ÁREA FOLIAR (AF), ALTURA TOTAL (h), VOLUME DE COPA (vc), BIOMASSA DE GALHOS (BG), BIOMASSA DE FOLHAS (BF), BIOMASSA TOTAL (BT) E DIÂMETRO DE COPA (dc) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

	AF	IAF	K	H	vc	BG	BF	BT	dc
AF	1,00								
IAF	0,99	1,00							
K	-0,90	-0,92	1,00						
H	0,70	0,76	-0,70	1,00					
Vc	0,73	0,78	-0,75	0,74	1,00				
BG	0,77	0,80	-0,70	0,92	0,70	1,00			
BF	1,00	0,99	-0,89	0,74	0,72	0,81	1,00		
BT	0,74	0,76	-0,65	0,94	0,65	0,95	0,78	1,00	
Dc	0,43	0,51	-0,52	0,55	0,83	0,48	0,43	0,41	1,00

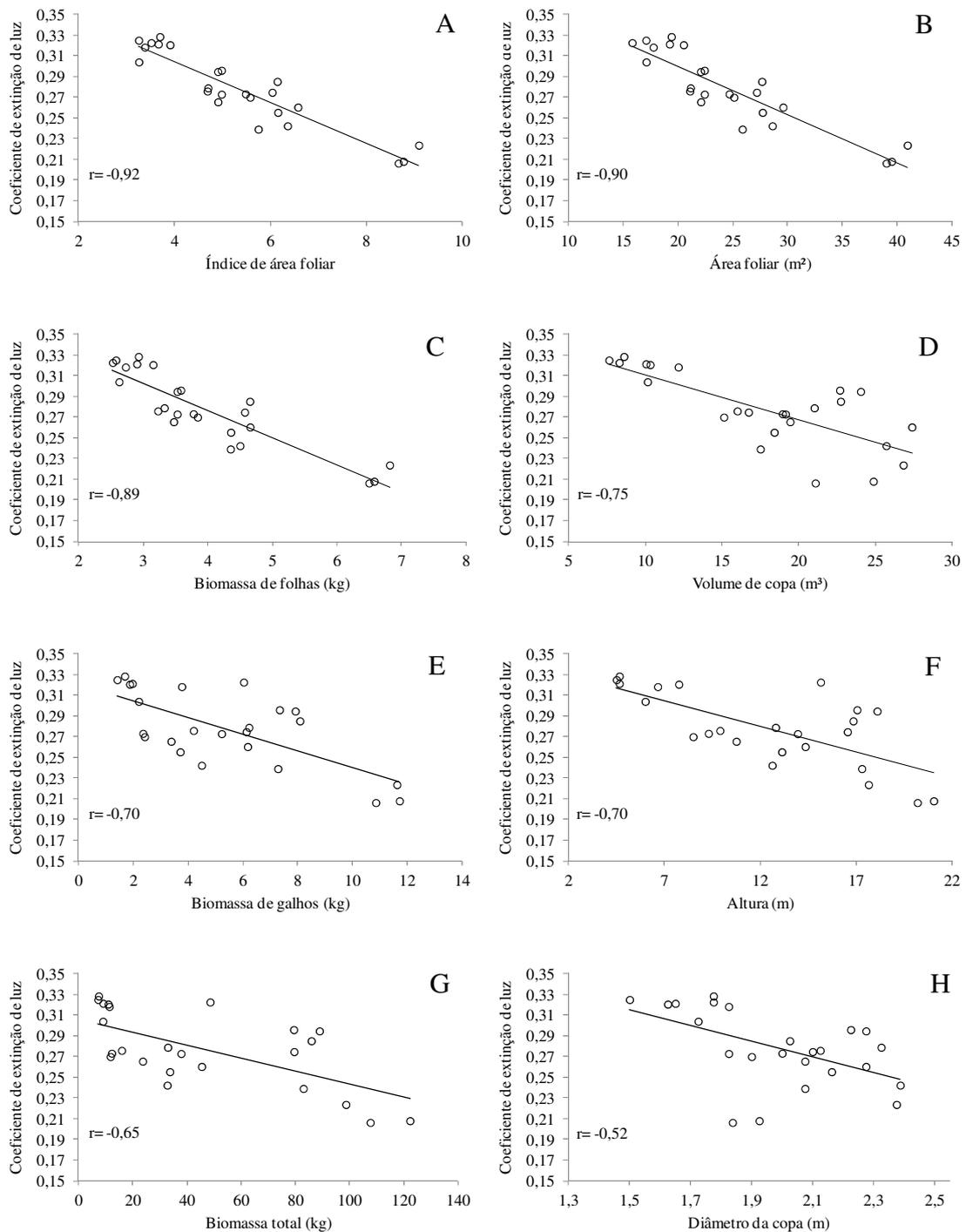


FIGURA 10 - CORRELAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ COM O ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (A), ÁREA FOLIAR (B), BIOMASSA DE FOLHAS (C), VOLUME DE COPA (D), BIOMASSA DE GALHOS (E), ALTURA (F), BIOMASSA TOTAL (G) E DIÂMETRO DE COPA (H) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL
 FONTE: O autor (2012)

As relações muito forte observadas entre o IAF e AF com o K são coerentes, pois são as folhas que determinam a interceptação, espalhamento, absorção e conseqüentemente a extinção da radiação solar. Watson (1947) também indica que a fração de luz interceptada é determinada pelo IAF.

As outras fortes relações obtidas entre o K com BF, vc, h, BG, BT e regular com o dc evidenciam que ao aumentar a atenuação da luz pelo dossel vegetal (consequentemente a obtenção de menores valores de K) também ocorre um aumento no crescimento e produção em biomassa da floresta e também em outras variáveis, tais como a altura e o diâmetro de copa. É importante lembrar que o crescimento dependerá da quantidade de energia fotossintética atenuada pelo dossel, representada pelo K, e sua eficiência em convertê-la em fotoassimilados.

Se essas variáveis são fortemente correlacionadas é fato que a lei de Beer pode ser empregada para a estimativa do índice de área foliar, necessitando, para tanto, conhecer a radiação solar incidente no topo do dossel e a transmitida após atravessar um dado índice de área foliar. Ainda, conhecendo-se o coeficiente de extinção de luz também se pode estimar o máximo valor de IAF, ou seja, o IAF ótimo, quando ocorre a interceptação de aproximadamente toda a luz incidente com um mínimo de autosombreamento, o que proporciona o máximo valor de taxa de crescimento da cultura (massa seca acumulada por unidade de área e de tempo), conforme destacam Watson (1958); Brown e Blase (1968) e Rhodes (1973).

Assim, o valor máximo de IAF pode ser estimado pela função:

$$IAF = \ln (I_0/I^*I_0)/K \quad (9)$$

Em que:

IAF = índice de área foliar;

I_0 = radiação solar incidente no topo do dossel ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$);

I = radiação transmitida após atravessar um dado índice de área foliar ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$);

k = coeficiente de extinção.

Se for considerado a interceptação de 95% de RFA incidente no topo do dossel (valor utilizado na literatura para tal simulação como, por exemplo, por WATSON, 1958 e BROWN e BLASER, 1968) e o valor de $k = 0,28$ (coeficiente médio obtido no presente trabalho), tem-se que:

$$IAF = \ln (0,95/0,05*0,95)/0,28$$

$$IAF = 10,70.$$

O IAF médio observado foi 5,35, com interceptação média de 74%. O valor de K médio foi de 0,28 e está relacionado à quantidade de luz extinta no perfil do

dossel, de modo que, quanto mais próximo de um, menor é a perda de luz (FIGURA 8). Para alcançar a interceptação de 95% da RFA estima-se que é necessária dobrar o IAF atual, ou seja, alcançar um $IAF = 10,70$.

O crescimento das plantas depende do saldo de matéria seca acumulada pela fotossíntese. Em plantas sadias que possuem a disposição quantidades adequadas de água e nutrientes, a produção de fitomassa seca é governada pela radiação fotossinteticamente ativa - RFA (MONTEITH, 1965, 1977). Dessa maneira, a RFA interceptada que é convertida em fitomassa revela a eficiência do uso da radiação - ϵb pela espécie (MONTEITH, 1977). Na maioria das vezes, esse mecanismo tem-se demonstrado como uma função linear, na qual o coeficiente angular da curva entre a RFA interceptada e matéria seca acumulada determina a eficiência de uso da radiação para a produção de fitomassa, como constatado nos trabalhos desenvolvidos por Schöffel e Volpe (2001); Caron *et al.* (2002); Pereira (2002); Caron *et al.* (2003); Radin *et al.* (2003); Assunção e Martins (2008), Caron *et al.* (2012), entre outros. Então, mantendo-se essas condições, ao se elevar o IAF aumenta-se também a RFA interceptada, já que essas duas são proporcionais (FIGURA 8) e, assim, espera-se que a produção de biomassa seja equivalente.

4.5 CONCLUSÃO

Os valores de índice de área foliar (IAF) dependem do local de plantio bem como da idade do povoamento.

As regressões ajustadas para expressar IAF ao longo das idades dos povoamentos para cada local de cultivo revelaram as mesmas tendências, porém, com intensidades de variação do IAF diferentes.

Os valores de coeficiente de extinção de luz (k) dependem da idade do povoamento, sendo as maiores médias observadas para os povoamentos com até cinco anos.

A tendência do k , ao longo da rotação da cultura, é inversamente proporcional ao IAF.

O coeficiente de extinção de luz é correlacionado com o IAF, área foliar, biomassa de folhas, volume de copa, altura, biomassa de galhos, biomassa total e diâmetro de copa.

5 EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA NA CULTURA DA ACÁCIA NEGRA

5.1 INTRODUÇÃO

O crescimento das plantas é uma função do saldo de biomassa acumulada pela fotossíntese. Assim, a dependência de processos fotossintéticos em relação ao ambiente é de interesse para profissionais ligados às ciências agrárias, pois a produtividade vegetal e, em consequência, o rendimento de um cultivo, dependem das taxas fotossintéticas em um ambiente (TAIZ e ZEIGER, 2004).

De modo geral, a fotossíntese corresponde a um processo de oxirredução, em que a água é oxidada (eliminação de elétrons com liberação de oxigênio como subproduto) e o dióxido de carbono é reduzido, para formação de carboidratos. Todo o processo ocorre nos cloroplastos com presença de clorofila a partir de uma fonte de radiação fotossinteticamente ativa (SALISBURY e ROSS, 1994; TAIZ e ZEIGER, 2004).

Nesse sentido, a produção de biomassa de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida pelas folhas e da eficiência com que a ela converte essa energia radiante em fotoassimilados, por meio do processo fotossintético. Montheith (1965, 1972, 1977), em experimentos com culturas agrícolas, observou que plantas saudáveis que possuem à disposição quantidades adequadas de água e nutrientes, a produção de biomassa é governada pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Mais tarde, essa concepção também foi observada em espécies florestais por diversos pesquisadores. Desse modo, a radiação fotossintética interceptada que é convertida em biomassa revela a eficiência do uso da radiação - ϵb pela espécie.

Na maioria das vezes, a ϵb tem-se demonstrado como uma função linear, na qual o coeficiente angular dessa relação determina a eficiência do uso da radiação para a produção de biomassa (SHIBLES e WEBER, 1966; TOLLENAR e BRUULSEMA, 1988). A ϵb tem sido estudada por diversos pesquisadores, e com espécies florestais destacam-se os trabalhos desenvolvidos por: Linder (1985);

Cannel (1989); Wang *et al.* (1991); Saldarriaga e Luxmoore (1991); Landsberg e Hingston (1996); Dewar (1996); Landsberg e Waring (1997); Kiniry (1998); McCrady e Jokela (1998); Gower *et al.* (1999); Sinclair e Muchow (1999); Mariscal *et al.* (2000); Stape (2002); Stape *et al.* (2008); Caron *et al.* (2012); Caron *et al.* (2013) e Campoe *et al.* (2013).

A associação da produção da biomassa com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, proposta por Montheith, é um dos modelos mais simplificados para a estimativa do crescimento e da produção. Ele tem sido a base teórica em modelos ecofisiológicos que levam em conta a interceptação da radiação fotossintética pelas folhas (WANG e JARVIS, 1990; LANDSBERG e WARING, 1997), de grande importância para estudos relacionados à ecofisiologia florestal (BINKLEY *et al.*, 2004), e pode ser utilizada para diversas aplicações.

Esse trabalho teve como objetivo determinar a eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada em biomassa na cultura da acácia negra no estado do Rio Grande do Sul.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram avaliados plantios comerciais de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) situados nas regiões de maior concentração de plantios no estado do Rio Grande do Sul, nos municípios de Cristal e Piratini. Em cada município foram estudados povoamentos em uma sequência de idades após o plantio: um, três, cinco e sete anos, de forma a abranger toda a rotação praticada pelos silvicultores.

No município de Cristal, os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul 30° 55' S e 52°10' W. No município de Piratini os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul 31° 24' S e Oeste 52°57' W.

As características químicas do horizonte superficial dos solos dos povoamentos estão apresentadas na TABELA 8. Os solos do município de Cristal foram classificados como Neossolo Regolítico distrófico e os de Piratini como Neossolo Litólico distrófico, conforme estudo realizado por Mochiuti (2007) para os mesmos locais.

Os plantios foram realizados nas duas regiões, tanto em áreas novas (primeira rotação), como em áreas de reformas da plantação (segunda rotação). O preparo do solo foi realizado na linha de plantio (cultivo mínimo), com uma subsolagem com três hastes a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens. Os plantios foram efetuados com espaçamento de 3 x 1,75 metros (1.904 plantas por hectare) no ano um e 3 x 1,5 metros nas demais idades (2.222 plantas por hectare) e adicionado 50 gramas de NPK (5-30-15) por planta no momentos dessa operação.

5.3 ORIGEM DOS DADOS

O estudo compreendeu a amostragem de 8 povoamentos (4 em cada local de estudo), a instalação de 24 parcelas (3 em cada povoamento) e a amostragem de 48 árvores (2 árvores por parcela).

Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte onde foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior da pendente. O tamanho das parcelas foi de 9 x 16 metros para os povoamentos com um ano de idade e de 9 x 14 metros para as demais idades, equivalendo a quatro linhas de plantio e 10 plantas em cada linha.

Nas parcelas todas as plantas foram mensuradas quanto à circunferência a altura do peito utilizando-se fita métrica graduada. As duas árvores que se aproximaram da média aritmética da circunferência a altura do peito em cada parcela foram selecionadas para avaliação da biomassa e da área foliar. Em cada parcela, foi também avaliada a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o solo.

A mensuração da biomassa foi realizada por compartimento da árvore: madeira do fuste + casca, galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos, sendo cada separado e pesado para a determinação da biomassa úmida com balança digital (*Portable Eletronic Scale*), com acurácia de 0,5 gramas (FIGURA 11).

Amostras de aproximadamente 200 gramas dos compartimentos galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos foram retiradas para determinação da biomassa seca e imediatamente pesadas para determinação da massa úmida. Já

para o fuste foram retirados 5 discos de 2 centímetros de espessura nas posições correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (considerada como diâmetro de topo de 4 cm), também visualizadas na FIGURA 11. Essas amostras foram posteriormente secas em estufa de circulação e renovação de ar a 75°C e após a constatação de massa constante, novamente o material foi pesado, possibilitando assim, a obtenção do teor de umidade e, conseqüentemente, a biomassa seca por meio da expressão:

$$Bi = \frac{MU_i * MS_i}{MUa_i} \quad (1)$$

Em que:

Bi = biomassa seca de um dado compartimento, em kg;

MUi= massa fresca de um dado compartimento, em kg;

MS_i= massa seca da amostra, em kg;

MUa_i= massa fresca da amostra, em kg.

A determinação da biomassa total foi realizada pela somatória da biomassa seca de todos os compartimentos (fuste - madeira + casca, galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos).

Para a determinação da área foliar foram retiradas três amostras de 50 gramas cada, sendo realizada a amostragem de folhas ao longo da copa da árvore. Os folíolos foram separados do pecíolo e ráquis e estendidos para a obtenção de uma superfície totalmente aberta, utilizando-se, para tanto, uma prancha de ferro aquecida a 65° C. A área foliar foi determinada utilizando-se um integrador (3000 *Canopy Analyser, Li-Cor*) (FIGURA 11). Ao final do processo, todo o material (pecíolo, ráquis e folíolo) foi seco em estufa de circulação e renovação do ar a 65° C, e após a constatação da massa constante foi pesado em balança analítica. Assim, a área foliar da planta foi calculada pela expressão:

$$AF = \frac{BF * AF_a}{BS_a} \quad (2)$$

Onde:

AF = área foliar em m²;

BF = biomassa seca das folhas, em Kg;

AF_a = área foliar da amostra, em m²;

BS_a = biomassa seca da amostra de folhas, em kg.

A avaliação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) consistiu em realizar 225 leituras utilizando-se um piranômetro (*LI-COR 1600*) ao longo de um dia (as 7h:30min, 9h, 12h, 15h, 16h:30min) no interior do povoamento em cada idade e em cada região, ou seja, 450 mensurações por idade.

Os pontos de avaliação foram instalados sistematicamente no interior de cada parcela em três sentidos: um situado na linha de plantio (1), outro na entre linha do plantio (2) e o terceiro formando um ângulo de 45° entre o ponto 1 e 2. Em cada sentido de avaliação foram fixadas cinco estacas (com altura de 28 centímetros a partir do nível do solo), distantes 75 centímetros entre si (FIGURA 11). A primeira estaca foi fixada a 38 cm da árvore de diâmetro médio da parcela.

As leituras dentro do povoamento foram realizadas a 30 centímetros de altura da superfície (FIGURA 11), já as leituras fora do povoamento, ou seja, as RFAs incidentes sobre o povoamento foram efetuadas em locais abertos por meio de cinco determinações antes e cinco depois de cada avaliação no interior do povoamento (conforme o horário de medição).

Os dados de número de horas de insolação foram adquiridos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) da Estação Climatológica do município de Pelotas. Ela correspondeu a mais próxima dos locais de estudo para o período em avaliação dos povoamentos, distante aproximadamente 85 km de Cristal e 70 km de Piratini. Assim, a radiação global incidente foi estimada por meio da equação de Ångström modificada por Prescott e Penman, conforme desenvolvimento matemático apresentado por Vianello e Alves (2000) e com coeficientes ajustados para o município de Pelotas por Steinmetz *et al.* (1999).



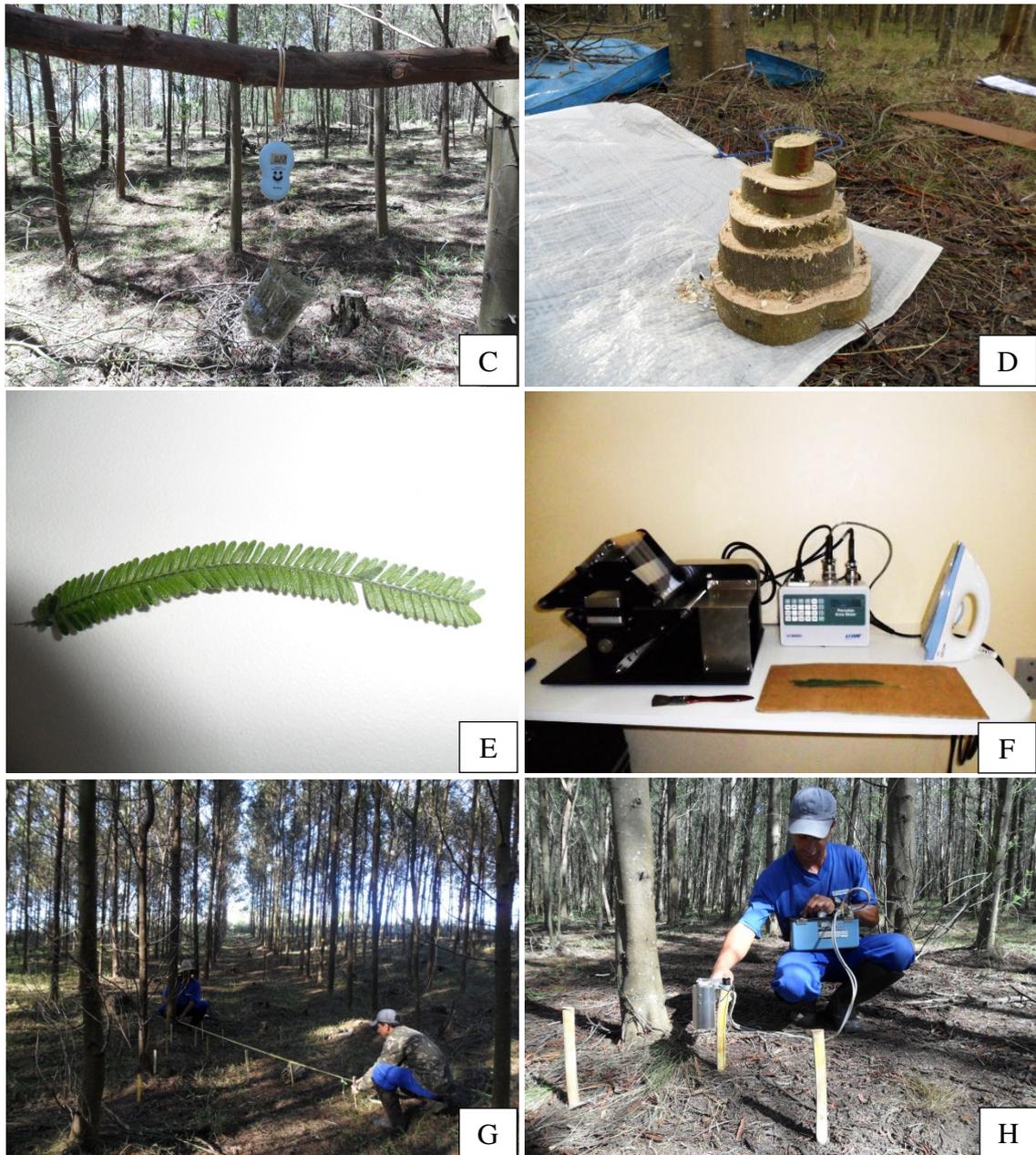


FIGURA 11 - MENSURAÇÃO DA BIOMASSA, ÁREA FOLIAR EM RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA. SEPARAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DA BIOMASSA (A), PESAGEM DA BIOMASSA DE FOLHAS (B), PESAGEM DA AMOSTRA DE FOLHAS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE (C), SECAGEM DA AMOSTRA (D), FOLHA ESTENDIDA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA FOLIAR (E), INTEGRADOR DE ÁREA FOLIAR (F), INSTALAÇÃO DOS PONTOS DE LEITURAS DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (A 30 CM DE ALTURA DA SUPERFÍCIE) (G), LEITURAS DA RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA (H)
 FONTE: O autor (2012)

5.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A produção biomassa foi estudada com base no modelo proposto por Monteith (1977), na qual, essa é uma variável dependente da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada multiplicada pela eficiência de conversão (ϵb) dessa radiação em biomassa produzida. Dessa forma, a ϵb pode ser calculada por meio da relação entre a produção média de biomassa acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada envolvida, ou seja:

$$B = \epsilon b * RFAi \quad (3)$$

Em que:

B= produção de biomassa seca (kg m^{-2});

RFAi = radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada (MJ m^{-2});

ϵb = eficiência de conversão da radiação RFAi em biomassa produzida (kg MJ^{-1}).

A estimativa da radiação fotossinteticamente ativa acumulada foi calculada com base no modelo proposto por Varlet-Grancher *et al.* (1989):

$$RFAi = 0,95 * (RFAinc) * (1 - e^{-k * IAF}) \quad (4)$$

Em que:

RFAi = radiação fotossinteticamente ativa interceptada, em MJ m^{-2} ;

K = coeficiente de extinção de luz, adimensional;

IAF = índice de área foliar, adimensional;

RFAinc radiação fotossinteticamente ativa incidente, em MJ m^{-2} .

O índice de área foliar (IAF) foi calculado pela razão entre a área foliar média em cada parcela e o espaçamento do cultivo, ou seja:

$$IAF = \frac{AF}{ASE} \quad (5)$$

Onde:

IAF= índice de área foliar, adimensional;

AF= área foliar média das duas plantas mensuradas por parcela, em m^2 ;

ASE = área de solo explorada pela planta, ou seja, espaçamento de cultivo, em m^2 .

O coeficiente de extinção de luz foi calculado adotando a teoria da lei de Beer, a qual relaciona que a luz solar ao atravessar as várias camadas de folhas justapostas de um dossel vegetativo tem sua intensidade decrescida exponencialmente com o aumento do grau de cobertura vegetal. Assim, o coeficiente médio de extinção (K) foi obtido por:

$$k = - \frac{\ln\left(\frac{RFAt}{RFAi}\right)}{IAF} \quad (6)$$

Onde:

K = coeficiente de extinção de luz, adimensional;

RFAt = radiação fotossinteticamente ativa transmitida pelo dossel que atinge a superfície do solo; e

RFAi = radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o povoamento.

IAF = índice de área foliar, adimensional;

Ln = logaritmo natural.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa incidente foi estimada considerando-se como sendo 45% da radiação solar global incidente. Essa fração representa o valor médio daqueles encontrados para o Rio Grande do Sul por Assis e Mendez (1989) e Pandolfo (1995). A estimativa da radiação fotossinteticamente ativa acumulada foi realizada com base em Monteith (1977) e Varlet-Grancher *et al.* (1989).

A relação da radiação fotossinteticamente ativa interceptada com a produção de biomassa foi estabelecida por meio da análise de correlação de Pearson, que por sua vez foi avaliada qualitativamente quanto à intensidade utilizando os seguintes critérios (em módulo) propostos por Callegari-Jacques (2003).

Os valores de eficiência de conversão foram calculados em termos de biomassa total e por compartimento para cada local de cultivo. Para verificar se a relação entre a produção de biomassa (total e por compartimento) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi a mesma entre os locais de plantio, foi realizada a análise de covariância.

A análise de covariância (método de Snedecor) permitiu verificar a necessidade do uso de funções independentes em relação ao local de plantio, ou seja, testar a hipótese de inclinação das retas. Se a diferença não for significativa

para a inclinação uma regressão única pode ser ajustada, ou vice e versa. O teste dos níveis não foi realizado, tendo em vista que o objetivo foi verificar somente o coeficiente angular, pois é quem determina o valor da eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em biomassa.

Os valores de ϵb foram obtidos por meio do método dos mínimos quadrados inicialmente utilizando o ajuste independente (ajuste para a biomassa total e para cada compartimento individualmente), e também pelo ajustamento simultâneo, ou seja, a ϵb para cada compartimento foi calculada juntamente (uma única vez) por um sistema de equações. Assim, a ϵb para a biomassa total foi considerada como o somatório das funções utilizadas para os outros compartimentos. A metodologia do ajuste simultâneo foi baseada nos trabalhos de Parresol *et al.* (2001) e Paulo *et al.* (2002).

O índice de área foliar e o coeficiente de extinção de luz foram analisados utilizando-se a estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e intervalo de confiança), de forma a apresentar somente uma análise exploratória, já que nos capítulos anteriores dessa pesquisa foram abordados com mais profundidade.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estatísticas obtidas para todos os valores encontrados de índice de área foliar (IAF) e coeficiente de extinção de luz, sem levar em consideração a idade do povoamento e o local de plantio, estão apresentados na TABELA 23. O (IAF) médio foi de 5,35, para um intervalo de confiança variando de 4,63 a 6,07. O valor mínimo observado foi de 3,25 e o máximo de 9,10, apresentando um coeficiente de variação de 31,78%.

TABELA 23 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ AO LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA (7 ANOS) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

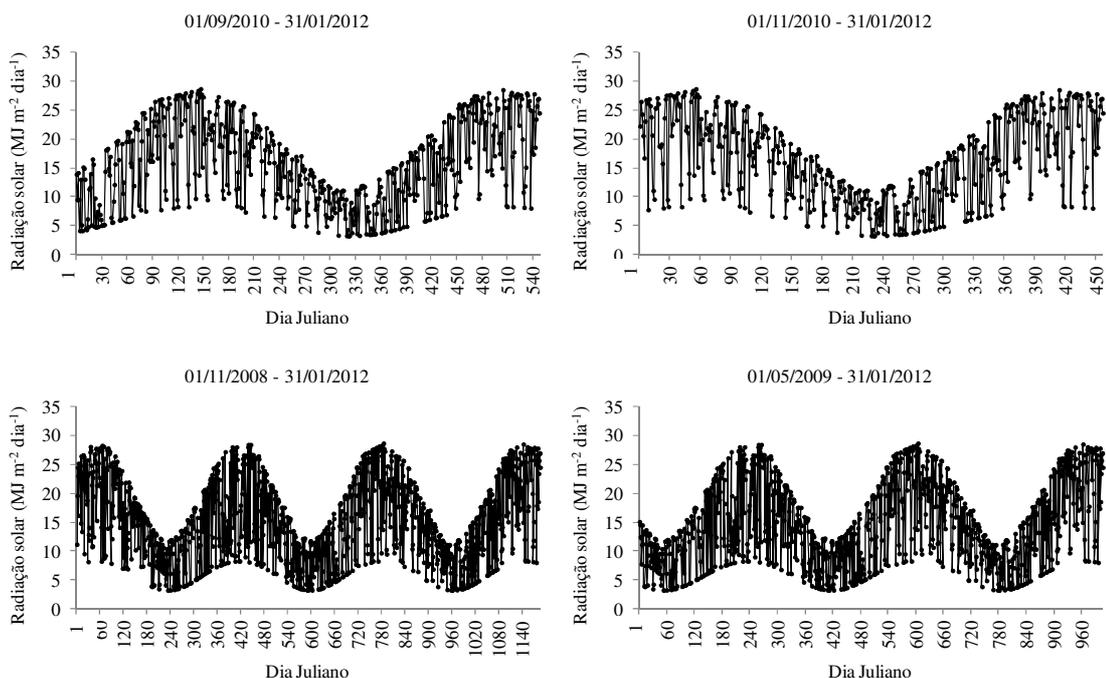
Estatística	Índice de área foliar	Coeficiente de extinção de luz
Média	5,35	0,28
Variância	2,90	0,001

continua

		conclusão
Desvio padrão	1,70	0,04
Erro padrão	0,35	0,007
Mínimo	3,25	0,21
Máximo	9,10	0,33
Intervalo de confiança ($\alpha=5\%$)	$4,63 \leq \mu \leq 6,07$	$0,26 \leq \mu \leq 0,29$

Já o coeficiente de extinção de luz (K) apresentou uma média de 0,28, para um intervalo de confiança variando de 0,26 a 0,29. O coeficiente de variação foi de 13,07%, para um valor mínimo de 0,21 e máximo de 0,33 (TABELA 23).

A incidência de radiação solar global foi em média de $14,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com variação de $3,28$ a $28,63 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, sendo o fluxo durante o cultivo de cada povoamento apresentado na FIGURA 12. De maneira geral, a radiação solar global apresentou os maiores valores no primeiro e último mês do ano (estação de verão), ocorrendo diminuição nos meses de junho e julho (estação de inverno). Resultado semelhante também encontrado por Bergamaschi *et al.* (2003) para o município de Eldorado do Sul e Cargnelutti Filho *et al.* (2004) em outros municípios do estado do Rio Grande do Sul. De acordo com esses autores, essas condições são decorrência do solstício de verão, que acontece na segunda quinzena de dezembro, com redução gradativa da insolação e aumento da declinação solar até o solstício de inverno, na segunda quinzena de junho.



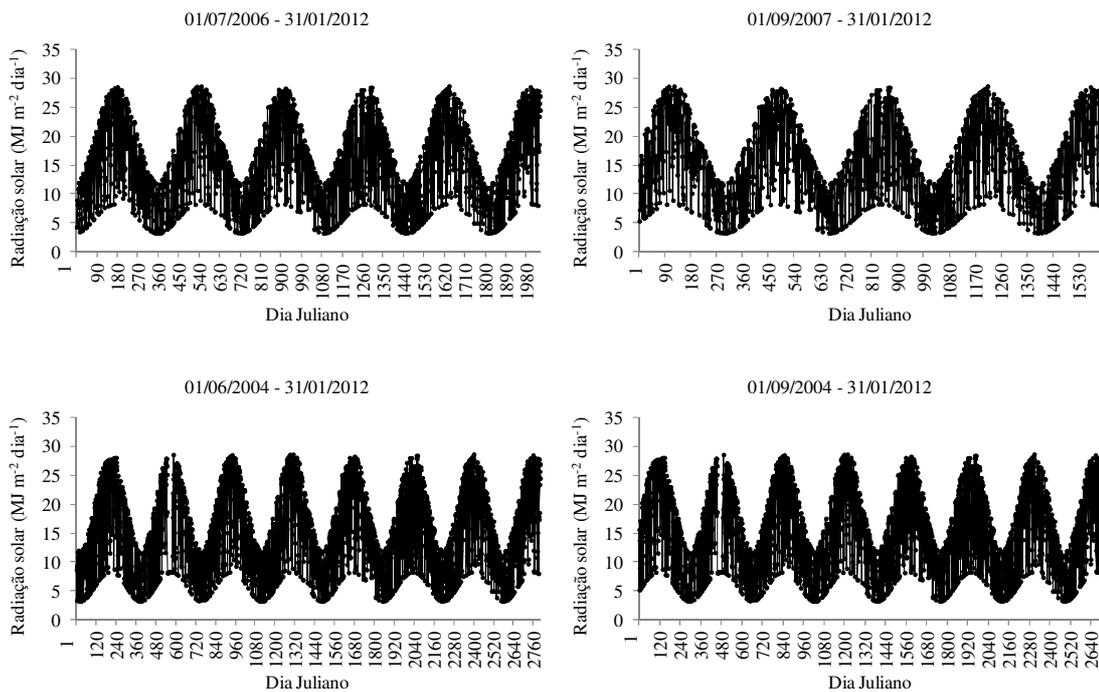


FIGURA 12 - ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE DURANTE O CICLO DE CULTIVO DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NOS MUNICÍPIOS DE CRISTAL (DIREITA) E PIRATINI (ESQUERDA) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
 FONTE: O autor (2012)

A produção de biomassa apresentou relação linear positiva com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, sendo a correlação muito forte (93,81%) (FIGURA 12). Essa tendência tem-se demonstrado como uma função linear, observada também em outras espécies florestais por: Linder (1985), Cannel (1989), Wang *et al.* (1991), Saldarriaga e Luxmoore (1991), Landsberg e Hingston (1996), Landsberg e Waring (1997), Kiniry (1998), McCrady e Jokela (1998), Gower *et al.* (1999), Sinclair e Muchow (1999), Mariscal *et al.* (2000), Stape (2002), Stape *et al.* (2008), Caron *et al.* (2012), Caron *et al.* (2013) e Campoe *et al.* (2013).

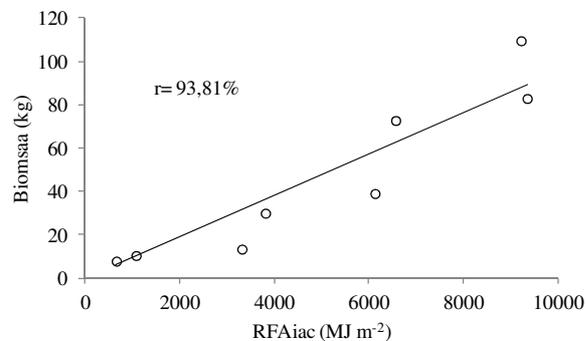
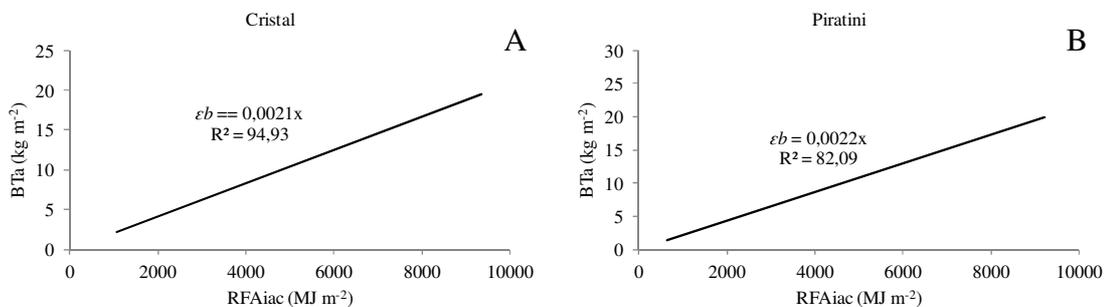


FIGURA 13 - CORRELAÇÃO ENTRE A BIOMASSA TOTAL (INDIVÍDUOS DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MÉDIOS) COM A RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL
 FONTE: O Autor (2012)

Esses resultados estão de acordo com o que destaca Montheith (1965, 1972, 1977) para culturas agrícolas, em que o crescimento das plantas depende do saldo de matéria seca acumulada pela fotossíntese, ou seja, aquelas sadias que possuem à disposição quantidades adequadas de água e nutrientes, a produção de biomassa seca é governada pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Portanto, ocorre uma relação linear positiva entre a produção de biomassa e a radiação interceptada e isso também foi observado por Cannel (1989), estando de acordo com os resultados aqui obtidos e também em diversos trabalhos (que foram citados no parágrafo anterior) com espécies florestais.

Desse modo, a radiação fotossintética interceptada que é convertida em biomassa revela a eficiência do uso da radiação - ϵb pela espécie (MONTEITH, 1965, 1972, 1977) e uma aproximação quantitativa pode ser utilizada para determinar a relação entre a produção de biomassa e a radiação interceptada. Os coeficientes angulares obtidos, que expressam o valor de eficiência do uso de energia solar pelas árvores da acácia negra para a produção de sua biomassa, para cada local de cultivo estão apresentados na FIGURA 14. A eficiência de conversão – ϵb de biomassa total em relação à quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada acumulada foi de $0,0021 \text{ kg MJ}^{-1}$ para os povoamentos cultivados no município de Cristal – Encosta do Sudeste e de $0,0022 \text{ kg MJ}^{-1}$ em Piratini – Encosta Serra do Sudeste (FIGURA 14), ou seja, valores semelhantes entre as duas condições ambientais. A análise de covariância aplicada para as equações independentes entre os dois locais de cultivo (FIGURA 14) revelou não existir diferença significativa entre os valores de eficiência (TABELA 24). O valor de ϵb para a biomassa total da acácia negra é de $0,0021 \text{ kg MJ}^{-1}$ (FIGURA 14).



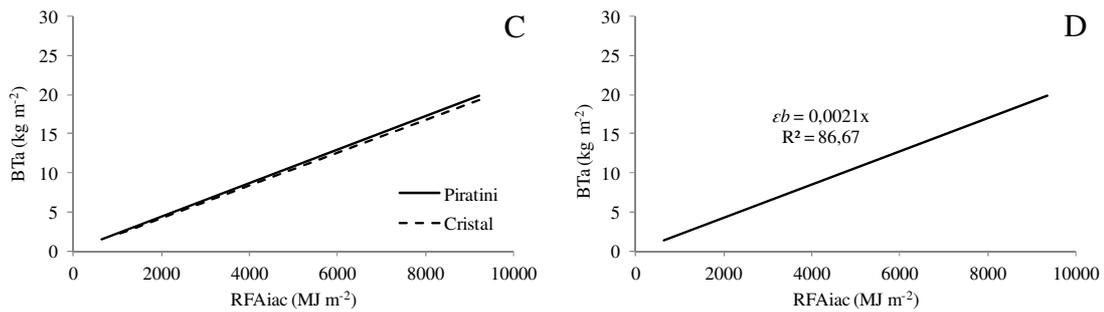


FIGURA 14 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA TOTAL OBTIDA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

FONTE: O autor (2012)

TABELA 24 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA ENTRE OS VALORES DE EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA OBTIDOS EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Compartimento	GL	QM	F	α F	Igualdade entre o grupo
Total	1	18,9133	1,8532	24,51%	Sim
Fuste	1	6,2073	0,6082	47,90%	Sim
Galhos	1	40,1762	3,9366	11,82%	Sim
Folhas	1	40,6438	3,9824	11,67%	Sim
Flores e frutos	1	40,8151	3,9992	11,61%	Sim

Em que α F é a área ocupada sob a curva da distribuição.

A produtividade primária líquida das florestas e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo seu dossel estão diretamente relacionadas pelo conceito de eficiência de uso da luz, o qual pode ser utilizado na predição das produtividades primárias líquidas de florestas (CHAZDON *et al.*, 1995; GOWE *et al.*, 1999; GREEN *et al.*, 2003; BINKLEY *et al.*, 2004; STAPE *et al.*, 2004a). A associação da produção da biomassa com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi demonstrada por vários autores (LINDER, 1985; CANNEL, 1989; WANG *et al.*, 1991; SALDARRIAGA e LUXMOORE, 1991; LANDSBERG e HINGSTON, 1996; DEWAR, 1996; LANDSBERG e WARING, 1997; KINIRY, 1998; McCRADY e JOKELA, 1998; GOWER *et al.*, 1999; SINCLAIR e MUCHOW, 1999; MARISCAL *et al.*, 2000; STAPE, 2002; STAPE *et al.*, 2008; CARON *et al.*, 2012; CARON *et al.*, 2013; CAMPOE *et al.*, 2013), originando modelos de eficiência de conversão semelhantes aos propostos para espécies agrícolas por Monteith (1972), e aos obtidos no presente caso para a acácia negra.

A produção de biomassa (B) para a acácia-negra pode ser estimada pela radiação fotossintética interceptada (RFAi) por meio da equação: $B=0,0021 \cdot RFAi$, cujo ajuste resultou num coeficiente de determinação de 86,67% e erro padrão de

estimativa de 30,46%. Stape (2002) pesquisou a aplicação das equações de eficiência de uso da luz em plantios de eucalipto no Brasil e também encontrou resultados satisfatórios. Por esse mesmo método, o crescimento florestal é proporcional à radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelas folhas e multiplicada pela eficiência de conversão (BINKLEY *et al.*, 1994). Esse método tem sido a base teórica em modelos ecofisiológicos que levam em conta a interceptação da radiação fotossintética pelas folhas (WANG e JARVIS, 1990; LANDSBERG, e WARING, 1997), de grande importância para estudos relacionados à ecofisiologia florestal (BINKLEY *et al.*, 2004) e pode ser utilizada para diversas aplicações, tais como realizadas por Stape, Binkley e Ryan (2004a).

Trabalhos de eficiência de conversão com espécies florestais foram encontrados em maior número na literatura internacional, sendo poucos os desenvolvidos e publicados no Brasil. Isso corrobora a importância de se intensificar pesquisas que relacionam o uso da luz solar, pois, como visto, o crescimento e a produção da acácia-negra e, como para outras espécies florestais, depende da quantidade de radiação fotossintética interceptada e da eficiência de conversão dessa energia em biomassa.

Os valores de eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa em biomassa na cultura da acácia negra foram, na maioria das vezes, maiores que aqueles observados por: Linder (1985), Wang *et al.* (1991), Saldarriaga e Luxmoore (1991), Landsberg e Hingston (1996), Landsberg e Coops (1997), Kiniry (1998), McCrady e Jokela (1998), Mariscal *et al.* (2000) e Campoe *et al.* (2013) (TABELA 25).

TABELA 25 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA PARA DIVERSAS ESPÉCIES

Espécie	Autor	ϵ_b (g MJ ⁻¹)
<i>Eucalyptus</i> sp.	Linder (1985)	~1,00
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Wang <i>et al.</i> (1991)	~1,90
Floresta Amazônica até 10 anos (estágio sucessional)	Saldarriaga e Luxmoore (1991)	0,23
Floresta Amazônica até 50 anos (estágio sucessional)		0,07
<i>Olea europaea</i> L.	Mariscal <i>et al.</i> (2000)	1,35
Culturas agrícolas	Landsberg <i>et al.</i> (1997)	2,80
Florestas tropicais		0,20
Outras florestas		1 a 2

continua

		conclusão
<i>Juniperus virginiana</i> L.	Kiniry (1998)	1,60
<i>Prosopis glandulosa</i> var. <i>glandulosa</i> Torr.		1,61
<i>Pinus taeda</i> L.	McCrary e Jokela (1998)	1,33 - 1,48
<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	Landsberg e Hingston (1996)	0,93 a 2,23
	Henskens (2001)	0,67
<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden.	Campoe <i>et al.</i> (2013)	0,75 a 1,03
<i>Acacia mearnsii</i> De Wild.	Presente pesquisa	2,10

Em relação aos trabalhos publicados na literatura nacional, a eficiência da conversão da acácia negra foi maior que a observada para a cultura da erva mate por Caron *et al.* (2013) (0,83 g MJ⁻¹ para plantas cultivadas em sistema de consórcio com *Pinus elliottii* Engelm e 0,23 g MJ⁻¹ no sistema solteiro) e menor que àquela obtida por Caron *et al.* (2012) em mudas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. (3,7 a 7,76 g MJ⁻¹).

Sinclair e Muchow (1999) destacam que a eficiência de conversão é resultante de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos, estando entre eles: espécie, processo fotossintético, trocas gasosas, concentração de nutrientes nas folhas (em especial de nitrogênio), recursos no solo, déficit de pressão de vapor atmosférico, temperatura do ar e radiação solar. Já Villa Nova *et al.* (2003) destacam que a eficiência fotossintética é uma função direta da densidade de plantas, pois o índice de área foliar é quem determina tal valor. Portanto, as diferenças dos valores de eficiência de conversão aqui obtidos em relação aos observados na literatura são resultantes dessa série de fatores apresentada.

Hexaltine e Prentice (1996) e Green *et al.* (2003) sugerem que os estudos de eficiência de conversão sejam integrados com a influência de nutrientes, o que permite aumentar a capacidade de avaliar as respostas ecofisiológica das plantas ao ambiente. Clark *et al.* (2001a) e Clark *et al.* (2001b) também apontaram que é importante a busca de variáveis que possam explicar a eficiência do uso da luz com base naquelas de determinação rápida, tais como o índice de área foliar e a nutrição. Em trabalhos desenvolvidos por Waren e Adams (2001), Close *et al.* (2004) e Stape *et al.* (2004) foi observado que a capacidade fotossintética está diretamente relacionada com a concentração de nitrogênio nas folhas.

Em termos de nitrogênio, a acácia-negra é uma espécie favorecida, pois por meio da associação de bactéria do gênero *Rhizobium* ocorre fixação de nitrogênio atmosférico ao solo (estimado em 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ conforme SALAS, 1987),

permitindo, assim, que esse elemento não seja um fator limitante durante o seu ciclo. Binkley e Giardina (1997) destacam que as leguminosas arbóreas apresentam maior acúmulo de nitrogênio em sua biomassa, devido sua capacidade de fixação biológica, sendo capaz de suprir entre 40 e 80% do nitrogênio utilizado por essas árvores. Logo, é de se esperar que a concentração de nitrogênio nas folhas da acácia-negra seja maior que nas espécies em que foram comparadas as eficiências de conversão. Isso também corrobora com os maiores valores de eficiência de conversão obtidos, pois de acordo com Evans (1989), Landsberg e Gower (1997), Dewar (2003), Green *et al.* (2003) e Dewar *et al.* (2012), o conteúdo de nitrogênio no dossel afeta as taxas fotossintéticas e, conseqüentemente, a produtividade da floresta.

A eficiência do uso de energia solar pelas árvores de acácia negra também foram calculadas por compartimento da biomassa (fuste – madeira e casca, folhas, galhos – vivos e mortos e flores + frutos), e os valores ϵ_b para cada local de cultivo podem ser visualizadas na FIGURA 14. A análise de covariância aplicada para as equações independentes (TABELA 24) revelou que para um mesmo compartimento os coeficientes angulares não diferiram estatisticamente entre os locais de cultivos (Encosta do Sudeste – Cristal e Serra do Sudeste - Piratini). Assim, a eficiência de conversão – ϵ_b de biomassa do fuste (madeira e casca) em relação à quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada acumulada foi de $0,0017 \text{ kg MJ}^{-1}$ para a biomassa do fuste, $0,0003 \text{ kg MJ}^{-1}$ para a de galhos, $0,00006 \text{ kg MJ}^{-1}$ para a de folhas e $0,00005 \text{ kg MJ}^{-1}$ para a de flores e frutos.

Para a biomassa de folhas a eficiência de conversão denotou um modelo diferente em relação aos outros compartimentos, apresentando além do coeficiente angular um intercepto significativo. Isso expressa que no início do estabelecimento do povoamento a produção de biomassa de folhas é priorizada, aumentando a área fotossintética, para então, interceptar mais luz, converter em fotoassimilados e distribuir para os outros órgãos. Kozlowski *et al.* (1991) relatam que a proporção entre os compartimentos da biomassa varia com a idade das árvores, e isso ocorre devido a mudanças na partição dos fotoassimilados com o crescimento das plantas, de modo que para árvores jovens a distribuição seja priorizada para a formação da copa e com o aumento da idade para o tronco, o que também foi observado em relação a partição da biomassa da acácia negra (FIGURA 16).

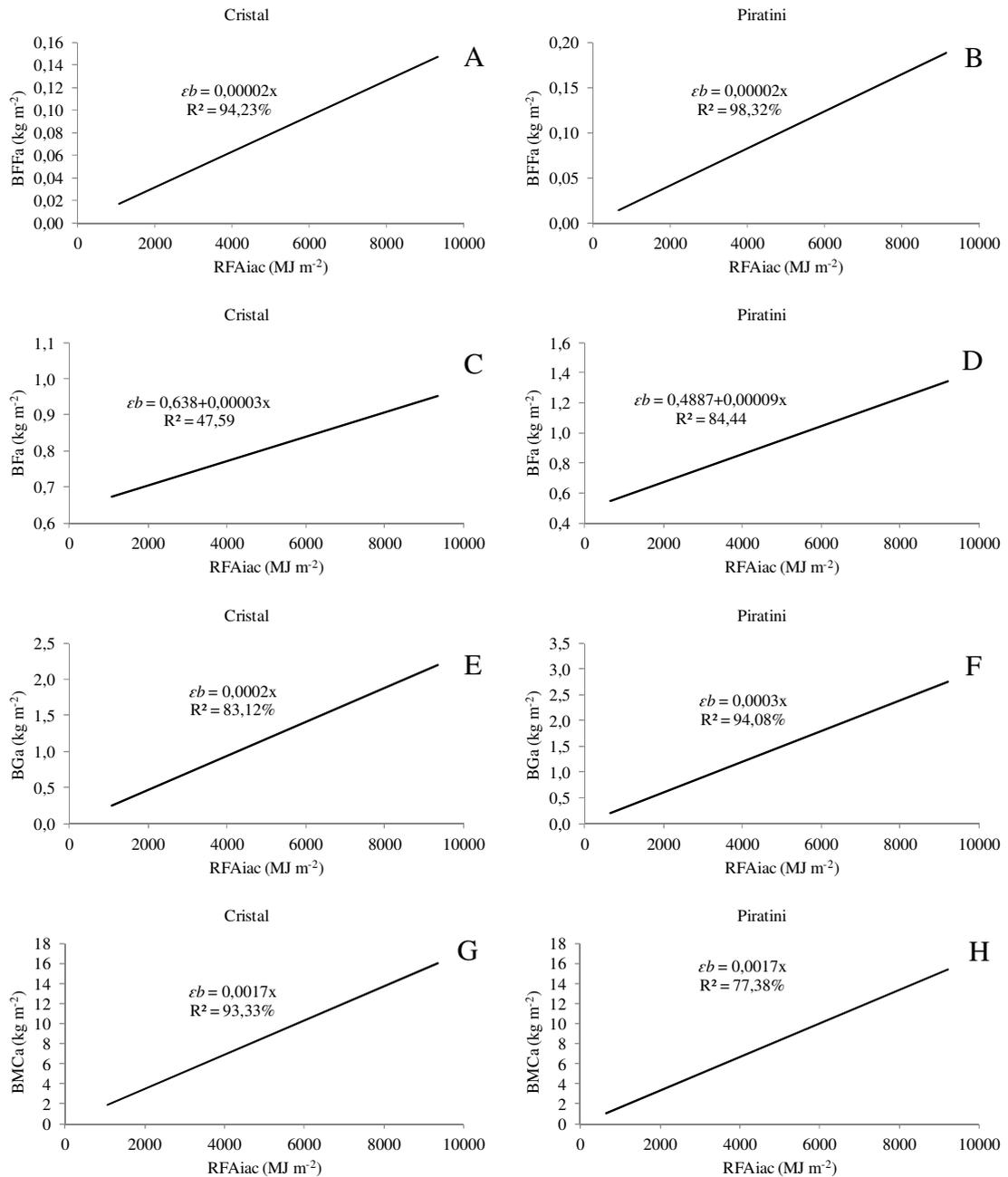


FIGURA 15 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA DE FLORES E FRUTOS (A e B), FOLHAS (C e D), GALHOS (E e F) E DO FUSTE (G e H) OBTIDA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE: RFAiac = RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA, BFFa = BIOMASSA DE FOLHAS ACUMULADA, BFa = BIOMASSA DE FOLHAS ACUMULADA, BGa = BIOMASSA DE GALHOS ACUMULADA E BMCa = BIOMASSA DO FUSTE ACUMULADA

FONTE: O autor (2012)

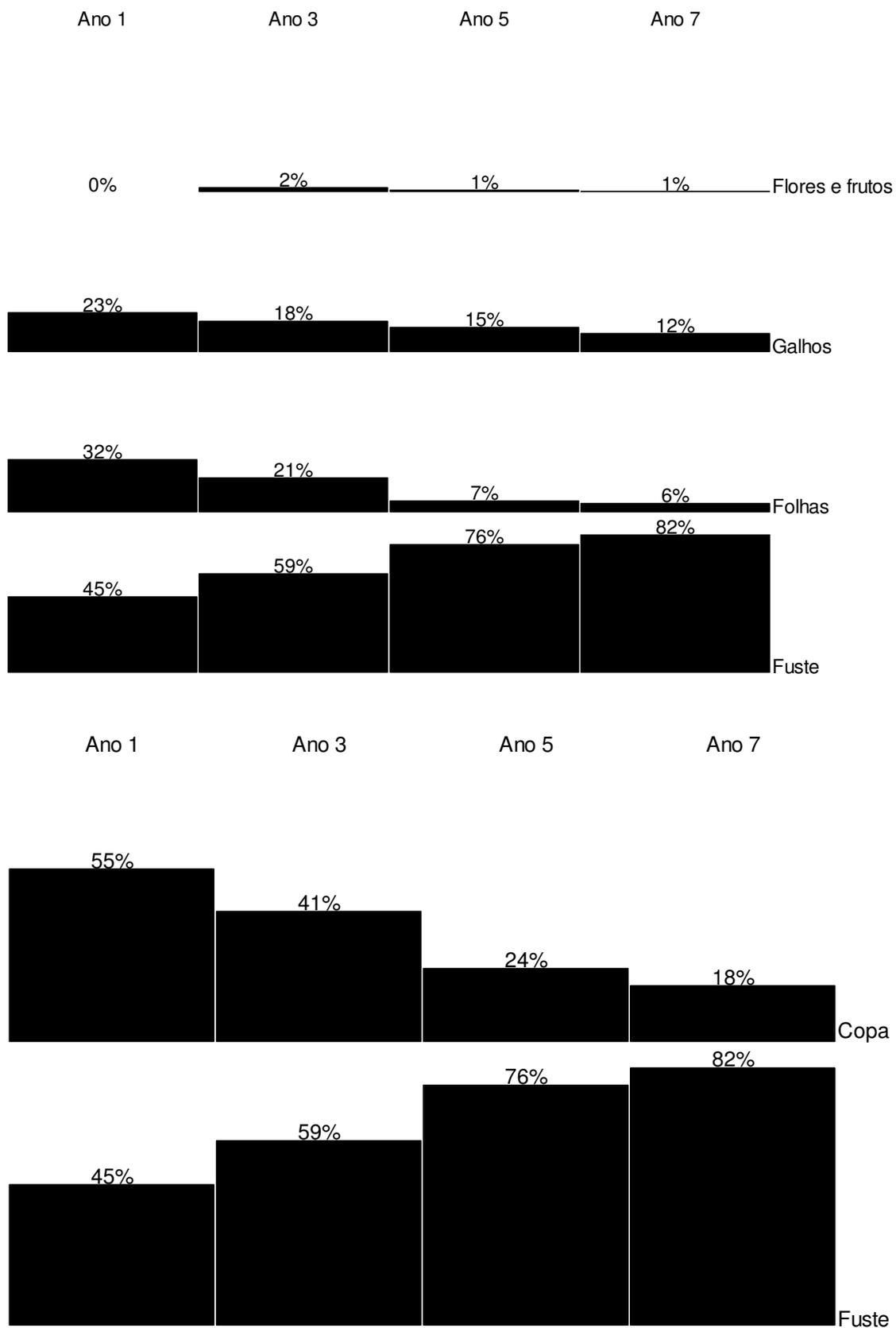


FIGURA 16 - PARTIÇÃO DA BIOMASSA AO LONGO DO CICLO DE CULTIVO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
 FONTE: O autor (2012)

Foi identificado que o ajuste dos modelos independente não resultou em resultado satisfatório, tendo em vista que, o somatório das ϵb de biomassa de cada compartimento deve ser compatível com a ϵb para a biomassa total (FIGURA 17). Essa incompatibilidade, causada pelo ajuste independente, foi resolvida por meio do ajuste de um sistema de equações, ou seja, empregando o ajuste simultâneo.

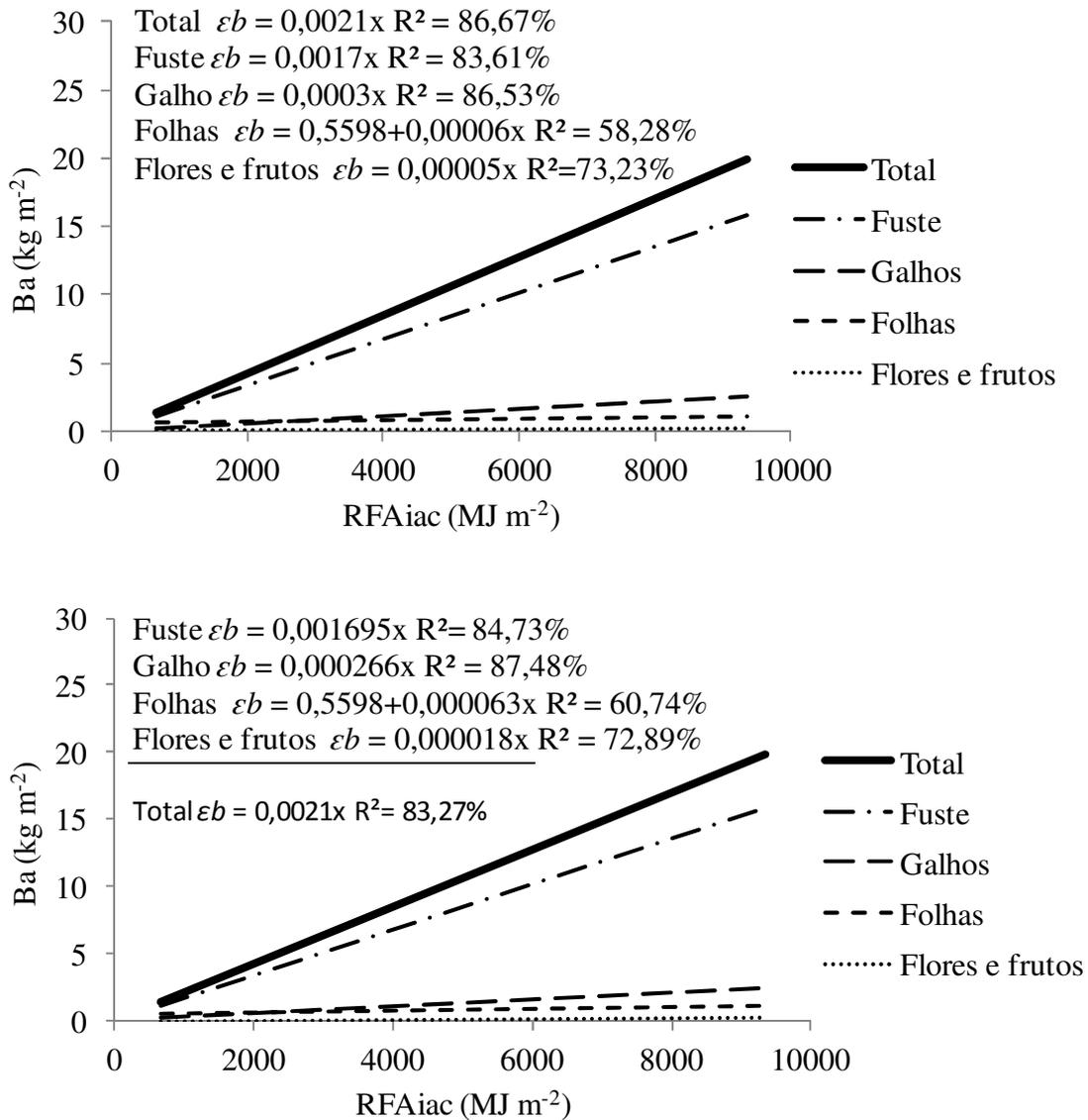


FIGURA 17 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA TOTAL, FUSTE, GALHO, FOLHAS E FLORES + FRUTOS, OBTIDAS POR MEIO DE AJUSTAMENTO INDEPENDENTE (A) E SIMULTÂNEO (B) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE: RFAiac = RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA E Ba = BIOMASSA ACUMULADA FONTE: O autor (2012)

Para a biomassa total o ajustamento simultâneo resultou num valor de ϵb de $0,0021 \text{ kg MJ}^{-1}$, ou seja, o mesmo obtido com o ajuste independente. Entretanto, os valores ϵb no conjunto dos compartimentos da biomassa, ou seja, fuste, folhas,

galhos e flores + frutos, sofreram pequenas alterações, porém num ponto de tornar todo o sistema compatível, e os valores de eficiência de conversão são apresentados na FIGURA 17. Assim, a estimativa pode ser realizada para cada compartimento e ao mesmo tempo para o total, já que o ajuste simultâneo garante a compatibilidade das estimativas, ou seja, o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que da equação de biomassa total.

Além disso, essa situação também é apropriada na determinação dos valores de eficiência de conversão, já que, ao interceptar radiação fotossintética e converter em fotoassimilados, o sistema de equações estima a quantidade de biomassa produzida e, ao mesmo tempo, especula a partição da biomassa dentro da árvore. É fato que ao longo do ciclo de crescimento a partição da biomassa não é a mesma entre os compartimentos (FIGURA 16). Entretanto, essas diferenças estão intrinsicamente modeladas frente aos valores dos coeficientes angulares obtidos. Portanto, as proporções ao longo da linha estimativa são induzidas por dois fatores: inclinações diferentes entre os compartimentos e compatibilidade das estimativas de biomassa gerada pelo ajuste simultâneo.

No cultivo de florestas de acácia negra, a biomassa do fuste é o produto de maior interesse, então é adequado ter um sistema de equações que leva em consideração a biomassa total do fuste e conseqüentemente da copa, pois simplifica as respostas de maior importância. Assim, os valores de ϵb de conversão para a biomassa total e para o fuste se mantiveram os mesmos ($0,0021 \text{ kg MJ}^{-1}$ e $0,0017 \text{ kg MJ}^{-1}$, respectivamente) e para a copa de $0,0003 \text{ kg MJ}^{-1}$ (FIGURA 18).

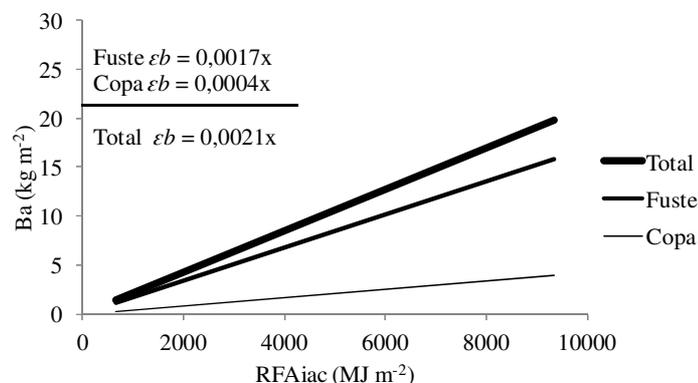


FIGURA 18 - EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA EM BIOMASSA TOTAL E DA COPA, OBTIDAS POR MEIO DE AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. Em que: RFAiac = RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA E Ba = BIOMASSA ACUMULADA
 FONTE: O autor (2012)

A proporção entre os coeficientes angulares, para a biomassa do fuste resultou em 80,95% e para a copa de 19,05%. Se for considerada a produção de biomassa total, dada na idade de rotação, ou seja, aos sete anos, a partição foi de 81,96% para o fuste e 18,04% para a copa, ou seja, os resultados de proporção dos coeficientes são compatíveis com os observados da partição da biomassa ao final da rotação. Porém, é importante destacar, que para cada ponto ao longo da linha estimativa, serão geradas proporções de partição da biomassa equivalentes às observadas, devido, como já destacado, as diferentes inclinações e compatibilidade do sistema de equações.

5.6 CONCLUSÕES

A ϵb para a biomassa total da acácia-negra é de $0,0021 \text{ kg MJ}^{-1}$.

O emprego do ajuste simultâneo é apropriado para o estabelecimento dos valores de eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa em biomassa por compartimento.

A ϵb não foi influenciada pelo local de plantio, portanto os valores observados demonstram-se intrínsecos a espécie.

A produção de biomassa de acácia-negra apresenta relação linear com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

6 A PRODUÇÃO DE BIOMASSA E O ACÚMULO DE CARBONO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS BIOCLIMÁTICAS

6.1 INTRODUÇÃO

Os estudos de biomassa florestal têm sido realizados com propósitos variados, como por exemplo, para a quantificação da ciclagem de nutrientes, fins energéticos, estudos de fixação de carbono e propriamente para avaliação do crescimento e produção de uma cultura. Em qualquer dos casos referidos, eles são de grande importância para a tomada de decisões de gestão de recursos florestais e, em muitos casos, eles tem sido realizados por meio de modelos. De acordo com Vanclay (1999), modelos referem-se a um sistema de equações que podem prever o crescimento e a produção do povoamento florestal sob uma grande variedade de condições.

Uma das tendências das Ciências Agrárias é gerar modelos de simulação de crescimento que além de prever a produção em função das condições que as plantas se desenvolvem, fornecem a possibilidade de analisar fatores que limitam o seu crescimento. Assim, o emprego de modelos que simulam o crescimento e a produção, pode minimizar riscos ambientais, reduzir custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade ao planejamento agrícola.

Os modelos de crescimento e produção florestal podem ser classificados em três categorias: empíricos, baseados em processos – mecanicistas e híbridos – combinação do empírico com o mecanicista (KIMMINS *et al.*, 1990). Na área florestal, os empíricos, utilizados para estimar o crescimento e produção por meio de variáveis dendrométricas associadas às idades, foram os primeiros a ser utilizados (CLUTTER, 1980), desenvolvidos na Alemanha antes do fim do século XVIII (SPURR, 1952), geram boas respostas (CLUTTER, 1983), são os mais empregados e há muitos estudos sobre eles.

Entretanto, modelos processuais são mais flexíveis para realizar simulações do crescimento e a produção frente a mudanças ambientais e de manejo. Stape (2004) conduziu um estudo com eucalipto em locais com variabilidade de precipitação

e fez um comparativo entre modelos empíricos e o modelo ecofisiológico 3-PG. Foi observado que o empírico proporcionou boas estimativas em condições ambientais médias, porém, frente a diferenças de precipitação, o ecofisiológico foi mais eficiente.

Johnsen *et al.* (2001) definem os modelos baseados em processos, como representações matemáticas de sistemas biológicos que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos baseados em teorias científicas. De acordo com Sanquetta (1996) eles procuram explicar como funciona um sistema, enfatizando a explicação dos fatos mais que o ajuste e as predições. Nessa modelagem, a luz, temperatura e nutrientes do solo, são adicionados ao sistema, além de modelar fotossíntese, respiração e distribuição de fotoassimilados nos compartimentos da biomassa - raízes, caule e folhas (VANCLAY, 1999).

Nos últimos anos houve um grande progresso no uso de modelos florestais baseados em processos, alicerçados pelo avanço da tecnologia computacional. Desde então, uma série de estudos tem sido desenvolvidos com aplicações desses modelos, e em especial, do 3-PG (LAW *et al.*, 2000; LANDSBERG *et al.*, 2001; SANDS e LANDSBERG, 2002; STAPE, 2002; WARING e McDOWELL, 2002; LANDSBERG *et al.*, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2004; DYE *et al.*, 2004; ESPREY *et al.*, 2004; STAPE *et al.*, 2004; COOPS *et al.*, 2005; FONTES *et al.*, 2006; PAUL *et al.*, 2007; ZHAO *et al.*, 2009; STAPE *et al.*, 2010; CHRISTINA *et al.*, 2011; LANDSBERG e SANDS, 2011).

Entretanto, ainda levam desvantagem em relação aos empíricos, pois necessitam de muitos recursos para inicializar, explorar, interpretar, demandando tempo, habilidade e multidisciplinariedade de conceitos para utilizá-los (LANDSBERG e COOPS, 1999; LANDSBERG, 2003; TAYLOR *et al.*, 2009). Por outro lado, o uso de modelos baseados em processos, contribuem para a compreensão de fatores ambientais que afetam o crescimento e de acordo com Johnsen *et al.* (2001) conferem maior capacidade de predição do crescimento e maior abrangência de aplicação.

Taylor *et al.* (2009) destacam que a escolha de qual modelo a ser utilizado na estimativa do crescimento e da produção florestal depende das informações disponíveis para sua calibração, validação, nível de detalhe e acurácia desejada. De acordo com Sanquetta (1996) em qualquer caso também é fundamental a necessidade de serem construídos de acordo com os objetivos do uso especificado.

A geração de variáveis e coeficientes que expressam numericamente o crescimento e produção das culturas, bem como os elementos meteorológicos que influenciam no crescimento, permite estimar a potencialidade econômica do cultivo da espécie. As relações entre as variáveis meteorológicas com a produção são complexas e afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Em espécies agrícolas, estudos que relacionam o crescimento e desenvolvimento com elementos meteorológicos, tais como com a temperatura do ar, são frequentes, enquanto que em espécies florestais há poucos estudos (SANDS e LANDSBERG, 2002).

O cultivo da acácia-negra é uma importante atividade econômica no estado do Rio Grande do Sul, sendo que em termos de área plantada situa-se logo após os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. A elaboração de modelos matemáticos que simulam a produção de biomassa e do acúmulo de carbono torna-se uma importante ferramenta para o planejamento das atividades florestais com essa espécie, tanto para empresas que compram matéria-prima e cultivam a acácia-negra, como para produtores que vendem a biomassa do fuste (casca + madeira) para fins diversos, além do interesse ambiental por diversas entidades no sentido de sequestro de carbono.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar equações para estimativa de produção de biomassa e acúmulo de carbono em plantios de acácia-negra, tomando como variáveis independentes a temperatura média, média máxima, média mínima do ar, umidade relativa do ar, soma térmica, precipitação e radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado a partir de duas pesquisas realizadas nos locais com maior concentração de plantios de acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no estado do Rio Grande do Sul: municípios de Cristal e Piratini. A primeira, conduzida por Mochiutti (2007), vem ser à base dos dados de produção de biomassa e acúmulo de carbono (base de dados 1) e a segunda, que se refere ao presente trabalho (base de dados 2), que teve como objetivo principal mensurar variáveis que são necessárias para a construção dos modelos, tais como a relação

área foliar / biomassa de folhas, coeficiente de extinção de luz, teores de carbono e dados de biomassa para validação das equações obtidas.

No município de Cristal, os povoamentos estão sob coordenadas centrais Sul 30° 55' S e 52°10' W e os de Piratini sob coordenadas centrais Sul 31° 24' S e Oeste 52°57' W.

6.3 ORIGEM DE DADOS DE BIOMASSA PARA CONSTRUÇÃO DOS MODELOS (BASE DE DADOS 1)

Os dados de biomassa utilizados para a construção dos modelos são provenientes de uma pesquisa conduzida por Mochiutti (2007). No seu trabalho um dos objetivos foi avaliar acúmulo, ciclo e exportação de nutrientes e de biomassa em povoamentos de acácia negra. Na pesquisa, foram avaliados povoamentos em uma sequência de idade de um, três e cinco anos, e em dois locais de cultivo (Cristal e Piratini). Dentro de cada local os povoamentos encontravam-se distribuídos numa distância máxima de 10 km entre si.

Os plantios em Cristal foram estabelecidos em áreas novas (1ª rotação) e os em Piratini em áreas de reforma da plantação (2ª rotação). Para todos os casos, o preparo do solo foi realizado na linha de plantio (cultivo mínimo), com uma subsolagem com três hastes a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens. Os plantios foram realizados com espaçamento de 3 x 1,5 metros (2.222 plantas por hectare) e no momento dessa operação foi adicionado 50 gramas de NPK (5-30-15) por planta.

O estudo compreendeu a amostragem de 6 povoamentos (3 em cada local de estudo) e a instalação de 18 parcelas (3 em cada povoamento) que foram monitoradas durante 2 anos.

Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte em que foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior da pendente. O tamanho das parcelas foi de 18 x 30 metros, equivalendo a seis linhas de plantio e 20 plantas em cada linha.

Foram realizadas avaliações de biomassa, altura e circunferência à altura do peito anualmente em julho. Todas as idades de um a sete anos (de forma a atingir

um ciclo de rotação) foram abrangidas: povoamentos que apresentavam um ano de idade no início da pesquisa em 2004 foram mensurados durante o primeiro, segundo e terceiro ano (2004 a 2006) e assim sucessivamente com os demais povoamentos amostrados, de forma a contemplar um ciclo de cultivo (7 anos).

A medição de circunferência foi realizada com fita métrica graduada em 0,5 cm e a altura com régua telescópica para as plantas menores que 10 m dessa variável e com hipsômetro Blume-leiss para as maiores que 10 m.

A determinação da biomassa acima do solo foi realizada por meio da amostragem de 98 árvores durante os três anos de avaliação. Dentro de cada local de plantio e idade de avaliação (1 a 7 anos), foi selecionada uma árvore para cada uma das classes de altura (povoamento com um ano) ou de diâmetro (povoamentos com dois a sete anos), de forma que a amplitude total das classes fosse contemplada. As árvores mensuradas estavam localizadas entre as três parcelas instaladas na encosta, sendo escolhidas as representativas de sua classe diamétrica ou de altura.

A mensuração da biomassa foi realizada por compartimento: madeira do tronco, casca do tronco, galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos. Após o corte da árvore rente ao solo, os compartimentos foram separados e pesados para determinação da biomassa úmida.

Para a determinação da biomassa seca, foram retiradas amostras de aproximadamente 200 gramas dos compartimentos galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos e imediatamente pesadas para determinação da massa úmida. Já para o fuste foram retirados 5 discos de 2 centímetros de espessura ao de sua altura de forma a abranger 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (considerada como diâmetro de topo de 4 cm). Posteriormente, essas amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 65 °C durante 72 horas e então novamente o material foi pesado, possibilitando, assim, a obtenção do teor de umidade e, conseqüentemente, a biomassa seca. Para os plantios com um ano de idade foram observados fustes com diâmetros à altura do peito menores que quatro centímetros, portanto, esse compartimento foi considerado como galho vivo.

A partir dos dados de altura e circunferência à altura do peito foi estimada a biomassa seca dos compartimentos de cada indivíduo por meio do modelo:

$$\ln(Y) = b_0 + b_1 \ln(\text{dap}) + b_2 \ln(h) \quad (1)$$

Em que:

Y = peso seco de cada compartimento (madeira, casca, galhos vivos, galhos mortos, folhas e flores + frutos) e total;

b_0 , b_1 , b_2 = coeficientes do modelo que foram ajustados e podem ser obtidos no trabalho de Mochiutti (2007);

DAP = diâmetro a altura do peito em cm;

H = altura total em m.

Os coeficientes do modelo, para cada idade, foram reajustados pela técnica do ajustamento simultâneo, ou seja, foram calculados juntamente (uma única vez) por um sistema de equações, conforme metodologia proposta por Parresol (2001). Essa técnica permitiu compatibilizar as estimativas, ou seja, o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que o da equação de biomassa total, e para isso foi utilizado o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f_1(X_1) + \varepsilon_1 \\ Y_2 &= f_2(X_2) + \varepsilon_2 \\ Y_3 &= f_3(X_3) + \varepsilon_3 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ Y_n &= f_n(X_n) + \varepsilon_n \\ Y_{\text{total}} &= f_{\text{total}}(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + \varepsilon_{\text{total}} \end{aligned}$$

Em que:

Y_i = biomassa de um dado compartimento (kg),

Y_{total} = biomassa total (kg),

X_i = variáveis independentes, no caso altura e diâmetro à altura do peito (cm),

A biomassa por hectare foi extrapolada utilizando-se a expressão:

$$B_i = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{A_i} \quad (2)$$

Em que:

B_i = biomassa seca de um dado compartimento ou total, em tonelada;

$\sum_{i=1}^n b_i$ = somatório da biomassa de todos os indivíduos que compunham uma determinada parcela, em tonelada;

A_i = área de uma determinada parcela, em hectare.

6.4 ORIGEM DE DADOS DE TEOR DE CARBONO, RELAÇÃO BIOMASSA DE FOLHAS / ÁREA FOLIAR, COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ E BIOMASSA (BASE DE DADOS 2)

As avaliações foram conduzidas em plantios comerciais de acácia negra nos mesmos locais que foram realizados o estudo conduzido por Mochiutti (2007), ou seja, nos municípios de Cristal e Piratini, e com as mesmas condições de cultivo.

Nos dois locais os plantios foram estabelecidos tanto em áreas novas (primeira rotação) como em de reformas da plantação (segunda rotação). Para todos os casos, o preparo do solo foi realizado na linha de plantio (cultivo mínimo), por meio de uma subsolagem com três hastes a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens. Os plantios foram realizados com espaçamento de 3 x 1,75 metros (1.904 plantas por hectare) para o ano um e 3 x 1,5 metros para as demais idades (2.222 plantas por hectare) e no momento dessa operação foi adicionado 50 gramas de NPK (5-30-15) por planta.

Em cada povoamento foi selecionada uma encosta de exposição norte em que foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior da pendente. O tamanho das parcelas foram de 9 x 16 metros para os povoamentos com um ano de idade e 9 x 14 metros para as demais idades, equivalendo a quatro linhas de plantio e 10 plantas em cada linha.

Nas parcelas todas as plantas foram mensuradas quanto à circunferência a altura do peito utilizando-se fita métrica graduada. As duas árvores que se aproximaram da média aritmética da circunferência a altura do peito em cada parcela foram selecionadas para avaliação da biomassa e da área foliar. Em cada parcela, foi também avaliada a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o solo.

A mensuração da biomassa foi realizada por compartimento da árvore: madeira do fuste + casca, galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos, sendo cada separado e pesado para a determinação da biomassa úmida com balança digital (*Portable Eletronic Scale*), com acurácia de 0,5 gramas.

Para a determinação da biomassa seca, foram retiradas amostras de aproximadamente 200 gramas dos compartimentos galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos e imediatamente pesadas para determinação da massa úmida. Já para o fuste foram retirados 5 discos de 2 centímetros de espessura nas posições correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (considerada como diâmetro de topo de 4 cm). Posteriormente, essas amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 75°C e após a constatação de massa constante, novamente o material foi pesado, possibilitando, assim, a obtenção do teor de umidade e, conseqüentemente, a biomassa seca por meio da expressão:

$$Bi = \frac{MU_i * MS_i}{MUa_i} \quad (3)$$

Em que:

Bi = biomassa seca de um dado compartimento, em kg;

MUi= massa fresca de um dado compartimento, em kg;

MSi= massa seca da amostra, em kg;

MUa_i= massa fresca da amostra, em kg.

A determinação da biomassa total foi realizada pela somatória da biomassa seca de todos os compartimentos (fuste - madeira + casca, galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos).

Após o processo de secagem das amostras, elas foram moídas em moinho Willey, secas novamente em estufa de circulação e renovação do ar a 65° C, e após a constatação da massa constante foi determinado o teor de carbono em analisador de carbono (C-144, LECO) no Centro de Excelência em Fixação de Carbono da Universidade Federal do Paraná.

Assim, o estudo compreendeu a amostragem de 8 povoamentos (4 em cada local de estudo), a instalação de 24 parcelas (3 em cada povoamento) e a amostragem de 48 árvores (2 árvores por parcela).

Para a determinação da área foliar foram retiradas três amostras de 50 gramas cada, sendo realizada a amostragem de folhas ao longo da copa de cada árvore. Os folíolos foram separados do pecíolo e ráquis e estendidos para a obtenção de uma superfície totalmente aberta, utilizando-se para tanto uma prancha de ferro aquecida a 65° C. A área foliar foi determinada utilizando-se um integrador (3000 *Canopy Analyser*, *Li-Cor*). Ao final do processo, todo o material (pecíolo,

ráquis e folíolo) foi seco em estufa de circulação e renovação do ar a 65° C, e após a constatação da massa constante foi pesado em balança analítica. A mensuração dessas duas variáveis permitiu estabelecer a relação área foliar por unidade de biomassa de folhas, e também o cálculo da área foliar de cada planta pela expressão:

$$AF = \frac{BF * AF_a}{BS_a} \quad (4)$$

Onde:

AF = área foliar em m²;

BF = biomassa seca das folhas, em Kg;

AF_a = área foliar da amostra, em m²;

BS_a = biomassa seca da amostra de folhas, em kg.

Ainda, foram feitas avaliação da radiação fotossinteticamente ativa, que consistiu em realizar 225 leituras utilizando-se um piranômetro (*LI-COR* 1600) ao longo de um dia (as 7h:30min, 9h, 12h, 15h, 16h:30min) no interior do povoamento em cada idade e em cada região, ou seja, 450 mensurações por idade.

Os pontos de avaliação foram instalados sistematicamente no interior de cada parcela em três sentidos: um situado na linha de plantio (1), outro na entre linha do plantio (2) e o terceiro formando um ângulo de 45° entre o ponto 1 e 2. Em cada sentido de avaliação foram fixadas cinco estacas (com altura de 28 centímetros a partir do nível do solo), distantes 75 centímetros entre si. A primeira estaca foi fixada a 38 cm da árvore de diâmetro médio da parcela.

As leituras dentro do povoamento foram realizadas a 30 centímetros de altura da superfície, já as leituras fora do povoamento, ou seja, a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre o povoamento foram realizadas em locais abertos por meio de cinco determinações antes e cinco depois de cada avaliação no interior do povoamento (conforme o horário de medição).

A partir da radiação incidente na superfície do solo e de índice de área foliar foi calculado o coeficiente de extinção de luz. Por sua vez, esse foi obtido adotando a teoria da lei de Beer, a qual relaciona que a luz solar ao atravessar as várias camadas de folhas justapostas de um dossel vegetativo tem sua intensidade decrescida exponencialmente com o aumento do grau de cobertura vegetal. Assim, o coeficiente médio de extinção (K) foi obtido por:

$$k = - \frac{\ln\left(\frac{RFA_t}{RFA_i}\right)}{IAF} \quad (5)$$

Onde:

K = é o coeficiente de extinção de luz, adimensional;

RFA_t = RFA transmitida pelo dossel que atinge a superfície do solo; e

RFA_i = RFA incidente sobre o povoamento.

IAF = índice de área foliar, adimensional, obtido pela razão entre a área foliar média em cada parcela e o espaçamento do cultivo;

Ln = logaritmo natural.

6.5 ORIGEM DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos: temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa do ar, precipitação e número de horas de insolação foram adquiridos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) da Estação Climatológica do município de Pelotas. Ela correspondeu a mais próxima dos locais de estudo para o período em avaliação dos povoamentos, distante aproximadamente 85 km de Cristal e 70 km de Piratini.

A radiação global incidente foi estimada por meio da equação de Ångström modificada por Prescott e Penman, conforme desenvolvimento matemático apresentado por Vianello e Alves (2000) e com coeficientes ajustados para o município de Pelotas por Steinmetz *et al.* (1999).

6.6 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A estimativa da radiação fotossinteticamente ativa interceptada foi calculada com base no modelo proposto por Varlet-Grancher *et al.* (1989):

$$RFA_i = 0,95 * (RFA_{inc}) * (1 - e^{-k * IAF}) \quad (6)$$

Em que:

RFAi = radiação fotossinteticamente ativa interceptada, em GJ ha⁻¹;

K = coeficiente de extinção de luz, adimensional; tema do segundo capítulo dessa pesquisa, sendo de 0,29 para povoamentos com até cinco anos de idade e de 0,24 para os demais.

IAF = índice de área foliar, adimensional;

RFAinc = radiação fotossinteticamente ativa incidente, em GJ ha⁻¹.

O índice de área foliar (IAF) foi calculado pela razão entre a área foliar média em cada parcela e o espaçamento do cultivo, ou seja:

$$IAF = \frac{AF}{ASE} \quad (7)$$

Onde:

IAF = índice de área foliar, adimensional;

AF = área foliar média das duas plantas mensuradas por parcela, em m²;

ASE = área de solo explorada pela planta, ou seja, espaçamento de cultivo, em m².

A área foliar (AF) foi obtida por meio da multiplicação entre a biomassa de folhas com a relação área foliar / biomassa de folhas, que foi tema no primeiro capítulo da presente pesquisa, ou seja:

$$AF = BF \alpha \quad (8)$$

Em que:

AF = área foliar da planta, em m²;

BF = biomassa de folhas da planta, em Kg;

α = proporção de AF (em m²) por Kg de folha seca, sendo de 6,5572 para povoamentos com até três anos de idade e de 6,1631 para as demais.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa incidente foi considerada como sendo 45% da radiação solar global incidente. Essa fração representa o valor médio daqueles encontrados para o RS por Assis e Mendez (1989) e Pandolfo (1995). A estimativa da radiação fotossinteticamente ativa acumulada foi realizada com base em Monteith (1977) e Varlet-Grancher *et al.* (1989).

Os valores dos elementos meteorológicos, precipitação acumulada e umidade relativa média, temperatura média máxima, média mínima e média do ar foram calculados em relação à data de plantio e as de mensuração da biomassa.

Ainda, foi realizada a soma térmica diária (STd), compreendida entre a data de plantio e a de mensuração da biomassa. Ela foi calculada considerando as temperaturas cardinais e com base na expressão proposta por Arnold (1960) e também destacada por Streck *et al.* (2005) e Streck *et al.* (2007). Na literatura não foram encontrados valores de temperatura base, ótima e máxima para o desenvolvimento da cultura da acácia negra, e então foram utilizados os limites térmicos determinados para *Eucalyptus grandis*, sendo de 10 °C a temperatura base, 27 °C a ótima (MARTINS, 2007) e 36 °C a máxima (ALMEIDA *et al.*, 2004). A soma térmica acumulada (STa, em °C dia) foi dada pelo somatório da STd.

Os teores de carbono, por compartimento da biomassa, foram analisados utilizando-se a estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo e intervalo de confiança), de forma a apresentar somente uma análise exploratória, já que o objetivo do presente trabalho não é a análise profunda dessa variável.

6.7 MODELOS DE PREDIÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E DO ACÚMULO DE CARBONO GERADOS PELO PROCEDIMENTO *STEPWISE*

O procedimento de seleção de variáveis *Stepwise* foi utilizado para gerar equações de produção de biomassa e acúmulo de carbono, em nível de 5% de probabilidade de erro. Draper e Smith (1966) destacam que esse método é um dos mais recomendados para uma seleção criteriosa das variáveis explicativas no estabelecimento de um modelo.

O método *Stepwise* envolve um reexame de todos os passos das variáveis incorporadas no modelo em estágio prévio, sendo uma combinação dos métodos *Forward* e *Backward*, ou seja, efetua o procedimento “passo a passo para frente e para trás”. Este procedimento parte da variável independente mais correlacionada com a variável dependente para no passo seguinte incluir mais uma variável que apresentar maior correlação parcial, sendo então, as variáveis independentes presentes no modelo testadas pelo teste F para verificar se integra ou não o modelo.

As variáveis independentes de entrada nos modelos foram: temperatura média máxima, média mínima e média do ar (em °C), umidade relativa do ar (em %),

precipitação acumulada (em mm), soma térmica acumulada ($^{\circ}\text{C}$ dia) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (GJ ha^{-1}). As variáveis dependentes estudadas foram a produção de biomassa e acúmulo de carbono (em Mg ha^{-1}) total e para o compartimento do fuste (madeira do fuste + casca).

Inicialmente, foram realizadas análises de correlação de Pearson entre as variáveis dependentes com as independentes. O teste t a um nível de 5% de significância foi utilizado para verificar se o coeficiente de correlação foi igual a zero e, conseqüentemente, avaliar a existência de uma relação linear entre as variáveis.

6.7.1 Avaliação da melhor equação

Para avaliação da qualidade os ajustes, tanto para a biomassa total como a do fuste, foram utilizados os seguintes critérios técnicos: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj} , em %); erro padrão da estimativa (S_{yx} , em %), valor de F para $p < 0,05$, significância de todos seus coeficientes e gráfico dos resíduos em função dos valores estimados (em %).

Os modelos também foram avaliados quanto as condicionantes da regressão por meio do teste de White (que estabelece a condição para a variação residual de uma variável em um modelo de regressão seja constante – homogeneidade), Shapiro-Wilk (o qual testa a hipótese de nulidade de uma amostra tem origem de uma população normalmente distribuída – normalidade) e Durbin-Watson (que se constitui de um procedimento para provar se o erro está correlacionado em série – independência).

6.7.2 Desempenho dos modelos e validação das equações

Para verificar o desempenho dos modelos obtidos para a predição da biomassa, eles foram ajustados com os dados oriundos da segunda base, e avaliado quanto às estatísticas de ajuste denotadas pelo coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa.

A validação das equações consistiu em estimar a produção de biomassa pelas equações selecionadas como de melhor desempenho (obtidas na primeira base de dados) e comparar as estimativas com os respectivos reais (obtidos na segunda base de dados) pelo teste Qui-quadrado (χ^2) a 5% de probabilidade.

6.8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os coeficientes ajustados do modelo $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij} \ln(\text{dap}) + b_{ij} \ln(h) + \varepsilon_i$ obtidos pelo ajustamento simultâneo são apresentados na TABELA 26.

TABELA 26 - COEFICIENTES AJUSTADOS DO MODELO $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij} \ln(\text{dap}) + b_{ij} \ln(h) + \varepsilon_i$ OBTIDOS PELO AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA POR COMPARTIMENTO EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Compartimento	Coeficiente	Ano 1	Ano 3	Ano 5	Ano 7
Madeira	b_{11}	0	-3,5635	-4,41959	-2,29951
	b_{12}	0	2,2920	1,790904	1,811719
	b_{13}	0	0,5361	1,37284	0,64451
Casca	b_{21}	0	-4,6877	-3,67684	-2,37324
	b_{22}	0	2,1633	2,525731	1,999644
	b_{23}	0	0,3865	-0,26433	-0,14525
Galhos vivos	b_{31}	-3,7900	-0,1800	-3,8679	-3,97139
	b_{32}	3,0869	2,2339	2,308719	2,686246
	b_{33}	0	-1,1909	0,109508	-0,16443
Folhas	b_{41}	-3,7373	-3,2646	-4,96035	-6,0186
	b_{42}	2,3427	2,1115	2,758037	2,602711
	b_{43}	0	-0,0845	-0,28753	0,116655
Flores e frutos	b_{51}	0	8,4688	-16,6806	-8,15597
	b_{52}	0	3,4019	1,170397	1,436436
	b_{53}	0	-7,0810	4,891307	1,375646
Galhos mortos	b_{61}	0	-11,1935	-381694	-0,86692
	b_{62}	0	0,3521	2,433267	3,626214
	b_{63}	0	3,9245	-0,37795	-2,59852

Em que: b_{ij} é o coeficiente do modelo.

As estatísticas do ajuste, representada pelo coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado, são destacados na TABELA 27. Essa técnica permitiu compatibilizar a estimativa de biomassa dentro de cada árvore, ou seja, o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que da equação para o total. Assim, a biomassa total (y_{total}) de cada árvore pode ser obtida pela soma das funções de cada compartimento (y_i), portanto: $y_{\text{total}} = y_{\text{madeira}} + y_{\text{casca}} + y_{\text{galhos vivos}} + y_{\text{folhas}} + y_{\text{flores e frutos}} + y_{\text{galhos mortos}}$.

TABELA 27 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DO MODELO $\ln(Y_i) = b_{ij} + b_{ij} \ln(\text{dap}) + b_{ij} \ln(h) + \varepsilon_i$ OBTIDOS PELO AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA POR COMPARTIMENTO E TOTAL EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Compartmento	Estatística	Ano 1	Ano 3	Ano 5	Ano 7
Madeira	R ²	---	95,45%	99,25%	97,73%
	R ² aj	---	95,18%	99,22%	97,63%
Casca	R ²	---	91,79%	98,09%	95,53%
	R ² aj	---	91,30%	98,02%	95,33%
Galhos vivos	R ²	96,82%	90,45%	84,33%	95,53%
	R ² aj	96,71%	89,89%	83,75%	95,33%
Folhas	R ²	94,55%	87,60%	92,93%	84,81%
	R ² aj	94,36%	86,87%	92,67%	84,15%
Flores e frutos	R ²	---	76,97%	85,26%	46,44%
	R ² aj	---	75,61%	84,72%	44,11%
Galhos mortos	R ²	---	59,34%	79,00%	65,50%
	R ² aj	---	56,95%	78,22%	64,00%
Total	R ²	96,47%	99,40%	99,44%	99,05%
	R ² aj	96,20%	99,23%	99,34%	98,86%

Em que: R² = coeficiente de determinação e R²aj = coeficiente de determinação ajustado.

A partir dessas equações, foi estimada a biomassa de cada indivíduo, para então realizar o somatório da biomassa de todos os presentes em uma determinada parcela e, por fim, extrapolar para o hectare. Esses cálculos originaram os dados de produção de biomassa e foram correlacionados com variáveis meteorológicas. Os valores de produção de biomassa aqui obtidos, ao longo do ciclo e por local de cultivo, são idênticos aos apresentados e discutidos por Mochiutti (2007), já que o ajuste simultâneo não altera significativamente os valores da estimativa de biomassa, mas sim, compatibiliza as estimativas dentro de cada árvore.

A produção de biomassa apresentou relação linear positiva com todas as variáveis. Com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, soma térmica e precipitação acumulada à correlação foi muito forte (97,45%, 95,05% e 92,31%, respectivamente), forte com a temperatura média mínima (63,70%), regular com a temperatura média (54,40%) e umidade relativa (57,94%). Essas mesmas tendências foram observadas para a biomassa do fuste, em que a correlação foi muito forte com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, soma térmica e precipitação acumulada (95,76%, 94,61% e 93,36%, respectivamente), regular com a temperatura média mínima do ar (58,52%), média do ar (51,44%) e umidade relativa do ar (47,05%). A temperatura média máxima do ar resultou em correlação

fraca com a produção de biomassa total (4,02%) e do fuste (2,07%), sendo a única a não ser significativa ($p > 0,05$).

A radiação solar, precipitação, as temperaturas e umidade do ar são os principais fatores climáticos que influenciam no crescimento e desenvolvimento de uma floresta (TROVATI, 1982). Assim, estudos têm sido conduzidos para identificar as relações que ocorrem entre os elementos meteorológicos com o crescimento e produção das culturas, para então desenvolver modelos de predição que são baseados em processos.

Altas temperaturas podem reduzir a assimilação de carbono da planta devido ao aumento da transpiração e ao fechamento dos estômatos. Por outro lado, em temperaturas baixas, tais como em dias com ocorrência de geadas, também ocorre redução da atividade fotossintética por certo período de tempo em consequência do congelamento das células (LARCHER, 2000). Nesse sentido, é apropriado correlacionar a produção de biomassa com a soma térmica, pois no seu cálculo são acumulados os valores de temperatura média diária do ar acima da temperatura base e abaixo da superior, ou seja, dentro dos limites térmicos de uma determinada espécie. De acordo com McMaster e Wilhelm (1997), em dias com temperatura abaixo da base não ocorre desenvolvimento ou este é tão pequeno que, para fins de simulação, pode ser considerado desprezível. Do mesmo modo, ocorre quando a temperatura está acima da máxima.

A forte relação linear revelada entre a produção de biomassa e a soma térmica é coerente, e ela permite identificar a quantidade de energia necessária a ser acumulada para completar o ciclo de cultivo, ou ao mesmo tempo, para produzir certa quantidade de biomassa. Diversos autores (ARNOLD, 1959; ARNOLD, 1960, BROWN, 1970; McMASTER e WILHELM, 1997) tem relacionado a soma térmica acumulada com o desenvolvimento de plantas, especialmente em culturas agrícolas, mas também em espécies florestais, tais como em mudas de eucalipto por Oliveira *et al.* (2012). É adequado que em próximos estudos sejam determinadas as temperaturas cardeais para a acácia negra, pois ela varia em função do genótipo e do subperíodo de desenvolvimento (STRECK, 2002; STRECK *et al.*, 2003; STRECK *et al.*, 2005).

A forte relação linear entre a produção de biomassa e a precipitação acumulada também é coerente e condiz com os resultados de pesquisa observados por diversos autores. Allen e Albaugh (1999) destacam que em plantios de *Pinus*

taeda a baixa disponibilidade de água e temperaturas extremas afetam negativamente a área foliar e, conseqüentemente, reduzem a interceptação e uso da radiação. Desse modo, a produção tende a ser menor, já que ela depende da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

Outros autores (SANDS e MULLIGAN, 1990; BLAKE e TSCHALPLINSKI, 1992; LANDSBERG, 2003) destacam que a água é um dos fatores mais limitante à produtividade florestal por controlar a abertura e o fechamento estomático, absorção de nutrientes do solo e por ser o meio onde ocorrem as reações químicas e bioquímicas da fotossíntese. De acordo com Binkley *et al.* (2004) uma folha com o suprimento de água adequado, tem condições de fixar mais carbono por unidade de luz interceptada do que uma folha com estresse hídrico e estômatos fechados. Outros estudos, tais como conduzidos com eucalipto, relatam acréscimo na produção primária líquida com o aumento da disponibilidade de água para a floresta, havendo acréscimo na interceptação de luz e na eficiência fotossintética (BINKLEY *et al.*, 2004; RYAN *et al.*, 2010; STAPE *et al.*, 2010).

Stape (2002) concluiu que a precipitação está extremamente relacionada com a produção do eucalipto, a qual explicou 80% da variação do incremento médio anual, ou seja, resultado semelhante ao observado com a produção de biomassa da acácia negra. Outros trabalhos, tais como de Benson *et al.* (1992), Snowdon e Benson (1992), Samuelson *et al.* (2004) e Williams e Gresham (2006), em ensaios com irrigação, também observaram a dependência da produção com a disponibilidade de água no solo.

Entretanto, o desenvolvimento de uma determinada espécie também depende de outros fatores ambientais, e entre eles, destaca-se a temperatura do ar (HODGES, 1991; YAN e HUNT, 1999; STRECK, 2002; GRAMIG e STOLTENBERG, 2007). Essa situação também foi evidenciada para a acácia negra, visto as correlações significativas obtidas com temperatura do ar (média e média mínima) e a produção de biomassa. A temperatura afeta as taxas dos processos metabólicos ao agir na atividade do sistema enzimático, de forma a impactar o crescimento da planta, especialmente no balanço de carbono, por meio da influencia na fotossíntese, respiração, balanço de energia, transpiração e desenvolvimento do ciclo da planta (LANDSBERG e SANDS, 2011). Além disso, temperaturas extremas, tais como em dias de ocorrência de geada, podem ocasionar danos aos tecidos e

interromper o crescimento temporário ou permanente, sendo significativa fonte de estresse abiótico (LARCHER, 2000; LANDSBERG, 2003).

A correlação linear mais alta da produção de biomassa (total e do fuste) foi com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Diversos pesquisadores observaram a dependência da produção de biomassa com essa variável, inicialmente por Montheith (1965, 1972, 1977) em experimentos com culturas agrícolas, e, posteriormente, em espécies florestais por Linder (1985), Cannel (1989), Wang *et al.* (1991), Saldarriaga e Luxmoore (1991), Landsberg e Hingston (1996), Dewar (1996), Kiniry (1998), McCrady e Jokela (1998), Gower *et al.* (1999), Sinclair e Muchow (1999), Mariscal *et al.* (2000), STAPE (2002), Stape *et al.* (2008), Caron *et al.* (2013a), Caron *et al.* (2013b) e Campoe *et al.* (2013).

Nesse sentido, a produção de biomassa de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada pelas folhas e da eficiência com que a ela converta essa energia radiante em fotoassimilados, por meio do processo fotossintético. Montheith (1965, 1972, 1977) observou que plantas saudáveis que possuem à disposição quantidades adequadas de água e nutrientes, a produção de biomassa é governada pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

O procedimento de seleção de variáveis *stepwise* foi eficiente para alcançar o objetivo deste trabalho. Para a biomassa total (BT) e do fuste (BF) o método gerou um único passo, com a inclusão da variável independente mais correlacionada com a produção de biomassa, ou seja, a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (RFAiac), resultando nas equações $BT = 2,3122 + 0,002 RFAiac$ e $BF = 4,2260 + 0,0017 RFAiac$ (TABELA 28 e 29 e FIGURA 19).

TABELA 28 - ESTATÍSTICA DOS MODELOS OBTIDOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA TOTAL (B) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Modelo	R ² aj	Syx	F	α (F)	W	SW	DW
$B = b_0 + b_1 RFAiac + \epsilon_i$	91,06%	21,75%	418,49	8,55E-23	7,05 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,68 ^{ns}
$B = b_1 RFAiac + \epsilon_i$	94,56%	21,58%	1326,89	2,7E-32	11,92 ^{ns}	0,98 ^{ns}	1,83 ^{ns}
Coefficiente	Erro padrão	T	α (t)	Intervalo de confiança para o coeficiente			
$B = b_0 + b_1 RFAiac + \epsilon_i$							
b ₀	2,3122	3,8553	0,5997	0,5521	-5,4798	≤ Y ≤	10,1041
b ₁	0,0020	0,0001	20,4569	8,55E-23	0,0018	≤ Y ≤	0,0022
$B = b_1 RFAiac + \epsilon_i$							
b ₁	0,0021	0,0001	36,4265	7,45E-33	0,0019	≤ Y ≤	0,0022

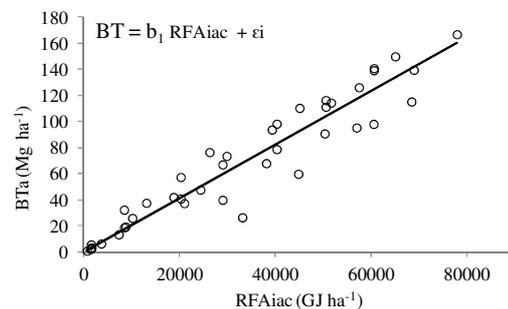
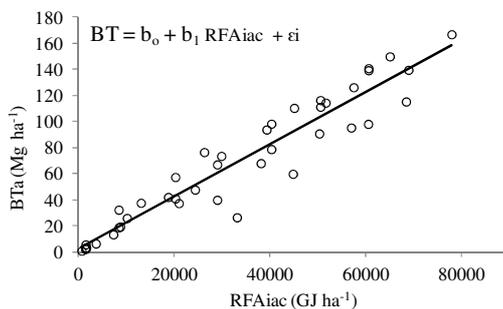
Em que: RFAiac = radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada, R^2 aj = coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão da estimativa, F = valor de F da análise de variância, α (F) valor da probabilidade de F, W = White, SW = Shapiro-Wilk, DW = Durbin-Watson.

TABELA 29 - ESTATÍSTICA DOS MODELOS OBTIDOS PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO FUSTE (B) EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL

Modelo	R^2 aj	Syx	F	α (F)	W	SW	DW
$B = b_0 + b_1 RFAiac + \epsilon_i$	88,42%	21,76%	268,30	1,06E-17	4,33 ^{ns}	0,93*	1,70 ^{ns}
$B = b_1 RFAiac + \epsilon_i$	93,85%	21,76%	1028,17	5,36E-27	4,05 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,76 ^{ns}
Coeficiente	Erro padrão	T	α (t)	Intervalo de confiança para o coeficiente			
B = b ₀ + b ₁ RFAiac + ϵ_i							
b ₀	-4,2260	4,2834	-0,9866	0,3308	-12,9310	≤ Y ≤	4,4790
b ₁	0,0017	0,0001	16,3800	1,06E-17	0,0014	≤ Y ≤	0,0019
B = b ₁ RFAiac + ϵ_i							
b ₁	0,0016	0,0000	32,0651	1,55E-27	0,0015	≤ Y ≤	0,0017

Em que: RFAiac = radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada, R^2 aj = coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão da estimativa, F = valor de F da análise de variância, α (F) valor da probabilidade de F, W = White, SW = Shapiro-Wilk, DW = Durbin-Watson.

Dado que a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada está presente no modelo, nenhuma outra variável apresentou correlação parcial significativa com a produção de biomassa de modo a ter possibilidade de integrar o modelo ($p < 0,05$), gerando, então, somente um único passo. Entretanto, ressalta-se a importância de conduzir novos estudos de forma a contemplar o efeito, por exemplo, dos períodos de déficit hídrico e da ocorrência de geada na produção de biomassa, principalmente no período inicial do estabelecimento da floresta, onde as plantas são mais sensíveis.



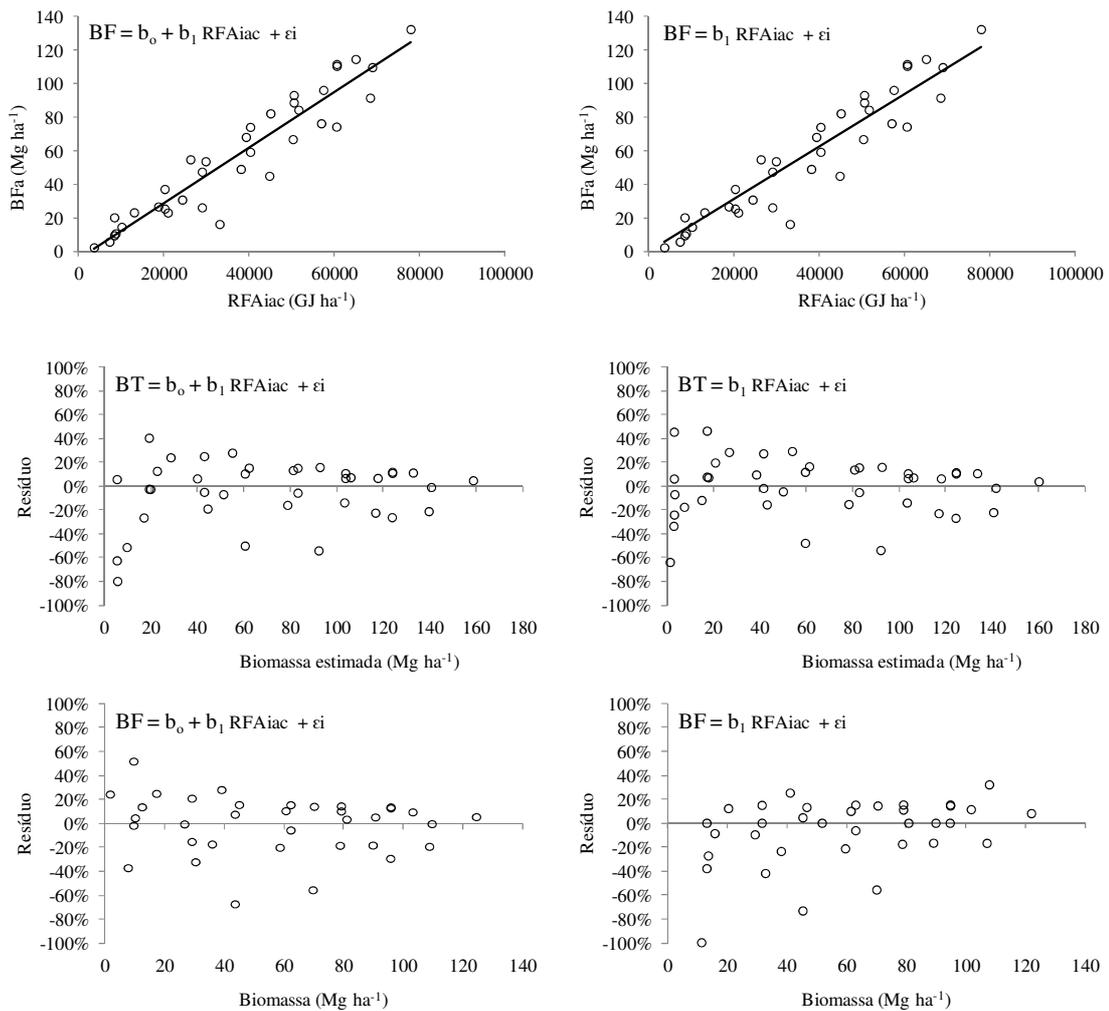


FIGURA 19 - TENDÊNCIA DO AJUSTE E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA TOTAL (BT) E DO FUSTE (BF) EM RELAÇÃO A BIOMASSA ESTIMADA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE: RFAiac = RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA E BA = BIOMASSA ACUMULADA

FONTE: O autor (2013)

É fato que uma floresta sob o efeito da estiagem no período inicial não terá a mesma produção final que uma conduzida sem déficit hídrico. Entretanto, Albaugh *et al.* (2004) observaram crescimento relativamente pequeno em *Pinus taeda* sob tratamento irrigado, devido à boa distribuição pluviométrica ao longo do ano e baixo déficit hídrico. Devido a esses resultados, os autores enfatizam a necessidade de reavaliar o conceito de a água ser um dos principais fatores limitante do sítio florestal em áreas de clima mais ameno e com boa distribuição pluviométrica.

Cabe também em próximas pesquisas avaliar se o efeito de outras variáveis estaria intrinsicamente modelada frente aos coeficientes angulares da produção de biomassa em função da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, pois, por exemplo, a ocorrência de geadas severas e períodos de déficit hídrico resultariam na

redução da área foliar da planta, logo, a quantidade de luz interceptada também seria menor, assim como, a produção. Também é apropriado desenvolver estudos para a predição da área foliar em função de variáveis ambientais, e a partir de sua simulação, recalculando a radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Isso permitiria avaliar o efeito de diversas condições ambientais na produção de biomassa, sendo o modelo aqui obtido, que envolve a radiação fotossinteticamente ativa interceptada a base do estudo para simulação.

A associação da produção da biomassa com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, proposta por Montheith e obtida no presente trabalho, é um dos modelos mais simplificados para a estimativa do crescimento e da produção. Ele tem sido a base teórica em modelos ecofisiológicos que levam em conta a interceptação da radiação fotossintética pelas folhas (WANG e JARVIS, 1990; LANDSBERG e WARING, 1997) e de grande importância para estudos relacionados à ecofisiologia florestal (BINKLEY *et al.*, 2004).

O coeficiente b_0 das duas equações não foi significativo ($p > 0,05$), ocasionando aumento do erro padrão dos coeficientes. Dessa maneira, testou-se a sua exclusão, resultando nas equações $BT = 0,00197 \text{ RFAiac}$ e $BF = 0,0016 \text{ RFAiac}$, havendo uma melhora de 3,5% e 5,43% no coeficiente de determinação ajustado, respectivamente, menor erro padrão da estimativa (S_{yx}) e erro padrão do coeficiente e, conseqüentemente, melhora no intervalo de confiança (TABELA 28 e 29 e FIGURA 19).

Todas as equações apresentaram adequada distribuição dos resíduos (FIGURA 19) e atenderam as condicionantes de regressão testadas, dada pela não significância ($p > 0,05$) do teste de White, Shapiro-Wilk e Durbin-Watson. Além disso, as estatísticas de ajuste das equações foram satisfatórias, apresentando coeficiente de determinação maior que 88% e erro padrão da estimativa menor que 22%.

Visto a melhora das estatísticas de ajuste obtida com o modelo sem intercepto, esse foi selecionado para o uso na predição da biomassa total e do fuste, ou seja, $B = b_1 \text{ RFAiac} + \epsilon_i$. Logo, ele também é adequado para a predição do acúmulo de carbono.

Deve-se destacar que a subtração das equações da biomassa total e do fuste gera a equação da biomassa da copa (BC). Tal aplicação resultou em $BC = 0,0005 \text{ RFAiac}$ ($R^2_{aj} = 81,2\%$ e $S_{yx} = 22,99\%$), denotando o mesmo coeficiente

angular ao obtido pelo ajuste do método dos mínimos quadrados ordinário. Essa situação é coerente, pois na posse de um mesmo modelo linear para os diferentes compartimentos da biomassa (no caso fuste e copa), a somatória de seus coeficientes gera a equação para a biomassa total, produzindo o efeito do ajuste simultâneo.

Assim, a partir dos coeficientes angulares obtidos, a estimativa pode ser realizada para cada compartimento e ao mesmo tempo para o total, já que o ajuste simultâneo garante a qualidade global da predição, ou seja, o resultado do somatório das equações de cada compartimento é o mesmo que da equação de biomassa total (FIGURA 20).

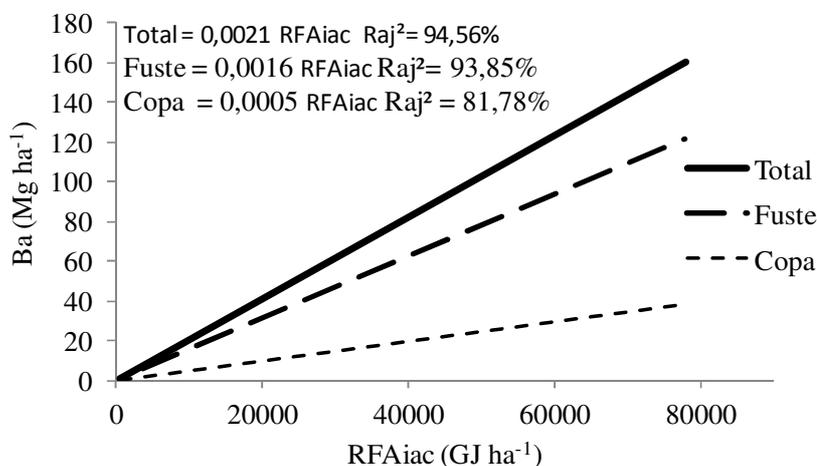


FIGURA 20 - EQUAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA TOTAL, FUSTE E COPA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA NO RIO GRANDE DO SUL. EM QUE: RFAiac = RADIAÇÃO FOTOSINTETICAMENTE ATIVA INTERCEPTADA ACUMULADA E BA = BIOMASSA ACUMULADA

FONTE: O autor (2012)

Essa situação é apropriada na modelagem da produção, já que ao interceptar radiação fotossintética e converter em fotoassimilados, o sistema de equações estima a quantidade de biomassa produzida e, ao mesmo tempo, especula a partição da biomassa dentro da árvore. Conhecer a alocação de biomassa florestal é um fator importante do ponto de vista do Manejo Florestal, pois ela permite conhecer o acúmulo de nutrientes nos compartimentos da árvore e tão logo o processo de ciclagem. O acúmulo de nutrientes, nos diversos componentes da biomassa, varia ao longo do ciclo de cultivo, por causa das diferenças de alocação de biomassa e concentração dos nutrientes (LANDSBERG, 1986; PALLARDY, 2008).

É fato que ao longo do ciclo de crescimento a partição da biomassa não é a mesma entre os compartimentos, entretanto, essas diferenças estão intrinsicamente modeladas frente aos valores dos coeficientes angulares obtidos. As diferentes proporções entre os compartimentos da biomassa ao longo da linha estimativa são induzidas por dois fatores: coeficientes angulares diferentes entre os compartimentos e compatibilidade das estimativas de biomassa gerada pelo ajuste simultâneo.

O modelo obtido foi testado em um novo conjunto de dados, oriundos da segunda base. O ajuste foi realizado para a produção de biomassa (total, fuste e copa) das árvores médias quanto ao diâmetro à altura do peito, e foram obtidas as seguintes equações:

$$BF = 0,0017 \text{ RFAiac} \quad (9)$$

$$BC = 0,0004 \text{ RFAiac} \quad (10)$$

$$BT = 0,0021 \text{ RFAiac} \quad (11)$$

Em que:

BF = produção de biomassa do fuste (kg m^{-2});

BC = produção de biomassa de copa (kg m^{-2});

BT = produção de biomassa total (kg m^{-2});

RFAiac = radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (MJ m^{-2}).

As estatísticas de ajustes mostraram-se satisfatórias, denotando coeficientes de determinação maiores que 80% e erros padrão da estimativa menores que 38%. Essa situação evidencia que o modelo empregado é adequado para o uso na predição da produção de biomassa.

As equações anteriores resultam na produção de biomassa em quilogramas por metro quadrado e a extrapolação para o hectare é simples, bastando multiplicar por 10.000 (área em metros quadrados de um hectare) e pela sobrevivência de árvores no povoamento. A produção de biomassa em megagrama de um determinado povoamento pode ser obtida pelas seguintes equações:

$$BF = 0,017 \text{ RFAiac} * S * A \quad (12)$$

$$BC = 0,004 \text{ RFAiac} * S * A \quad (13)$$

$$BT = 0,021 \text{ RFAiac} * S * A \quad (14)$$

Em que:

BF = produção de biomassa do fuste (Mg ha^{-1});

BC = produção de biomassa de copa (Mg ha^{-1});
BT = produção de biomassa total (Mg ha^{-1});
RFAiac = radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (MJ m^{-2});
S = sobrevivência de árvores (em decimal);
A = área do povoamento (em hectare).

Os coeficientes angulares obtidos para a produção de biomassa das árvores médias por metro quadrado foram próximos àqueles para a de biomassa por hectare, já que suas unidades são equivalentes, ou seja, um Mg GJ^{-1} corresponde a um kg MJ^{-1} . Assim, o desempenho das equações obtidas para a produção de biomassa por hectare foi avaliado com a inserção de um novo conjunto de dados, oriundos das árvores médias quanto ao diâmetro à altura do peito. O teste de Qui-quadrado foi empregado para tal fim, e revelou valores de 5,73, 0,39 e 0,89, respectivamente para a biomassa total, fuste e copa, sendo todos não significativos. Isso implica que os valores estimados são iguais estatisticamente aos observados.

Desse modo, espera-se que os coeficientes gerados a partir da biomassa estimada por hectare são apropriados para o uso no processo de predição. Essas mesmas equações também podem ser utilizadas para a predição do acúmulo de carbono, desde que o resultado seja multiplicado pelo teor de carbono ou reajustadas, ou seja, que a resposta da variável dependente seja o estoque de carbono.

As estatísticas obtidas para todos os valores de teor de carbono, sem levar em consideração a idade do povoamento e o local de plantio, são apresentados na TABELA 30. O teor de carbono médio para a madeira foi de 44,12%, casca de 45,91%, galho vivo de 44,46%, Galho morto de 49,39%, folhas de 48,20% e flores + frutos de 47,43%. Para o cálculo do acúmulo de carbono no fuste (madeira e casca) e na copa (galhos vivos e mortos, folhas e flores + frutos), foram utilizadas médias de teor de carbono ponderadas, já que, compartimentos que possuem maior quantidade de biomassa, devem participar com maior peso na média dos teores de carbono. Assim, o teor médio para a biomassa de copa foi de 46,31% e para o fuste de 44,35%.

TABELA 30 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO TEOR DE CARBONO (%) POR COMPARTIMENTO DA BIOMASSA LONGO DO CICLO DA CULTURA DE ACÁCIA NEGRA (7 ANOS) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Estatística	Madeira	Casca	Galho vivo	Galho morto	Folhas	Flores e frutos
Média	44,12	45,91	44,46	49,39	48,20	47,43
Erro padrão	0,09	0,09	0,10	0,60	0,13	0,15
Desvio padrão	0,63	0,64	0,71	2,56	0,90	0,91
Variância	0,39	0,41	0,51	6,57	0,80	0,82
Intervalo	2,60	3,97	3,07	6,87	4,43	3,32
Mínimo	42,91	43,54	42,62	44,81	45,40	45,67
Máximo	45,50	47,51	45,69	51,68	49,83	48,99
Intervalo de confiança	43,94	45,73	44,26	48,16	47,94	47,12
	$\leq \mu \leq$					
	44,30	46,10	44,67	50,62	48,46	47,73

Desse modo, a produção de biomassa de cada compartimento foi multiplicada pelo teor de carbono respectivo e o modelo $B = b_0 + RFAiac + \epsilon_i$ foi reajustado, gerando as equações de predição do acúmulo de carbono na biomassa total (CT), no fuste (CF) e na copa (CC), ou seja, $CT = 0,00093 RFAiac$, $CF = 0,00070 RFAiac$, $CC = 0,00023 RFAiac$. As estatísticas de ajuste para essas são as mesmas que as apresentadas anteriormente para as de produção de biomassa.

6.9 CONCLUSÕES

A produção de biomassa total e do fuste da acácia-negra é correlacionada com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, temperatura média e média mínima do ar, umidade relativa do ar, soma térmica e precipitação.

A variável que apresentou a maior correlação com a produção de biomassa total e do fuste foi a radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Essa variável foi, portanto, selecionada para compor o modelo, sendo um resultado do método *stepwise*.

O modelo resultante ($B = b_0 RFAiac + \epsilon_i$) demonstrou-se apropriado para a estimativa da biomassa em povoamentos de acácia negra, revelando-se estável quanto às estatísticas de ajuste e resultados dos coeficientes quando testados em diferentes conjuntos de dados.

Esse modelo pode ser usado para a predição da biomassa total e do fuste, sendo o ajuste realizado facilmente por meio do método dos mínimos quadrados

ordinários. A subtração dos coeficientes (total – fuste) gera a equação para a biomassa de copa, sendo então, o resultado das estimativas de cada compartimento da biomassa compatível com a de total. Desse modo, ele também é apropriado para a predição da partição da biomassa ao longo do ciclo de cultivo.

Além das estatísticas de ajuste satisfatórias, o modelo obtido é composto de uma variável de fácil obtenção ou que pode ser facilmente estimada, altamente correlacionada com a produção de biomassa, sendo, portanto indicado para realizar predições da produção de biomassa da acácia negra.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biomassa total e do fuste da acácia negra, bem como o acúmulo de carbono, é correlacionada com as variáveis bioclimáticas. A variável que denotou maior correlação foi a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, sendo a única selecionada via o método *stepwise* para compor o modelo de predição.

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada, além da intensidade de incidência de radiação solar, é uma variável dependente de vários fatores, que podem ser descritos por meio de variáveis biofísicas, tais como o coeficiente de extinção e o índice de área foliar, que por sua vez, interage com o ambiente.

O índice de área foliar é uma medida da área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo. Portanto, conhecer o comportamento da área foliar, órgão responsável pela maior parte da fotossíntese, em função das condições ambientais, é de extrema importância, pois permite estabelecer relações e estimar a superfície fotossinteticamente ativa, a qual determinará a interceptação de luz e subsequente o crescimento da floresta.

Ficou evidenciada a importância de se considerar a idade do povoamento, assim como o local de cultivo para a obtenção da área foliar. Quando a área foliar foi correlacionada com variáveis meteorológicas e do solo, foi identificado que ela pode ser explicada pelo acúmulo de radiação solar global e pelos teores de fósforo e argila. Tal relação segue a premissa que a radiação solar global é uma medida de tempo, porém melhor do que aquela do calendário civil, enquanto que os teores de

fósforos e argila denotam fatores limitantes ao seu crescimento. Sem dúvidas, estudos que envolvem o crescimento em área de folhas com ambiente devem ser ampliados, possibilitando, assim, descrever melhor a interação que ocorre com as condições em que os povoamentos são cultivados.

É fato que a mensuração da área foliar é trabalhosa, porém, a partir dos coeficientes aqui obtidos, a área foliar pode ser obtida facilmente por meio da biomassa de folhas, evitando-se, assim, o processo laborioso da mensuração direta. Foram obtidas altas correlações entre a biomassa de folhas e a área foliar e também identificados dois grupos quanto a essas relações: o primeiro expressando povoamentos com até três anos de idade e o segundo para idades maiores.

Por outro lado, o coeficiente de extinção de luz, variável que expressa a influência das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel na atenuação da luz pela copa, mostrou-se dependente somente da idade, sendo, portanto, uma característica resposta das alterações morfométricas e morfofisiológicas principalmente das folhas ao longo do ciclo de cultivo da acácia negra.

Dessa maneira, a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, sendo uma variável associada à área de folhas (representada pelo índice de área foliar), bem como a dinâmica da interceptação da luz pelas folhas (denotada pelo coeficiente de extinção de luz), é influenciada pelas condições do ambiente em que as plantas são cultivadas e também pela própria estrutura da planta (caracterizada pelas mudanças morfométricas e morfológicas das folhas). Assim, ela é uma variável que tem grande chance de trazer boas respostas quanto à predição da biomassa e acúmulo de carbono em diversas situações em que as plantas são cultivadas.

Nesse sentido, a produção de biomassa (Y) de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada pelas folhas (RFA_{iac}) e da eficiência com que ela converte essa energia radiante em fotoassimilados (ϵb), por meio do processo fotossintético. O modelo resultante, $Y = \epsilon b RFA_{iac} + \epsilon i$, demonstrou-se apropriado para a predição da biomassa e acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra, revelando-se estável quanto às estatísticas de ajuste e resultados dos coeficientes quando testados em diferentes conjuntos de dados. Foi identificado que a eficiência de conversão, ou os coeficientes angulares, não sofreram a influência do local de cultivo, sendo, portanto, tais valores intrínsecos da espécie.

O modelo obtido também demonstrou apropriado para a predição da biomassa e acúmulo de carbono por compartimento, no caso testado para a copa e o fuste, sendo o ajuste realizado facilmente por meio do método dos mínimos quadrados ordinários. A adição dos coeficientes do fuste e da copa gera a equação para o total, sendo, então, o resultado das estimativas de cada compartimento compatível com a do total. Desse modo, o modelo também é apropriado para a predição da partição da biomassa ao longo do ciclo de cultivo, tornando-se, assim, um fator importante do ponto de vista do Manejo Florestal.

Além das estatísticas de ajuste satisfatórias, o modelo obtido é composto de uma variável de fácil obtenção, altamente correlacionada com a produção de biomassa e acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra, sendo, portanto, indicado para realizar predições. O modelo obtido, em que a produção de biomassa depende da quantidade de radiação interceptada e da sua eficiência de conversão em biomassa produzida, tem uma série de aplicações, que variam desde a simulação em locais em que ainda não foram realizados cultivos, estudos da produção em função da modificação do índice de área foliar e propriamente para povoamentos já estabelecidos. Em qualquer um dos casos, o modelo mostra-se uma importante ferramenta para a tomada de decisões, sendo útil para o planejamento das atividades silviculturais com a cultura da acácia negra.

REFERÊNCIAS

ALBAUGH, T.J.; ALLE, H.L.; FOZ, T.R. Individual tree crown and stand development in *Pinus taeda* under different fertilization and irrigation regimes. **Forest Ecology and Management**, v. 234, p. 10-23, 2006.

ALBER, J.D.; FEDERER, C.A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. **Oecologia**, v. 92, p. 463-474, 1992.

ALLEN, H.; E ALBAUGH, T.J. Ecophysiological basis for plantation production: A loblolly pine case study. **Bosque**, v. 20, n. 1, p. 3-8, 1999.

ALMEIDA, A. C.; MAESTRI, R.; LANDSBERG, J.J.; SCOLFORO, J.R.S. Linking process-based and empirical forest models in *Eucalyptus* plantation in Brazil. In: **Workshop Reality, Models and Parameter Estimation** - The Forest Scenario, Portugal, 2002.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (mata atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ALMEIDA, A.C.; MAESTRI, R.; LANDSBERG, J.J.; SCOLFORO, J.R.S. **Linking process-based and empirical forest models in Eucalyptus plantations in Brazil**. In: AMARO, A.; TOMÉ, M. (Eds.), Modeling Forest Systems. CABI, Wallingford, UK, p.63-74, 2003.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; AMBROGI, M.S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S.M.; BERTOLUCCI, F.L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 167-177, 2004.

ALMEIDA, A.; LANDBERG, L.; SANDS, P.J. Parameterization of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 93, p. 179-195, 2004.

ALVARES, C. A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo**. 279f. Tese (Doutorado

em Recursos Florestais) – Departamento de Recursos Florestais, Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Piracicaba, 2011.

ARNOLD, C.Y. The determination and significance of the base temperature in linear heat unit system. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, p. 430-445, 1959.

ARNOLD, C.Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. **American Society for Horticultural Science**, v. 76, n. 1, p. 682-692, 1960.

ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 2, n. 7, p. 797-800, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF: Ano base 2010**. Brasília: ABRAF, 2011.

ASSUNÇÃO, I. C. A; MARTINS, D. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do amendoim (*Arachis hypogaea* L). **Energia na Agricultura**, v. 23, n. 4, p. 34-43, 2008.

AUER, C. G.; SILVA, R. Fixação de nitrogênio em espécies arbóreas. In: CARDOSO, E. J. *et al.* **Microbiologia do solo**. Campinas: Ed. da UNESP, 1992, p.160 -167.

BASSANEZI, R. C; FERREIRA JUNIOR, W. C. **Equações Diferenciais com aplicações**. Harbra, 1988.

BATTAGLIA, M.; SANDS, P.; WHITE, D.; MUMMERY, D. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 251- 282, 2004.

BENSON, M.; MYERS, B.; RAISON, R. Dynamics of stem growth of *Pinus radiata* as affected by water and nitrogen supply. **Forest Ecology and Management**, v. 52, p. 117-137, 1992.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R.; CARDOSO, L.S.; SILVA, M.I.G. **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

BINKLEY, D.; CROMACK, Jr.K.; BAKER, D. Nitrogen fixation by red alder: biology, rates, and controls. In: HIBBS, D; DeBELL, D.D., TARRANT, R.F. (Eds) **Biology and management of red alder.**, Corvallis: Oregon State University Press, 1994. p. 57-72.

BINKLEY, D; GIARDINA, C. Biological nitrogen fixation in plantations. In: NAMBIAR, EKS; BROWN, A. (Eds) **Management of Soil, Water and Nutrients in Tropical Plantation Forests**, Canberra: ACIAR, p. 297-337, 1997.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, v.193, p. 5-16, 2004.

BLAKE, T.J. ; TSCHALPLINSKI, T.J. Water relations. In: MITCHELL, C.P.; FORD-ROBERTSON, J.B.; HINCKLEY, T.; SENNERBY-FORSSE, L. (Ed.). **Ecophysiology of short rotation forest crops**. London: Elsevier Applied Science, 1992. p. 66-94.

BOLAND, D.J. Genetic resources and utilisation of Australian bipinnate acacias (Botrycephalae). In: AUSTRALIAN ACACIAS IN DEVELOPING COUNTRIES. 1984, Gympie. **Proceedings**, 16. Canberra: ACIAR, 1987. p. 29-37.

BORGES, J. S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais**. 77 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.

BROWN, R. H.; BLASER, R.E. Leaf area index in pasture growth. **Herbage Abstracts**, v.38, n.1, p.1-9, 1968.

BROWN, D. M. **Fall Workdays in Ontario**. Ontario Agricultural College Facsheet: Guelph, 1970.

BURKHART, H.E. Development of empirical growth and yield models. In: Amaro, A. and Tomé, M. (eds.). **Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation**. Edições Salamandra, Oeiras, Portugal, pp. 53-60. 1997.

CALDEIRA, M.V.W.; RONDON NETO, R.M.; SCHUMACHER, M.V.; WATZLAVICK, L.F. Exportação de nutrientes em função do tipo de exploração em um povoamento

de *Acacia mearnsii* de Wild. **Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 97-104, jan/dez 2002.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; BARICHELLO, L.R.; VOGEL, H.L.M. Determinação do carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 47-54, 2003.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: ArtMed, 2003.

CAMPBELL, G.S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 36, p. 317-321, 1986.

CAMPOE; O.C.; STAPE, J.L. ; NOUVELLON, Y. ; LACLAU, J.P.; BAUERLE, W.L.; BINKLEY, D. ; GUERRIC LE MAIRE, G.L. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Mngemet**, v 28, p. 14-20, 2012.

CANNELL, M.G.R. Light interception, light use efficiency and assimilate partitioning in poplar and willow stands. In: PEREIRA, J.S.; LANDSBERG, J.J. (Ed.). **Biomass production by fast-growing tress**. Dordrecht: Kluxer Academic, 1989. p. 1-12.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J. K. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004.

CARON, B.O.; SCHMIDT, D.; MEDEIROS, S.L.P.; HELDWEIN, A.B.; MANFRON, P.A.. Eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa e distribuição de fitomassa produzida no meloeiro cultivado em estufa plástica na primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 215-219, 2002.

CARON, B. O.; MEDEIROS, S. L. P.; MANFRON, P. A.; SCHMIDT, D.; BIANCHI, C.; POMMER, S. F. Eficiência de conversão da radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de alface. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 261-268, 2003.

CARON, B.O. ; MANFRON, P. A. ; LUCIO, A. D. ; SCHMIDT, D. ; MEDEIROS, S. L. P. ; BONNECARRERE, R. A. C. ; NETO, D. D. Equações de estimativa da fitomassa da parte aérea de alface. **Ciência Rural**, v.37, n.5, p.1248-1254, 2007.

CARON, B.O.; SOUZA, V.Q.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E.. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, 2012.

CARON, B.O.; SOUZA, V.Q.; ELOY, E.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R. Resistência inicial de quatro espécies arbóreas em diferentes espaçamentos após ocorrência de geada. **Ciência Rural**, v. 1, n. 5, 2011.

CARON, B.O.; SOUZA, V.Q.; MANFRON, P.A.; BUSANELLO, C.; BEHLING, A.; ELOY, E.; BAMBERG, R. Eficiência do uso da radiação solar por plantas *Ilex paraguariensis* A cultivadas sob sombreamento e a pleno sol. **Ciência Florestal**. 2013. No prelo.

CARUZZO, A.; ROCHA, H.R. Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto (gap fraction) durante o experimento AMC/LBA. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. p. 2478-2485.

CHAZDON, R.L.; PEARCY, R.W.; LEE, D.W.; FETCHER, N. photosynthetic responses of tropical to contrasting light environments. In: MULKEY, S.S.; CHAZDON, R.L.; SMITH, A.P. (Eds). **Tropical plant ecophysiology**. New York: Chapman e Hall, 1996. p. 1-5.

CHEN, J. M.; BLACK, T. A.; ADAMS, R. S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 56, p. 129-143, 1991.

CHERRY, M.; HINGSTON, A.; BATTAGLIA, M.; BEADLE, C. Calibrating the LI-COR LAI-2000 for estimating leaf area index in eucalypt plantations. **Tas forests**, v. 10, p. 75-82, 1998.

CHRISTINA, M.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, v. 2, p. 1-10, 2011.

CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J.; HOLLAND, E.A. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 371-384, 2001.

CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J. Measuring net primary production in forest: concepts and field methods. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 356-370, 2001.

CLOSE, D.C. Within-canopy of nitrogen and photosynthetic activity of *Eucalyptus nitens* and *Eucalyptus globulus* in response to nitrogen nutrition. **Australian Journal of Botany**, v. 52, p. 133-140, 2004.

CLUTTER, J.L. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. **Forest Science**, v. 26, n.1. p. 117-120, 1980.

CLUTTER, J.L.; PIENAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Willey e Sons, 1983.

COMINS, H.N.; McMURTRIE, R.E. Long-term biotic of nutrient-limited forest ecosystems to CO₂-enrichment; equilibrium behavior of integrated plant-soil models. **Ecology Application**, v. 3, p. 666 -681, 1993.

CONTO, A.J.; DOSSA, D.; DEDECEK, R.; CURCIO, G.R.; HIGA, A.R. Estrutura familiar e formação da renda entre pequenos acacicultores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA, 34., 1996, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SOBER, 1997. p. 856-869.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LAW, B.E. Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG. **Ecologic Modell**, v. 183, p. 1-18, 2005.

CORBEELS, M ; McMURTRIE, R.E. ; PEPPER, D.A. ; MENDHAM, D.S. ; GROVE, T.S. ; O'CONNELL, A.M. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: a modeling analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 217, p. 1- 26,2005.

CROMER, R. N. Site amelioration for fast growing plantations. In: Symposium on site and productivity of fast growing plantations, 1984, Pretoria. **Proceedings...** Pretoria, África do Sul, IUFRO, 1984. p.181-195.

DAUGHTRY, C. S. T. Direct measurement of canopy structure. In: GOEL, N. S.; NORMAN, J. M. (Eds.) **Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions**. London: Harwood, 1990. p. 45-60.

DEDECEK, R.A.; et al. Sistemas de reparación del suelo para plantación de *Acacia mearnsii* en dos lugares y su efecto en la productividad y en la erosión hídrica. In: CONGRESO LATINO-MERICANO IUFRO: EL MANEJO SUSTENTABLE DE LOS RECURSOS FORESTALES, DESAFÍO DEL SIGLO XXI, 1., 1998, Valdivia, Chile. **Actas...** Valdivia, Chile, 1998.

DEWAR, R.C. The correlation between plant growth and intercepted radiation: an interpretation in terms of optimal plant nitrogen content. **Annals of Botany**, v. 78, p. 125-136, 1996.

DEWAR, R.C. Information theoretic explanation of maximum entropy production, the fluctuation theorem and self-organized criticality in non-equilibrium stationary states. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, v. 36, p. 631-641, 2003.

DOURADO NETO, D. Principles of crop modeling and simulation. I. Uses of mathematical models in agriculture science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 46-50, 1998.

DOVEY, S. B.; DU TOIT, B. Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. **Trees**, v. 20, p. 273-277, 2006.

DRAPER, N.R.; SMITH, R. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 407p.

DYE, A.D.; OLBRICH, B.W. Estimating transpiration from 6-year-old *Eucalyptus grandis* trees: Development of a canopy conductance model and comparison with independent sap flux measurements. **Plant Cell and Environment**, v. 16, p. 45-53, 1993.

DYE, P.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve Eucalyptus plantations stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 197-218, 2004.

EICHLER, V.; SERAPHIN, E.S.; PORTES, T.A.; ROSA, B.; ARAÚJO, L.A.; SANTOS, G. Produção de massa seca, número de perfilhos e área foliar do capim-mombaça

cultivado em diferentes níveis de nitrogênio e fósforo. **Ciência Animal Brasileira**, v. 9, n. 3, p. 617-626. 2008.

ESPREY, L.J.; SANDS, P.J.; SMITH, C.W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 235-250, 2004.

EVANS, J.R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. **Oecologia**, v. 78, p. 9-19, 1989.

FERNADES, A.R.; CARVALHO, J.G.; MELO, P.C. EFEITO do fósforo e do zinco sobre o crescimento de mudas do cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum* Schum.). **Cerne**, Lavras, v.9, n. 2, p. 221-230, jul./dez. 2003.

FILGUEIRAS, O. A boiada no mato. **Globo Rural**. Rio de Janeiro, mar. 1990. p. 27-28.

FLEIG, F.D. Avaliação econômica dos sistemas de produção com **Acácia-negra (*Acácia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1993.

FONTES, L.; LANDSBERG, J.; TOME, J.; TOME, M.; PACHECO, C.A.; SOARES, P.; ARAUJO, C. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, p. 3209-3221, 2006.

FRESSE, F. **Linear Regression Methods for Forest Research**. USA: US. Department of Agriculture Forest Service, 1964. 148 p.

FOWLER, J.A.P.; CURCIO, G.R.; RACHWAL, M.F.G.; DEDECEK, R.A.; SIMON, A.A. Germinação e vigor de sementes de *Acácia mearnsii* De Wild coletadas em diferentes povoamentos do Estado do Rio Grande do Sul. **Comunicado Técnico**. Colombo: EMBRAPA – CNPF, n. 39, p.1-4, jun. 2000.

FRANCO, A.A.; DÖBEREINER, J. A biologia do solo e a sustentabilidade dos solos tropicais. **Summa Phytopathologica**, v. 20, n. 1, p. 68-74, 1994.

GALLARDO, M.; SNYDER, R. L.; SCHULBACH, K.; JACKSON, L. E. Crop growth and water use model for lettuce. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Washington, v.122, n.6, p.354-359, 1996.

GAZARINI, L. C.; ARAUJO, M. C. C.; BORRALHO, N; PEREIRA, J. S. Plant area index in *Eucalyptus globulus* plantations determined indirectly by a light interception method. **Tree Physiology**, v. 7, p. 107-113, 1990.

GILMORE, E. C.Jr.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.50, n.10, p.611-615, 1958.

GONÇALVES, M.R.; PASSOS, C.A.M. Crescimento de cinco espécies de eucalipto submetidas a déficit hídrico em dois níveis de fósforo. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 145-161, 2000.

GOWER, S.T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, p. 29-51, 1999.

GRAMIG, G.G.; STOLTENBERG, D.E. Leaf appearance base temperature and phyllochron for common grass and broad leaf weed species. **Weed Technology**, n.21, p.249-254, 2007.

GRANIER, C.; TURC, O.; TARDIEU, F. Coordination of cell division and tissue expansion in sunflower, tobacco and pea leaves: dependence or independence of both processes? **Journal of Plant Regulation**, v. 19, p. 45–54, 2000.

GRANJA, A. Acacicultura. **Jornal dos Reflorestadores**. São Paulo. v.1, n. 2, p. 6-7. 1979.

GREEN, D.S.; ERICKSON, J.E.; KRUGUER, E.L. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, p. 163-171, 2003.

HAIR Jr., J. F. TATHAM, R. L.; ANDERSON, R. E.; BLACK, W.. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HERLING, V. R.; RODRIGUES, L. R. A.; LUZ, P. H. C. Manejo do pastejo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM – Planejamento de sistemas de produção em pastagem, 18., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Fealq, 2001. p. 157-192.

HEXALTINE, A.; PRENTICE, I.C. A general model for light-use efficiency of primary production. **Functional Ecology**, v. 10, p. 551-561, 1996.

HIGA, A. R.; DEDECEK, R. A.; Santos, A. F.; STEIN, P. P.; SIMON, A. A. Desarrollo de sistemas de producción para acacia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). In: **Congreso Latinoamericano IUFRO** – O manejo sustentable de los recursos forestales, desafío del siglo XXI, 1., 1998. Valdivia: CD-Rom ... Valdivia: IUFRO, 1998.

HIGA, A.R. **Projeto acácia-negra**. Colombo: Embrapa, n.º1 (1), 11 de dezembro de 1996. 2p.

HINGSTON, F. J.; GALBRAITH, J. H.; DIMMOCK, G. M. Application of the process-based model biomass to *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* plantations on exfarmland in south western Australia - I. Water use by trees and assessing risk of losses due to drought. **Forest Ecology and Management**, v. 106, p. 141-156, 1998.

HODGES, T.F. **Predict crop phenology**. Boca Raton: CRC, 1991.

HUANG, B.K. **Computer simulation analysis of biological and agricultural systems**. New York: CRC, 1993.

HUNT, E.R. JR., LAVIGNE; M.B.; FRANKLIN, S.E. Factors controlling the decline of net primary production with stand age for balsam fir in Newfoundland assessed using an ecosystem simulation model. **Ecologic Modeling**, v. 122, p. 151-164, 1999.

HUNTER, I.R.; GIBSON, A.R. Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 14, n.1, pp. 53-64. 1984.

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

JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for in situ leaf area index determination. I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.121, p.19-35, 2004.

KALLARACKAL, J.; SOMEN, C. K. An ecophysiological evaluation of the suitability of *Eucalyptus grandis* for planting in the tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 53-61, 1997.

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

KAYAHARA, G.; CARTER, R.E.; KLINKA, K. Site index of western hemlock (*Tsuga heterophylla*) in relation to soil nutrient and foliar chemical measures. **Forest Ecology and Management**, v. 74, n.1-3, pp. 161-169. 1998.

KIMMINS, J.P.; COMEAL, P.G.; KURZ, W. Modeling the interactions between moisture and nutrient in the control of forest growth. **Forest Ecology and Management**, v. 30, p. 361-379, 1990.

KINIRY, J.R. Biomass accumulation and radiation use efficiency of honey mesquite and eastern red cedar. **Biomass and Bioenergy**, v. 15, p. 467-473, 1998.

KOZLOWSKI, T.T.; KRAMER, P.J.; PALLARDY, S.G. **The physiological ecology of woody plants**. New York: Academic Press. 1991.

KUßNER, R.; MOSANDL, R. 2000. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p. 440-447, 2000.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F.S.; PONS, T.L. **Plant physiological ecology**. New York: Springer-Verlag, 1998.

LANDSBERG, J. J. **Physiological ecology of forest production**. London: Academic Press, 1986.

LANDSBERG, J.J.; HINGSTON, F.J. Evaluating a simple radiation/dry matter conversion model using data from *Eucalyptus globulus* plantations in Western Australia. **Tree Physiology**, v. 16, p. 801-808, 1996.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic Press, 1997.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LANDSBERG, J.J.; COOPS, N.C. Modeling forest productivity across large areas and long periods. **Natural Resources Modeling**, v. 12, p. 383-411, 1999.

LANDSBERG, J.J.; JOHNSEN, K. ; ALBAUGHT, T.; ALLEN, H.; McKEAND, S. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. **Forest Science**, v. 47, p. 43-51, 2001.

LANDSBERG, J. J. Physiologic in forest models: history and the future. **Forestry Biometry, Modeling and Information Sciences**, v.1, p.49-63, 2003.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.; COOPS, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v. 172 p. 199-214, 2003.

LANDSBERG, J.J.; SANDS, O. **Physiological ecology of forest production: principles processes and models**. Amsterdam: Elsevier, 2011.

LANG, A.R.G; MCMURTRIE, R.E. Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from transmittances of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 79-92, 1992.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2000.

LAW, B.E., WARING, R.H.; ANTHONI, P.M.; ABER, D. Measurements of gross and net ecosystem productivity and water vapour exchange of a *Pinus ponderosa* ecosystem, and an evaluation of two generalized models. **Global Change Biology**, v. 6, p. 155-168, 2000.

LEBLANC, S.G.; CHEN, J.M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.110, p.125-139, 2001.

LEVINS, R. The strategy of model building in population biology. **American Scientist**, v. 54, n. 1. p.421-431. 1966.

LIMA, A.P.L. **Aplicação de desrama em clone de *Eucalyptus grandis* em diferentes épocas e intensidade**: efeitos sobre crescimento e dinâmica da copa. Viçosa, 2003. 195f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.

LINDER, S. Potential and actual production in Australian forest stands. In: LANDSBERG, J.J.; PARSONS, W. (Eds). **Research for Forest Management**. Melbourne: CSIRO, 1985. p. 11-35.

LINHARES, C. A.; PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Relação entre volume de madeira e índice de área foliar em um povoamento de *Pinus* spp.: estudo de caso. **Revista Árvore**, v. 24, p. 47-54, 2000.

LONDERO, E. K. **Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba**, RS. 68f. 2011. Dissertação (Ciências Florestais) Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

LONGDOZ, B.; AUBINET, M.; FRANÇOIS, L.M. Model of forest carbon sequestration incorporating aerial wood radiative budget. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 83-104, 2004.

LOPES, S.J. et al. Models to estimate phytomass accumulation of hydroponic lettuce. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.4, p.392-400, 2004.

MAcFARLANE, C.; COOTE, M.; WHITE, D.A.; ADAMS, M.A. Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantations of *Eucalyptus globulus* Labill. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.100, p.155-168, 2000.

MAcFARLANE, C.; HOFFMAN, MEGAN.; EAMUS, D.; KERP, N.; HIGGINSON, S.; MCMURTRIE, R.; ADAMS, M.A. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. **Forest Ecology and Management**, v. 143, p. 176-188, 2007.

MACHADO *et al.* Modelagem do volume do povoamento para *Mimosa scabrella* Benth. na região metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 465-478, 2008.

MAESTRI, R.; GRAÇA, L.R.; SIMOES, J.W.; FREITAS, A.J.P. Análise da adubação fosfatada na produção física e econômica da acácia-negra. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n.17, p. 39-53, jun. 1987.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres Ltda., 1980.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das angiospermas: Leguminosas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1997.

MARISCAL, M.J.; ORGAZ, F.; VILLALOBOS, F.J. Radiation-use efficiency and dry matter partitioning of a young olive (*Olea europaea*) orchard. **Tree Physiology**, v. 20, p. 65-72, 2000.

MARTINS, F. B. **Desenvolvimento e estresse hídrico em mudas de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) e *Eucalyptus saligna* (Smith)**. 2007. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MARTINS, M.A.L.; FOELKEL, C.E.B.; GOMIDE, J.L.; VITAL, B.R. Estudo tecnológico da polpação kraft de *Acacia mearnsii* In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ABCP, 1983, v. 1, p. 73-92.

McCRADY, R. L.; JOKELA, E.J. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. **Forest Science**, v. 44, p. 64-72, 1998.

McMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.87, p.291-300, 1997.

McMURTRIE, R.E.; COMINS, H.N.; KIRSCHBAUM, M.U.F.; WANG, Y.P. Modifying existing Forest growth models to take account of effects of elevated CO₂. **Australian Journal Botanic**, v. 40, p. 657-677, 1992.

MEDLYN, B.E. A MAESTRO Retrospective. In: Mencuccini, M.; Grace, J.; Moncrieff, J.; McNaughton, K.G. (Ed.). **Forest at the Land-Atmosphere Interface**. Wallingford: CAB International, 2004. 105-121p.

MELO, S.P. **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-Marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo**, 2005. 110f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acaica mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 270 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, v. 29, p. 17- 37, 1965.

MONTEITH, J.L. Solar radiation productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production en Britain. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 281, n. 980, p. 277-294, 1977.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2. ed. London: Edward Arnold, 1990.

MORA, A.L. **Aumento da produção de sementes geneticamente melhoradas de *Acacia mearnsii* De Wild. (acácia-negra) no Rio Grande do Sul**. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MOREIRA, M.A.; Fontes, P.C.R.; Camargos, M.I. Interação zinco e fósforo em solução nutritiva influenciando o crescimento e a produtividade da alface. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 36, p. 903-909, 2001.

MÜLLER, A.G.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I.; RADIN, B.; FRANÇA, S.; SILVA, M.I.G. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 65-71, 2005.

MÜLLER, I. **Avaliação da produtividade da *Acacia mearnsii* De Wild. (Acácia negra) em função de diferentes espaçamentos**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

MUNERI, A. Kraf pulping properties of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus grandis* in Zimbabwe. **South African Forestry Journal**, n. 179, p. 13-19, 1997.

NAUTIVAL, J.C.; COUTO, L. The nature and uses of the timber production function: *Eucalyptus grandis* in Brazil. **Forest Science**. v. 30. n. 3. p. 761-773. 1984.

NORMAN, J.M., CAMPBELL, G.S., 1989. Canopy Structure. In: PEARCY, R.W., EHLESINGER, J., MOONEY, H.A., RUNDEL, P.W. (Eds.), **Plant Physiological Ecology**. Field Methods and Instrumentation. London: Chapman and Hall, 1989. p. 301- 325.

OLIVEIRA, A.S.; STEIDLE NETO, A.; RIBEIRO, A.; RSACON, N.JR. L.; RODY, Y.P.; ALMEIDA, A.Q. Determinação do tempo térmico para o desenvolvimento de mudas de eucalipto na fase de enraizamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1223-1228, 2012.

OLIVEIRA, H.A. **Acácia-negra e tanino no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Tipografia Mercantil, 1960.

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

Ometto, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres 1981.

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. San Diego: Academic Press, 2008.

PANDOLFO, C. **Parâmetros básicos para uso na modelagem do rendimento de matéria seca de alfafa (*Medicago sativa* L.)**. 1995. 128 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n.1, p. 865-878, 2001.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? **Agronomy Journal**, v. 88, n. 2. p. 690-694. 1996.

PASTOR, J.; POST, W. M. **Development of a linked forest productivity-soil process model**. Oak Ridge: ORNL/TM, 1985.

PAUL, K.I.; BOOTH, T.H.; JOVANOVIC, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J.D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, p. 237-247, 2007.

PAULO, J. A.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de azinheira. In: Actas do X Congresso da Sociedade Portuguesa de Estatística. **Anais...**Porto, p.501, 2002.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; MOREIRA, P. R. Modelo para avaliação da produção de matéria seca de fustes de *Eucalyptus grandis* em função da densidade de plantio, tempo de ciclo e energia solar disponível. **Acta Scientiarum**, v. 26, n. 4, p. 437-441, 2004.

PINKARD, E.A.; BATTAGLIA, M.; BEADLE, C.L.; SANS, P.L. Modeling the effect of physiological responses to green pruning on net biomass production of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden. **Tree Physiology**, v.19, p. 1-12, 1999.

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

RACHWAL, M.F.G.; CURCIO, G.R.; DEDECEK, R.A. **Caracterização do desenvolvimento e produção de madeira da *Acacia mearnsii* aos 3 e 5 anos de idade em solos derivados de micaxistos no município de Piratini, RS**. Colombo, Embrapa Florestas, 1997.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JUNIOR, C.; BARNI, N.A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I.A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1017-1023, 2003.

RASCON, N.J.L. **Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do eucalipto na Amazônia**. Viçosa, 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; REZENDE, G.C.; BARROS, N.F. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 149-162. 1985.

RESENDE, M.D.V. de; HIGA, A.R.; HELLER, J.B.; STEIN, P.P. Parâmetros genéticos e interação genótipo x ambiente em teste de procedências e progênies de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild). **Boletim Pesquisa Florestal**, Colombo. n. 24/25, p. 55-65, 1992.

RHODES, I. Relationship between canopy structure and productivity in herbage grasses and its implication for plant breeding. **Herbage Abstracts**, v. 43, p. 129 - 133, 1973.

RIO GRANDE DO SUL. Macrozoneamento agroecológico e econômico do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: **Secretaria da Agricultura e Abastecimento**, 1994.

ROBERT, A. Simulation of the effect of topography and tree falls on stand dynamics and stand structure tropical forests. **Ecological Modelling**. v. 167, n. 3, p. 287-303, 2003.

RODIGHERI, H.R.; GRAÇA, L.R. **Rentabilidade da acácia-negra, bracatinga, eucalipto e erva-mate para produtores rurais no sul do Brasil**. Embrapa, Circular Técnica n. 46, Colombo, junho 2001.

RUNNIG, S.W.; GOWER, S.T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem process for regional applications. II. Dynamics carbon allocation and nitrogen budgets. **Tree Physiology**, v. 9, p. 147-160, 1992.

RUNNIG, S.W.; GOWER, S.T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem process for regional applications. II. Dynamics carbon allocation and nitrogen budgets. **Tree Physiology**, v. 9, p. 147-160, 1992.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L. BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOSS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L. LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILCA, G.G.C. Factors controlling Eucalyptus productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest and Ecology Management**, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010.

SALAS, G. **Suelos y ecosistemas forestales**. San José: IICA, 1987.

SALDARRIAGA, J.G.; LUXMOORE, R.J. Solar energy conversion efficiencies during succession of a tropical rain forest in Amazonia. **Journal of Tropical Ecology**, v. 7, p. 233-242, 1991.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Fisiología vegetal**. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1994.

SAMUELSON, L.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**, v. 192, p. 59-70, 2004.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterization of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v.163, p.273-292, 2002.

SANDS, R; MULLIGAN, D. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, v. 30, p. 91-111, 1990.

SANQUETTA, C.R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. FUPEF, Série didática, n. 8, 1996.

SCAIFE, A.; JONES, D. Effect of seed weight on lettuce growth. **Annals of Botany**, Oxford, v.59, p.325-334, 1987.

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

SCHNEIDER, P.R.; CAMILLO, S.B. de A.; FINGER, C.A.G.; FRIZZO, S.M.B. Determinação de equações da produção de tanino de acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, v.9, n. 1, p. 103-113, 1999.

SCHNEIDER, P.R.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G.; KLEIN, J.E.M. Crescimento da acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild. em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v.10, n. 2, p. 101-112, 2000.

SCHNEIDER, P.R.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G.; SPATHELF, P. Produção de madeira e casca verde por índice de sítio e espaçamento inicial de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 151-165, 2001.

SCHNEIDER, P.R.; TONINI, H. Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* de Wild. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 121-129, 2003.

SCHÖFFEL, E. R; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.

SEIGER, D.S. Economic potential from Western Australian Acacia species: secondary plant products. **Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 109-116, 2002.

SHIBLES, R. M., WEBER, C. R. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, v. 6, n. 1, p. 55-59, 1966.

SIDDIQUE, K.H.M.; BELFORD, R.K.; PERRY, M.W.; TENNANT, D. Growth, development and light interception of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 40, n. 1, p. 473-487, 1989.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 116 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2006.

SIMON, A. A. A cadeia produtiva da acácia-negra, aspectos econômicos, sociais e ambientais. In: STROHSCHOEN, A.G.; REMPEL, C. **Reflorestamento e recuperação ambiental: Ambiente e tecnologia: o desenvolvimento sustentável em foco**. Lajeado: Univates, 2005. p. 149-166.

SIMON, A.A. **Produção de mudas de Acácia-negra – plantio 1998**. Montenegro: TANAGRO, 1999. 3 p. Relatório Técnico.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, v. 65, p. 215-265, 1999.

SNOWDON, P.; BENSON, M. Effects of combinations of irrigation and fertilization on growth and above-ground biomass production of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, v. 52, p. 87-116, 1992.

SNOWDON, P., WOOLLONS, R.C.; BENSON, M.L. Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment. **New Forest**, v. 16, n.1, p. 101-123. 1998.

SOARES, C. P. B. **Um modelo para o gerenciamento da produção de madeira em plantios comerciais de eucalipto**. 71 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 1999.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região com alta variabilidade pluviométrica. **Scientia forestalis**, n.58. p. 41-48, 2000.

SPURR, S.H. **Forest inventory**. New York, Ronald Press. 1952.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225 f. Thesis (PhD in Forest Sciences) – Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and supply, use and efficiency of the use of water, light and nitrogen across a geographic in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 17-31, 2004.

STAPE, J., M. RYAN; D. BINKLEY. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients, **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 219-234, 2004.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest ecology and Management**, v. 255, p. 920-930, 2008.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D. ; RYAN, M.; FONSECA, S.; LOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N. ; SILVA, C.R. ; SILVA, S.R. ; HAKAMADA, R.R. ; FERREIRA, J.M. ; LIMA, A.M.N. ; GAVA, J.L. ; LEITE, F.P. ; ANDRADE, H.B ; ALVES, J.M. ; SILVA, G.G.C. ; AZEVEDO, M.R. The Brazil eucalyptus potential project : influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest and Ecology Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

STEIN, P. P.; TONIETTO, L. Black Wattle Silviculture in Brazil. In: BROWN, A.G.; KO, H.C. (Ed.). **Black Wattle and its Utilisation**. Barton: RIRDC, 1997. p. 78-82.

STEINMETZ, S.; ASSIS, F. N.; SOARES, W. R. Estimativa da radiação solar global a partir da insolação na região de Pelotas, Rio Grande do Sul. **Agropecuária Clima Temperado**, v.2, n.1, p. 77-85, 1999.

STRECK, N.A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, p. 105-111, 2002.

STRECK, N.A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, P.S. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, p. 139-150, 2003.

STRECK, N.A.; TIBOLA, T.; LAGO, I.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; SCHNEIDER, F.M.; ZAGO, V. Estimativa do plastocrono em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, v. 35, p. 1275-1280, 2005.

STRECK, N.A.; PAULA, F.L.M.; BISOGNIN, D.A.; HELDWEIN, A.B.; DELLAI, J. Simulating the developmental of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, p. 1-11, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TANAC. **Ciclo da industrialização da Acácia Negra**. 6 p. Publicidade. [198-]

TAYLOR, A.R.; CHEN, H.Y.H.; VANDAMME, L.A. Review of forest succession model and their suitability for forest management planning. **Forest Science**, v. 55, n. 1, p. 23-26, 2009.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

THOMAS, S.C.; WINNER, W.E. Leaf area index of an old-growth Douglas-fir forest estimated from direct structural measurements in the canopy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p. 1922-1930, 2000.

TOLLENAAR, M.; BRUULSEMA, T. W. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. **Agronomy Journal**, v. 80, p. 580-585, 1988.

TOMÉ, M. Os modelos de produção florestal na gestão de povoamentos florestais. **Revista Agros**, v. 8, p. 32-36, 1991.

TROVATI, L.R. **Resposta da densidade de anéis de crescimento de *Pinus oocarpa* aos fatores climáticos**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. **DSSAT version 3**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1994.

VANCLAY, J.K. **Modeling forest growth and yield – application to mixed tropical forests**. CABI Publishing. Oxon, UK, 1999.

VARLET-GRANCHER, C. et al. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, v. 9, p. 419-439, 1989.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa-MG: UFV, 2000.

VIEIRA, M.C.; PEREZ, V.B.; HEREDIA, ZÁRATE N.A.; SANTOS, M.C.; PELLOSO, I.A.O.; PESSOA, S.M.; Nitrogênio e fósforo no desenvolvimento inicial da guavira [*Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg] cultivada em vasos. **Revista Brasileira de Plantas Medicinai**s, v.13, especial, p.542-549, 2011.

VILLA NOVA, N. A., MOREIRA, P. R., PEREIRA, A. B. Eficiência de captura de energia solar por um dossel de *Eucalyptus pellita* F. Muell sob várias densidades de plantio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 63-68, 2003.

VOSE, J.M., SULLIVAN, N.H., CLINTON, B.D., BOLSTAD, P.V. Vertical leaf area distribution, light transmittance, and application of the Beer–Lambert Law in four mature hardwood stands in the southern Appalachians. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 6, n. 25. p. 1036-1043, 1994.

WALKER, D. **C3, C4: mechanisms, and cellular and environmental regulation, of photosynthesis**. Worcester: Bookplan, 1983. 524 p.

WANG, J.Y. A critique of heat approach to plant response studies. **Ecology**, v. 41, n.4, p. 785-790, 1960.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Description and validation of an array model – MAESTRO. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 5. P. 257-280, 1990.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G.; TAYLOR, C.M.A. PAR absorption and its relation to aboveground dry matter production of Sitka spruce. **Journal of Applied Ecology**, v. 28, p. 547–560, 1991.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 244-255, 2005.

WARING, R.H.; MCDOWELL, N. Use of physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances, **Tree Physiology**, n. 22, p. 179-188, 2002.

WARREN, C.R.; ADAMS, M.A. Distribution of N, Rubisco and photosynthesis in *Pinus pinaster* and acclimation to light. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, p. 597-609, 2001.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, p. 41-76, 1947.

WATSON, D.J. The dependence of net assimilation on leaf area index. **Annals of Botany**, London, v. 22, n. 85, p. 37-54, 1958.

WEINSTEIN, D.A.; BELOIN, R.M.; YANAI, R.D. Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses. **Tree Physiology**, v. 9; p.127-146, 1991.

WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G.J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. II. Estimation of LAI, errors and sampling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.121, p.37-53, 2004.

WERKEMA, C; AGUIAR, S. **Análise de regressão: como entender o relacionamento das variáveis de um processo**. Belo Horizonte: Werkema, 2006.

WILLIAMS, T.; GRESHAM, C. Biomass accumulation in rapidly growing loblolly pine and sweetgum. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 370-377, 2006.

WURR, D. C. E. ; FELLOWS, J.R.; HIRON, R.W.P.; ANTILL, D.N.; HAND, D.J. The development and evaluation of techniques to predict when to harvest iceberg lettuce heads. **Journal of Horticultural Science**, v.67, p.385-393, 1992.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

XAVIER, A.C.; VETTORAZZI, C.A. Índice de área foliar de coberturas em uma microbacia hidrográfica subtropical. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 3, p. 425-431, 2003.

YAN, W.; HUNT, L.A. An equation for modeling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, v. 84, n. 5, p. 607-614, 1999.

YUNUSA, I.A.M. et al. Effect of canopy structure on efficiency of radiation, interception and use in spring wheat cultivars during pre-anthesis period in a Mediterranean-type environment. **Field Crops Research**, v. 35, n. 2, p. 113-122, 1993.

ZHAO, M.; XIANG, W.; PENG, C.; TIAN, D. Simulating age-related changes storage and allocation in Chinese fir plantation growing in southern China using 3-PG model. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 1520-1531, 2009.