

ROMUALDO MAESTRI

**MODELO DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO PARA
POVOAMENTOS CLONAIS DE *Eucalyptus grandis*
CONSIDERANDO VARIÁVEIS AMBIENTAIS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Florestal, Setor de Ciências
Agrárias, Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial à obtenção do título de
Doutor em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos R. Sanquetta

CURITIBA

2003



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias – Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Av. Lothário Meissner, 3400 – Jardim Botânico – CAMPUS III
80210-170 - CURITIBA - Paraná
Tel. (41) 360.4212 - Fax. (41) 360.4211 – <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao>
e-mail: pinheiro@floresta.ufpr.br

PARECER

Defesa nº 503

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o doutorando *ROMUALDO MAESTRI* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus grandis* CONSIDERANDO VARIÁVEIS AMBIENTAIS", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do acadêmico, habilitando-o ao título de *Doutor* no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em *Manejo Florestal*.

Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Departamento de Ciências Florestais da UFPR

Orientador e presidente da banca examinadora

Dr. Edilson Batista de Oliveira

EMBRAPA/Florestas

Primeiro examinador

Dr. João Eduardo Arce

Departamento de Ciências Florestais da UFPR

Segundo examinador

Dr. Afonso Figueiredo Filho

Departamento de Ciências Florestais da UFPR

Terceiro examinador

Dr. José Roberto Soares Scalfaro

Universidade Federal de Lavras - UFLA

Quarto examinador

Curitiba, 24 de fevereiro de 2003.

Nivaldo Eduardo Rizzi

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Franklin Galvão

Vice-coordenador



AGRADECIMENTOS

Ninguém vive ou consegue avançar pelas etapas da vida, sozinho. E não foi diferente no caso desse meu curso de doutoramento. Sinto-me satisfeito por ter conseguido aproveitar as oportunidades e percebo que minha atuação foi mais no sentido de “costurar” sugestões técnicas recebidas, acatar conselhos sábios e direcionar as ações para o cumprimento das etapas acadêmicas. Mas sem determinadas pessoas, e aí incluo amigos, professores, executivos, profissionais de empresa e família, não estaria eu nesse momento, concluindo esse importante curso.

E começo por agradecer aquele que me estimulou ao ingresso no curso que foi o Pesquisador da EMBRAPA-CNPQ, Dr. Edílson Batista de Oliveira. Ao amigo Edílson, meu muito obrigado.

Agradeço ao Eng. Agrônomo MSc. Edson A. Balloni, Sócio-Diretor da Valor Florestal SA que à época do início do curso de doutoramento, como diretor da Pisa Florestal SA e meu superior imediato, deu apoio ao re-ingresso na Universidade.

Agradeço ao colega e professor Dr. Carlos Roberto Sanquetta por ter me acolhido como orientado e, principalmente, pelas inúmeras discussões e ricas sugestões dadas.

Ao amigo e mestre, Dr. José Roberto S. Scolforo da Universidade Federal de Lavras, minha mais profunda gratidão desse seu aluno e admirador, pelo incentivo, direcionamento e permanente atenção ao encaminhamento do curso e da tese.

Agradeço ao Dr. Sebastião do Amaral Machado pelas sugestões dadas como co-orientador do trabalho de tese.

Agradeço à Diretoria da Aracruz Celulose SA, nas pessoas do Dr. Walter Lídio Nunes, Diretor Industrial, Dr. Ergilio Cláudio-da-Silva, Gerente do Centro de Tecnologia e Pesquisa CPT e Eng. Agrônomo MSc. Fernando de Lellis Bertollucci, Gerente de Pesquisa Florestal, que desde meu ingresso na empresa prestaram total e irrestrito apoio ao desenvolvimento dessa empreitada.

Sou muito grato ao amigo e notável professor Dr. José Luiz Stape, da ESALQ/USP, pelas preciosas contribuições conceituais e pela costumeira presteza às consultas realizadas.

Ao Prof. Dr. Aristides Ribeiro, do Dpto. de Agrometeorologia da Universidade Federal de Viçosa, sou muito grato pelo pronto apoio e orientação na questão dos cálculos de balanço hídrico.

Ao Doutorando Eng. Eletrônico MSc. Márcio José Catalunha, do Dpto. de Agrometeorologia da Universidade Federal de Viçosa, sou muito grato pelo auxílio na programação dos cálculos de balanço hídrico e preparo das bases de dados.

Ao amigo Dr. John Paul McTague, biometrista da International Paper – USA, pela presteza em avaliar a versão inicial da tese e pelas ricas sugestões ao trabalho.

Ao amigo Dr. Leif Nutto, da Universidade de Freiburg, Alemanha, pelas importantes sugestões durante a fase de preparo da versão final do trabalho.

Ao amigo e Prof. Julio Arce, do Depto. de Silvicultura e Manejo da Universidade Federal do Paraná, pelo constante incentivo e apoio.

Aos amigos e colegas do Centro de Pesquisa e Tecnologia/CPT, Sebastião Fonseca, Gabriel Dehon Resende, Ricardo Penchel, Robert Sartorio, Aurélio Aguiar, Andréia Henrique, Carlos Augusto, Rosaria Mainieri, Braz Demuner, Otávio Mambrim, Rosemara Pereira, Roselene Ninácio, Janaina Marangoanha, Erildo Campinhos, Gilmar Mattedi e Jailson Ciarelli, pelo fornecimento de dados, sugestões e importante apoio em todas as fases do curso.

À colega de trabalho Eng. Florestal MSc. Adriana Assis e doutoranda da Universidade Federal de Lavras, meu agradecimento pelo companheirismo durante as diversas disciplinas cursadas, tanto em Lavras quanto em Curitiba.

Aos colegas da área de Produção e Suprimento de Madeira – PSM, Simone Mello Barddal, Auro Campi Almeida e Leomar Mandelli, pelo fornecimento de informações de inventário e meteorologia.

Aos meus queridos pais, Ivo e Erica, sou muito grato pelo carinho, estímulo e orientação para a vida, além da imensa ternura e visão positiva das coisas.

Aos meus filhos, Henrique e Gabriela, meu agradecimento por serem minha verdadeira fonte de estímulos.

E finalmente, agradeço do fundo do meu coração, à minha querida esposa Nicéia, que sempre se mostrou compreensível às necessidades de cumprimento dos meus compromissos profissionais e acadêmicos e nunca se furtou em dar seu importante e, muitas vezes, decisivo apoio em todas as fases da minha vida.

BIOGRAFIA DO AUTOR

ROMUALDO MAESTRI, filho de Ivo Maestri e Erica Maestri, nasceu em Curitiba - Paraná, em 31 de dezembro de 1962.

Concluiu a escola secundária em 1979 e ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, tendo obtido o diploma acadêmico em 1984.

Ainda em 1984 ingressou no Centro Nacional de Pesquisa de Florestas da EMBRAPA como bolsista/pesquisador, atuando no Projeto de Pesquisa em acácia-negra.

Em 1987 atuou nas empresas Moosmeyer Associados e STC Engenharia, ambas do ramo de consultoria florestal.

Ainda em 1987, ingressou na Pisa Florestal SA, tendo permanecido por 12,5 anos, e quando da sua saída, exercia a função de Gerente Técnico da empresa.

Em 1992 concluiu o curso de mestrado na área de Manejo Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Desde dezembro de 1999 exerce a função de Pesquisador Sênior do Centro de Pesquisa e Tecnologia – CPT, da Aracruz Celulose SA.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii	
LISTA DE FIGURAS	x	
RESUMO.....	xii	
ABSTRACT.....	xiv	
INTRODUÇÃO	01	
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
1.1	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MODELOS	05
1.2	MODELOS BIOMÉTRICOS E MODELOS PROCESSUAIS.....	09
1.3	EXPERIÊNCIAS COM MODELAGEM.....	11
1.3.1	Hibridação de Modelos Biométricos e Processuais.....	11
1.3.2	Incorporação de Variáveis Ambientais em Modelos Biométricos	13
1.4	FORMA MATEMÁTICA PARA REPRESENTAR O CRESCIMENTO	16
1.4.1	Interpretação das Constantes do Modelo de Richards	17
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
2.1	LOCALIZAÇÃO	19
2.2	BASE DE DADOS	21
2.2.1	Inventário Florestal.....	21
2.2.1.1	Inventário Florestal Temporário.....	21
2.2.1.2	Inventário Florestal Contínuo.....	22
2.2.1.3	Cubagem de Árvores.....	23
2.2.2	Dados de Solos.....	24
2.2.3	Dados de Clima.....	26
2.2.4	Balanço Hídrico do Solo	28
2.2.5	Pareamento das Variáveis Ambientais com Dados do Inventário Florestal.....	32
2.2.6	Seleção de Variáveis Ambientais	33
2.2.7	Modelos de Crescimento e Produção sem Variáveis Ambientais.....	35
2.2.7.1	Modelo para Estimativa da Altura das Árvores Dominantes	35
2.2.7.2	Modelo de Sobrevivência de Árvores	36
2.2.7.3	Modelos de Área Basal.....	38
2.2.7.4	Modelo para Variância dos Diâmetros	38
2.2.7.5	Função Densidade de Probabilidade de Weibull	40
2.2.7.6	Relação Hipsométrica Genérica	42
2.2.7.7	Funções de Afilamento do Tronco	43
2.2.8	Forma de Inclusão das Variáveis Ambientais no Modelo Biométrico.....	44
2.2.8.1	Modelo para Estimativa do Incremento Anual em Altura Dominante	45
2.2.8.2	Modelo para Estimativa do Índice de Sítio.....	46

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
3.1	MODELO PARA INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS	48
3.1.1	Modelo com Variáveis Ambientais Geradas pelo Método de Thornthwaite-Mather	48
3.1.1.1	Relação entre Variáveis Ambientais e de Crescimento	49
3.1.1.2	Seleção das Variáveis Ambientais por Análise de Componentes Principais	53
3.1.1.3	Variáveis Ambientais Selecionadas por Procedimento de Análise de Regressão por Eliminação de Variáveis "Backward"	58
3.1.1.4	Variáveis Ambientais Selecionadas em Função de sua Praticidade Operacional	59
3.1.2	Modelo com Variáveis Ambientais Geradas pelo Método de Penman-Monteith	62
3.1.2.1	Relação entre Variáveis Ambientais e de Crescimento	63
3.1.2.2	Seleção das Variáveis Ambientais por Análise de Componentes Principais	65
3.1.2.3	Variáveis Ambientais Selecionadas por Procedimento de Análise de Regressão por Eliminação de Variáveis "Backward"	69
3.1.2.4	Variáveis Ambientais Diretamente Ligadas ao Método de Penman-Monteith	71
3.1.3	Validação dos Modelos	75
3.1.3.1	Modelos para Estimativa do Incremento em Altura Dominante	78
3.1.3.2	Validação Integrada do Sistema de Crescimento e Produção	80
3.1.3.3	Efeito das Variáveis Ambientais na Variação do Índice de Sítio	83
3.1.3.4	Análise de Sensitividade de Parâmetros do Modelo de Altura Dominante	86
3.2	MODELO PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SÍTIO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS	92
3.2.1	Seleção de Variáveis e Desenvolvimento da Modelagem	94
3.2.2	Validação do Modelo	100
3.3	LIMITAÇÕES E USOS DA METODOLOGIA PROPOSTA	101
	CONCLUSÕES	104
	REFERÊNCIAS	106
	ANEXO I – EVAPOTRANSPIRAÇÃO	113
	ANEXO II – CÁLCULOS DE BALANÇO HÍDRICO	129

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- RELEVÂNCIA DOS MODELOS BASEADOS EM PROCESSOS E MODELOS DESCRITIVOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO QUANTO SUAS APLICAÇÕES EM PESQUISA, TRANSFERENCIA DE INFORMAÇÃO E SUPORTE AO MANEJO FLORESTAL (MOHREN & BURKHART (1994)).....	08
TABELA 2	- COORDENADAS GEOGRÁFICAS E RESPECTIVAS ÁREAS LÍQUIDAS DE REFLORESTAMENTOS COM ESTRUTURA DE PARCELAS DE INVENTÁRIO UTILIZADAS NO ESTUDO	20
TABELA 3	- CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA NA REGIÃO DE ESTUDO	20
TABELA 4	- CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL TEMPORÁRIO	22
TABELA 5	- CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO.....	23
TABELA 6	- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS 22 CLASSES DE SOLOS NA REGIÃO DO ESTUDO.....	24
TABELA 7	- RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NA REGIÃO DE ESTUDO	27
TABELA 8	- VARIÁVEIS AMBIENTAIS TRATADAS NO BALANÇO HÍDRICO.....	31
TABELA 9	- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS DA BASE COM 616 PARES DE DADOS PARA DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES DE MODELAGEM (BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE-MATHER).....	48
TABELA 10	- ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE, ARVORES POR HECTARE, ÁREA BASAL E VOLUME	51
TABELA 11	- CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	52
TABELA 12	- ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	53
TABELA 13	- AUTOVETORES DAS 5 COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	55
TABELA 14	- MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	56
TABELA 15	- CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELA ACP E SUAS TRANSFORMAÇÕES COM O INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE	57
TABELA 16	- ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS POR ACP	58
TABELA 17	- ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS POR ANÁLISE DE REGRESSÃO “BACKWARD”	59
TABELA 18	- ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS DE	

	FÁCIL OBTENÇÃO, SELECIONADAS POR ANÁLISE DE REGRESSÃO "BACKWARD"	61
TABELA 19 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS DA BASE COM 736 PARES DE DADOS PARA DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES DE MODELAGEM (BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO PENMAN-MONTEITH).....	62
TABELA 20 -	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE, ÁRVORES POR HECTARE, ÁREA BASAL E VOLUME	64
TABELA 21 -	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	65
TABELA 22 -	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	66
TABELA 23 -	AUTOVETORES DAS 5 COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	67
TABELA 24 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	68
TABELA 25 -	CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELA ACP E SUAS TRANSFORMAÇÕES COM O INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE	68
TABELA 26 -	ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS POR ACP	69
TABELA 27 -	CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR "BACKWARD"	70
TABELA 28 -	ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR "BACKWARD"	71
TABELA 29 -	RESULTADO DAS 4 PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS DO CONJUNTO DE VARIÁVEIS ORIGINADAS PELO MÉTODO PENMAN-MONTEITH PARA CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO	72
TABELA 30 -	AUTOVETORES DAS 4 COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	73
TABELA 31 -	CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELA ACP E SUAS TRANSFORMAÇÕES COM O INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE	74
TABELA 32 -	ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS RELACIONADAS AO MÉTODO PENMAN-MONTEITH SELECIONADAS POR ACP	75
TABELA 33 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS BASES DE DADOS DE VALIDAÇÃO	76

TABELA 34 - ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM ALTURA DOMINANTE GERADO PELOS MODELOS CONTRA OS DADOS INDEPENDENTES.....	79
TABELA 35 - ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM ÁREA BASAL E VOLUME/HA GERADO PELOS MODELOS APLICADOS A DADOS INDEPENDENTES.....	81
TABELA 36 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A DIFERENÇA NO ÍNDICE DE SÍTIO (IS) ESTIMADO PELO MODELO SEM VARIÁVEIS AMBIENTAIS A PARTIR DE DUAS MEDIÇÕES CONSECUTIVAS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO E AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	84
TABELA 37 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DO MODELO 3 – THORNTHWAITE	87
TABELA 38 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E INCREMENTO EM ALTURA.....	88
TABELA 39 - SENSITIVIDADE DO FATOR MODIFICADOR (MODI <i>INCL</i>) DO COEFICIENTE DE INCLINAÇÃO DO MODELO DE RICHARDS (MODELO 3 - THORNTHWAITE) EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS: PRECIPITAÇÃO MENSAL E TEMPERATURA MÁXIMA – DPM.....	89
TABELA 40 - ESTIMATIVAS DE INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE COMO REFLEXO DO FATOR MODIFICADOR (MODI <i>INCL</i>) DO COEFICIENTE DE INCLINAÇÃO DO MODELO DE RICHARDS (MODELO 3 - THORNTHWAITE).....	90
TABELA 41 - CARACTERÍSTICAS DA BASE DE DADOS DE AJUSTE PARA MODELAGEM DO ÍNDICE DE SÍTIO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS – 1.999 REGISTROS PAREADOS.....	93
TABELA 42 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	94
TABELA 43 - AUTOVETORES DAS 4 PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS.....	95
TABELA 44 - ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES LINEARES ENTRE O INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE E AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	96
TABELA 45 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DO MODELO PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SÍTIO	97
TABELA 46 - ESTIMATIVAS DE ALTURA DOMINANTE NA IDADE DE 7 ANOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL E TEMPERATURA MÉDIA MENSAL	98
TABELA 47 - ESTATÍSTICAS COMPARATIVAS DA APLICAÇÃO DOS MODELOS SEM E COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA DOMINANTE CONTRA BASE DE DADOS INDEPENDENTE	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- RELAÇÃO ENTRE GENERALIDADE E HABILIDADE DE PREDIÇÃO <i>VERSUS</i> FORMULAÇÃO DA MODELAGEM - REED (1997).....	06
FIGURA 2	- MODELO BIOLÓGICO DE RICHARDS E O SIGNIFICADO DE SEUS COEFICIENTES.....	18
FIGURA 3	- LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁREAS DE ESTUDO	19
FIGURA 4	- LOCALIZAÇÃO DOS PLANTIOS FLORESTAIS E DA REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DA REGIÃO DO ESTUDO.....	28
FIGURA 5	- RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE	49
FIGURA 6	- RELAÇÃO ENTRE DÉFICIT HÍDRICO MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE.....	50
FIGURA 7	- RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE.....	50
FIGURA 8	- VARIÂNCIA ABSOLUTA DAS 18 COMPONENTES (AUTOVALORES) DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS...54	54
FIGURA 9	- RELAÇÃO ENTRE DÉFICIT HÍDRICO MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE.....	63
FIGURA 10	- RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE.....	63
FIGURA 11	- VARIÂNCIA ABSOLUTA DAS 20 COMPONENTES (AUTOVALORES) DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS...66	66
FIGURA 12	- VARIÂNCIA ABSOLUTA DAS 12 COMPONENTES (AUTOVALORES) DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS...72	72
FIGURA 13	- DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL DA BASE DE DADOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS CALCULADAS PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE-MATHER	77
FIGURA 14	- DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL DA BASE DE DADOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS CALCULADAS PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....	77
FIGURA 15	- DISTRIBUIÇÃO DO INCREMENTO ANUAL DA BASE DE DADOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS CALCULADAS PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE-MATHER.....	78
FIGURA 16	- RESÍDUOS RELATIVOS EM ALTURA DOMINANTE DO MODELO SEM VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO MODELO 2 – THORTHWAITE	80

FIGURA 17 - RESÍDUOS RELATIVOS EM ALTURA DOMINANTE DO MODELO SEM VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO MODELO 1 – PENMAN.....	80
FIGURA 18 - DISPERSÃO DE VOLUMES OBSERVADOS X ESTIMADOS NO SISTEMA SEM E COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS	82
FIGURA 19 - RESÍDUOS RELATIVOS EM VOLUME PARA SISTEMA SEM E COM VARIÁVEIS DO AMBIENTE EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO.....	82
FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE A DIFERENÇA ABSOLUTA NA PROJEÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO ENTRE DUAS MEDIÇÕES SUCESSIVAS COM O COEFICIENTE $MODI_{INCL}$ DO MODELO 3 – THORNTHWAITE	85
FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE A DIFERENÇA NA PROJEÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO ENTRE DUAS MEDIÇÕES SUCESSIVAS COM PRECIPITAÇÃO MENSAL (MM).....	86
FIGURA 22 - REGIÃO DE OCORRÊNCIA PROVÁVEL DAS VARIÁVEIS: PRECIPITAÇÃO MENSAL E DESVIO PADRÃO DA MÉDIA DA TEMPERATURA MÁXIMA MENSAL PARA A REGIÃO DO ESTUDO	88
FIGURA 23 - ESTIMATIVAS DO INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE PELA SIMULAÇÃO DE VARIAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA - (MODELO 3 - THORNTHWAITE).....	91
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DAS ALTURAS DOMINANTES POR IDADE DOS 1999 TALHÕES AMOSTRADOS.....	93
FIGURA 25 - CURVAS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL (MM) PELO USO DA EQUAÇÃO (17) COM INCLUSÃO DO MODIFICADOR $MODI_A$ (EQUAÇÃO (24)).....	99
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS RELATIVOS DA ESTIMATIVA DA ALTURA DOMINANTE PELO USO DO MODELO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	101

RESUMO

O objetivo desse estudo foi investigar a contribuição de variáveis ambientais na redução do erro das estimativas de crescimento e produção de madeira de povoamentos clonais de híbridos naturais de *Eucalyptus grandis* implantados no norte do Espírito Santo e Sul da Bahia. As variáveis ambientais selecionadas foram introduzidas como modificadores dos coeficientes da função biológica de Richards, usada para modelar a altura dominante. Com isso, possibilitou-se a alteração do Índice de Sítio ao longo da rotação em função das condições do meio, o que contrasta com o conceito dos modelos biométricos tradicionais de inalterabilidade da capacidade produtiva num mesmo ciclo produtivo. A metodologia propicia maior acurácia nas estimativas e projeções ao associar variáveis do povoamento com variáveis ambientais. É uma alternativa de maior agilidade na obtenção das informações, muito útil para o dia a dia da empresa florestal, o que viabiliza a redução do custo em inventário florestal. Uma outra importante habilidade da metodologia é de permitir inferências sobre a capacidade produtiva potencial em locais com ausência de plantações, o que facilita todo o processo de aquisição de terras e planejamento de novos plantios, visando uma otimização da atividade florestal. O sistema completo de modelos considerou a modelagem da sobrevivência de árvores, área basal, variância dos diâmetros, recuperação dos parâmetros da função Weibull para descrever a distribuição diamétrica, relação hipsométrica genérica e função de afilamento do tronco. As variáveis ambientais avaliadas relacionaram-se a aspectos físicos do solo, posição geográfica e às condições climáticas da região de estudo. Foram calculados os balanços hídricos climatológicos através de dois métodos: a) empírico de Thornthwaite-Mather; b) combinado de Penman-Monteith. Foram utilizados dados meteorológicos diários a partir de 19 estações meteorológicas automáticas instaladas na região dos plantios que abrangeram 186 mil hectares e contando com 904 remedições de parcelas de inventário florestal contínuo e 2.307 resultados de inventário temporário. O pareamento dos dados de inventário com dados ambientais em termos geográficos (latitude, longitude, características do solo) e temporais (condição climática) foi a condição básica para a realização da pesquisa. A seleção de variáveis foi realizada através de Análise de Componentes Principais (ACP) e Regressão Linear Múltipla pelo método de eliminação de variáveis "backward". Seis modelos para estimativa do incremento anual e um modelo para inferência do Índice de Sítio, foram desenvolvidos. As variáveis ambientais mais significativas para explicar o incremento corrente anual em altura dominante foram: precipitação pluviométrica, variação da evapotranspiração potencial, temperatura máxima, temperatura mínima. A aplicação do modelo contra base de dados independente apresentou redução do erro padrão da estimativa do incremento anual em altura dominante, área basal e volume em 30,1%, 21,9% e 36,0% respectivamente, quando comparado com o sistema de modelos sem variáveis ambientais. Para inferência do Índice de Sítio, as variáveis ambientais mais significativas foram: precipitação média mensal e temperatura média mensal, tornando possível sua estimativa em bases ambientais. A análise de sensibilidade dos parâmetros da função de Richards demonstrou que a metodologia apresenta característica extrapolativa. Adicionalmente, observou-se que variáveis com características ecofisiológicas como por exemplo evapotranspiração real e déficit de água no solo, oriundas do balanço hídrico calculados pela

metodologia de Penman-Monteith não superaram as variáveis climáticas de coleta direta na estação meteorológica, como precipitação e temperatura, para melhoria das estimativas dos modelos desenvolvidos. O estudo permitiu concluir que o Índice de Sítio não é estável ao longo do ciclo de vida dos povoamentos de *Eucalyptus grandis* e que isso está relacionado, principalmente, ao fator “disponibilidade de água”, tanto em nível quanto em variação ao longo do tempo.

Palavras Chaves:, modelos empíricos, balanço hídrico, variáveis ambientais, índice de sítio, clima, solo.

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the impact of environmental variables on the reduction of the standard error of estimative (SEE) from a set of growth models developed for clonal stands of natural hybrids of *Eucalyptus grandis* located at northern Espírito Santo and southern Bahia States, Brazil. The selected variables were introduced into Richards function as modifiers of its parameters, to estimate dominant height. As a result, Site Index may change during the rotation period which contrasts with traditional empirical model concepts of a fixed SI. The methodology increases estimative precision by associating stand variables with environmental ones. It is an alternative to increase information acquisition agility, very useful to forest companies routine operations. It also allows cost reduction in forest inventory. Another convenience of this methodology is to allow potential productivity forecasts for non planted areas, thus contributing to the land use decision process. The entire growth and yield system is composed by several models for: tree survival, basal area, dbh variance, dbh/height relation and stem taper. The Weibull *pdf* parameters were recovered by moment algorithm, describing the dbh distribution. The environmental variables are related to physic characteristics of the soil, geographic localization and climatic conditions of the region. The water balance was calculated by using two approaches: a) the empirical method of Thornthwaite-Mather; b) the combined method of Penman-Monteith. Daily data from 19 automatic weather stations covering 186 thousand hectares were matched to 904 permanent sample plot remeasurements and 2.307 forest inventory results. The inventory and environmental data matching was the basic condition to carry out this study. The variable selection process was made by using Principal Component Analysis and Multiple Regression Analysis via backward elimination procedure. Six equations for current annual increment (CAI) estimation and one equation for site index estimation, were developed. The selected environmental variables for CAI estimation were: monthly precipitation, potential evapotranspiration variation, monthly maximum temperature and monthly minimum temperature. A validation process was performed against independent data. Standard error of estimative (SEE) reduced 30,1%, 21,9% and 36,0% for dominant height, basal area and volume respectively, when compared to estimations made by empirical models without environmental variables. The selected variables for SI estimation were: monthly precipitation and monthly average temperature. Sensitivity analysis of the Richards model parameters demonstrated that the method can be extended to non-sampled environmental situations. Additionally, it was observed that ecophysiological variables derived from Penman-Monteith water balance, such as current evapotranspiration and soil water availability, cause lower positive impact on error reduction of growth projections than a directly collected variables such as precipitation and temperature. The study allowed to conclude that the Site Index normally changes during rotation cycle. These changes are especially related to "water availability" to the *Eucalyptus* plantations.

Key Words: empirical growth models, environmental variables, weather condition, water balance, site index.

INTRODUÇÃO

O manejo florestal, no seu sentido mais amplo, envolve a escolha de estratégias de ação que viabilizem o negócio como um todo. O regime ótimo de manejo, sob certas condições de demanda, produtividades, distâncias, custos silviculturais e de colheita, é o objetivo maior perseguido pela gerência florestal. A escolha da prática ideal para cada talhão da propriedade florestal estará, então, contribuindo para o sucesso do empreendimento.

O ponto inicial para qualquer processo de planejamento da produção florestal, dado um propósito de negócio e as restrições de ordem ambiental, social e econômica, quer seja numa operação verticalizada ou não, é o fluxo de produção potencial do recurso florestal no tempo. Por sua vez, a qualidade da decisão estará diretamente relacionada à existência de um cadastro florestal confiável, a precisão das estimativas de inventário e a disponibilidade de modelos que estimem a capacidade produtiva para o futuro. O acesso às informações de custos florestais operacionais – silvicultura/colheita - e de transporte permitirão, enfim, através de análises econômicas, embasar as tomadas de decisão mais apropriadas e que atendam às expectativas dos acionistas e da sociedade, visando agregação de renda ao negócio.

Assim, modelos de crescimento e produção florestal descritivos fazem parte deste rol principal de ferramentas necessárias ao bom funcionamento do planejamento florestal. Sua maior contribuição se dará, no entanto, ao poder de inferência sob diferentes condições de idade, sitio e densidades populacionais. Para que isto seja possível, uma ampla base de dados, cobrindo toda a variação dos povoamentos florestais existentes, é necessária. Quanto maior a segurança nesta cobertura e na exatidão dos dados, maior será a chance de sucesso da modelagem RENNOLLS (1997). Por sua vez, as metodologias estatísticas têm evoluído nos últimos anos, permitindo um grande avanço na modelagem de dados florestais.

Originalmente, os modelos tiveram desenvolvimentos para espécies de crescimento lento e foram obtidos para populações florestais com idades de rotação altas, na casa de dezenas de anos CLUTTER *et al.* (1983), ALEMDAG (1991), THROWER & GOUDIE (1992). A estabilidade do crescimento sob diferentes condições de sitio e regime de manejo sempre se caracterizou como aceitável e,

neste caso, os modelos biométricos tradicionais que envolvem sitio, densidade e idade como variáveis preditoras, tenderam a gerar boas respostas. No entanto, quando a espécie apresenta acentuado crescimento e sua idade de rotação é mais curta, nem sempre esta estabilidade é verificada. MONSERUD (1984a) apontou problemas para uso indiscriminado do índice de sitio, uma vez que as metodologias existentes impõem certa inflexibilidade nos procedimentos de modelagem.

Anos de pronunciada seca e/ou solos rasos e pouco estruturados são motivos de variações, nem sempre explicadas pelas tradicionais variáveis sitio, idade e densidade populacional. No caso de essências como eucalipto, plantadas em condições de acelerado ritmo de desenvolvimento, a experiência tem demonstrado que variáveis de solo e clima têm considerável influência na explicação do crescimento. STAPE (2002) identificou significativa influência do aporte hídrico na produtividade de povoamentos de eucalipto implantados no Estado da Bahia. Esse fato sugere que o estabelecimento de um vínculo via modelagem, entre as variáveis ambientais e a capacidade produtiva do povoamento florestal, parece contribuir para a melhoria das estimativas volumétricas. Como a previsão meteorológica tem precisão diminuída com o aumento do intervalo de inferência, a validade do uso de variáveis do ambiente nos modelos de crescimento está relacionada a: a) previsão de produção de áreas não povoadas pela essência florestal de interesse; b) atualização das informações de inventário florestal com o uso dos dados climáticos de uma estação meteorológica associada permite, em determinadas circunstâncias, uma economia de recursos em novos levantamentos florestais; c) análise de risco através da simulação de diferentes cenários ambientais. SNOWDON (1999) considera que um inventário florestal raramente é aplicado em grandes áreas em intervalos anuais, mas informações acuradas sobre o recurso florestal são sempre necessárias a qualquer momento, reforçando a importância desse enfoque metodológico.

O ritmo de crescimento da cultura do eucalipto no Brasil é dos mais acelerados no mundo e sua idade de rotação é menor comparativamente às espécies de crescimento mais lento. Por outro lado, a sensibilidade desta essência florestal às variáveis de solo e clima, demonstra que os tradicionais modelos biométricos usados para projeção de crescimento, nem sempre são eficazes para sua inferência.

Uma ciência de desenvolvimento crescente, vinculada à fisiologia vegetal, é a que envolve a modelagem ecofisiológica. Com o objetivo de conhecer e estimar as causas dos processos biológicos, este ramo de conhecimento tem evoluído consideravelmente nos estudos de interação planta x solo x água x atmosfera, conferindo uma visão muito mais generalista e fisiologicamente gabaritada para “prever” condições de crescimento. Genericamente, a fase dos estudos ecofisiológicos é de pesquisa básica e os retornos de aplicação essencialmente práticos são vislumbrados para horizontes mais distantes (STAPE, 1999). Congressos e simpósios a nível mundial têm sido realizados nos últimos anos e, surge adicionalmente, uma tendência no sentido de uma visão mesclada dos modelos biométricos tradicionais com os modelos por processo (MOHREN & BURKHART (1994); AMARO & TOMÉ (1997); REED (1997); BURKHART (1997)), pois percebe-se que as duas filosofias de modelagem podem ser mutuamente complementares e não conflitantes, se bem entendidas e analisadas.

Enquanto os modelos por processos ou mecanicistas têm maior capacidade generalista, os modelos biométricos têm uma característica de maior objetividade REED (1997). Os modelos mecanicistas possuem uma tendência intrínseca de maior potência de inferência, mesmo para situações não pontualmente amostradas, enquanto que os modelos descritivos reproduzem bem as situações do mundo real, mas estritamente dentro da base de dados considerada na sua formulação BURKHART (1997).

O caminho de aproximação das duas filosofias de modelagem pode representar um importante passo no sentido de uma nova e preciosa abordagem científica. Os pontos fortes da filosofia biométrica aliada aos aspectos ambientais certamente promoverão uma melhoria das estimativas do crescimento e da produção de essências de rápido desenvolvimento.

OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é investigar a contribuição das variáveis ambientais na redução do erro de estimativas de crescimento e produção

de madeira de povoamentos clonais de híbridos naturais de *Eucalyptus grandis* na região sudeste do Brasil.

Como objetivos específicos, a presente pesquisa pretende:

- Averiguar a relação entre incremento anual em altura dominante e variáveis ambientais;
- Definir um modelo que incorpore as variáveis do ambiente para estimativa do incremento anual em altura dominante;
- Averiguar a relação entre Índice de Sítio e variáveis ambientais;
- Definir um modelo que incorpore as variáveis do ambiente para estimativa do Índice de Sítio;
- Avaliar o efeito de diferentes métodos de cálculo da evapotranspiração das plantas na formulação de variáveis ambientais associadas ao crescimento florestal;
- Avaliar o comportamento geral do sistema de modelos de crescimento e produção por classe diamétrica desenvolvido quando variáveis ambientais são incorporadas somente no modelo de altura dominante.

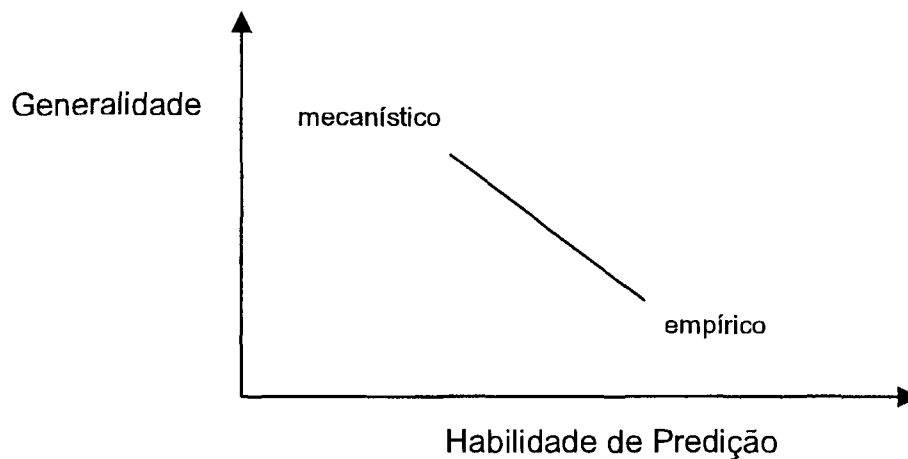
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MODELOS

VANCLAY (1999) define modelo de crescimento como uma abstração da dinâmica natural de um povoamento florestal considerando crescimento, mortalidade e outras mudanças na sua composição e estrutura. KIMMINS (1997a) define um modelo como “uma abstração ou entidade física que representa em alguma forma e/ou função, os processos e entidades do mundo real”. SANQUETTA (1996) considera que existem diversos tipos de modelos formais, como por exemplo, verbais ou por palavras, pictóricos, físicos, fluxogramas, gráficos e, finalmente, os modelos matemáticos. Em qualquer caso, o autor sustenta a necessidade de serem construídos de acordo com os objetivos do uso requerido.

Segundo AMARO & TOMÉ (1997), modelos para simulação de crescimento de árvore ou de povoamento são normalmente desenvolvidos baseados em uma das duas filosofias alternativas com diferentes objetivos e técnicas de modelagem: modelos de crescimento e produção orientados ao manejo florestal, chamados modelos empíricos e os modelos baseados em processos ecofisiológicos. REED (1997) diz que os modelos podem ser mecanísticos quando visam alcançar generalidade pela incorporação de processos ecofisiológicos na formulação do modelo, ou então, podem ser descritivos quando visam descrever o comportamento de sistemas particulares sob estreita amplitude de condições. Os usos potenciais de um certo modelo dependem do propósito para o qual ele foi desenvolvido, das escalas espaciais e temporais que ele opera e das premissas assumidas no processo de desenvolvimento. Segundo o autor, são as formulações mecanísticas ou empíricas dos modelos que definem suas capacidades de generalidade e habilidade de predição, conforme apresentado na Figura 1.

FIGURA 1- RELAÇÃO ENTRE GENERALIDADE E HABILIDADE DE PREDIÇÃO VERSUS FORMULAÇÃO DA MODELAGEM - REED (1997)



KIMMINS *et al.* (1990) afirmaram que no século XIX, a inflexibilidade da formulação das tabelas de produção levaram os biometristas alemães a conclusão de que a predição da produção deveria ser baseada na compreensão dos fatores determinantes do crescimento, o que introduziu então a altura das árvores dominantes como preditoras da capacidade produtiva do sítio. No início da década de 70 esta filosofia levou ao desenvolvimento de modelos de simulação baseados em processos fisiológicos do crescimento florestal. Muitos modelos baseados em processos falham ao representar explicitamente todas os fatores determinantes do crescimento florestal. Alguns consideram somente a radiação solar e a fotossíntese, outros simulam interações entre a radiação solar e umidade atmosférica no controle da fotossíntese, enquanto outros focam a questão do controle nutricional do crescimento, mas ignoram a radiação e/ou a umidade do ar. Alguns modelos baseados em processos representam a competição entre árvores, mas ignoram as interações com a vegetação rasteira e/ou arbustos, o que em alguns ecossistemas pode ser uma séria omissão. Tais modelos podem oferecer predições satisfatórias para diferentes fatores e/ou processos que estão sob simulação, mas não são apropriados para situações nos quais importantes processos de crescimento não representados nos modelos são alterados. Segundo o autor, melhorias nos modelos baseados em processos requerem melhor cobertura dos principais determinantes

das funções do ecossistema e/ou a combinação com modelos empíricos, numa “simulação híbrida” dos preditores de produção.

Ao invés de serem desenvolvidos como modelos preditivos para suportar decisões de manejo, os modelos mecanísticos objetivam modelar os processos de crescimento tendo como variáveis independentes luz, água, temperatura e níveis de nutrientes disponíveis no solo e fornecendo respostas em termos da alocação de biomassa em raízes, troncos e folhas através da modelagem da fotossíntese e da respiração LANDSBERG & WARING (1997). Os modelos processuais são úteis para compreender e ligar partes previamente isoladas do conhecimento e podem ajudar a identificar lacunas onde mais esforço de pesquisa se faz necessário VANCLAY (1999). Segundo PASSIOURA (1996), os modelos mecanísticos podem ser chamados de modelos científicos (“*scientific models*”) pois objetivam melhorar nosso entendimento sobre as interações da fisiologia e do ambiente os quais afetam as plantações. Algumas vezes, segundo o autor, eles têm falhado por serem baseados em suposições não testadas sobre os processos que controlam o crescimento e, nesse caso, tornam-se úteis para o auto-aprendizado de seus desenvolvedores.

Muitos autores argumentam que a aplicação limitada dos modelos processuais como ferramenta prática é uma consequência do grande número de parâmetros necessários, da complexidade dos modelos e da falta de documentação apropriada. Mas por outro lado, o uso de modelos baseados em processos melhor contribui para a compreensão de como os fatores ambientais afetam o crescimento e podem auxiliar na definição da produtividade potencial em áreas sem histórico de cobertura florestal e sob diferentes condições ambientais ALMEIDA *et al.* (2002).

Os modelos de crescimento auxiliam pesquisadores e manejadores em diversas formas. VANCLAY (1999) ressalta a habilidade dos modelos biométricos em prever produções futuras, o que permite uma eficiente previsão de uso de recursos mas, o seu mais importante papel deve ser associado à exploração de opções de manejo e alternativas silviculturais. Segundo PASSIOURA (1996), os modelos descritivos podem ser chamados de modelos de engenharia (“*engineering models*”) e as melhores formulações são baseadas em relações empíricas entre o comportamento da planta e as principais variáveis independentes consideradas. E acrescenta que, em função dessa natureza empírica, não se pode esperar sucesso em aplicações para fora da base de dados originais. BURKHART (1997) assinala

que experiências com ajuste de modelos para diferentes bases de dados têm demonstrado que algumas formas funcionais são robustas, e assim, apresentam certa generalidade. Mas aquelas equações muito complexas ajustadas por técnicas de regressão não linear e que, não consideram as bases conceituais do fenômeno sendo descrito, raramente apresentarão bons resultados contra novos dados.

Os objetivos das atividades de modelagem podem variar consideravelmente, desde a compreensão das dinâmicas dos ecossistemas e a geração de hipóteses a serem testadas em condições de campo ou laboratório, até a predição sob condições bem definidas. MOHREN & BURKHART (1994) fizeram uma comparação das duas formulações de modelos quanto as suas habilidades em pesquisa, transferência de informação e suporte ao manejo florestal – Tabela 1. Segundo os autores, os modelos baseados em processos procuram explicar o comportamento das funções do ecossistema, sendo mais específicos para a área de pesquisa, enquanto que os modelos descritivos ou empíricos prestam-se para aplicações de cunho mais prático na extensão e manejo. Para o futuro, os autores apontaram para uma clara necessidade de esforço integrado das duas abordagens. Considerando os desafios da pesquisa florestal, tais como predição do crescimento, da dinâmica dos povoamentos florestais e da análise das respostas às mudanças ambientais, uma combinação das duas abordagens poderá servir para cobrir a lacuna entre estas disciplinas e entre as aplicações em pesquisa e manejo florestal.

TABELA 1- RELEVÂNCIA DOS MODELOS BASEADOS EM PROCESSOS E MODELOS DESCRITIVOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO QUANTO SUAS APLICAÇÕES EM PESQUISA, TRANSFERENCIA DE INFORMAÇÃO E SUPORTE AO MANEJO FLORESTAL (MOHREN & BURKHART (1994))

	Modelos Processuais	Modelos Descritivos
Pesquisa	***	**
Serviço de extensão	*	***
Manejo florestal	**	***

*Relevância indicada por: * pouca; ** intermediária; *** alta*

1.2 MODELOS BIOMÉTRICOS E MODELOS PROCESSUAIS

SCOLFORO (1990) afirma que o rendimento sustentado das florestas requer não somente o conhecimento do estoque de crescimento da floresta, mas também a expectativa das produções futuras. Em função disso, praticamente todos os florestais de renome da Alemanha do século XVIII e início do século XIX executaram estudos de produção baseados em observações do crescimento florestal, ou seja, dentro do conceito de modelos biométricos ou empíricos. Segundo SPURR (1952), tabelas de produção fornecendo volume médio dos povoamentos em várias idades, crescendo em vários sítios foram usados na Europa antes do fim do século XVIII. Segundo o mesmo autor, os primeiros estudos de crescimento na América do Norte foram realizados no final do século XIX e eram baseados em tabelas de produção normais (povoamentos completamente estocados). Nos últimos anos, a evolução da computação, técnicas estatísticas e biometria, possibilitou avanços consideráveis na modelagem biométrica em todo o mundo OLIVEIRA (1995), gerando modelos em nível de povoamento, para classes diamétricas e para árvores individuais para as mais diversas essências florestais (CLUTTER *et al.* (1983) ; VANCLAY (1999)).

Os modelos biométricos ou empíricos, baseados num grande número de observações feitas em parcelas permanentes, são caracterizados como a descrição das relações entre as variáveis envolvidas sem considerar, a princípio, os processos físicos e biológicos que governam o crescimento, embora modelos com comportamento biológico possam ser utilizados. Segundo BURKHART (1997), o termo “empírico” normalmente é associado à imagem de uma metodologia expedita e de menor qualidade, porém isto não representa a realidade. Os modelos empíricos não necessariamente são menos criativos, científicos, elegantes ou requerem menor capacidade intelectual. Possuem esta denominação, pois são funções ajustadas a dados observados em amostragem da população florestal de interesse, ou seja, modelam as “consequências” e não as “causas” dos processos fisiológicos.

Os modelos baseados em processos ou mecanísticos, por sua vez, têm sido desenvolvidos na área florestal somente nos últimos anos e variam em função das suas formulações e escalas temporais e espaciais de abstração. Estes modelos tentam descrever o comportamento do ecossistema com base nos processos

edáficos, fisiológicos e ecológicos que os governam, os quais por sua vez são fundamentados em teorias e hipóteses que estão sendo constantemente testadas e revisadas pela ciência. Entre os modelos mecanísticos mais conhecidos na área florestal podem se destacar: CENTURY (PARTON (1992)) , BGC (RUNNING & GOWER (1991)), GEM (RASTETTER *et al.* 1991), G'DAY (COMINS & McMURTRIE (1993)), 3-PG (LANDSBERG & WARING (1997)), PROMOD (BATTAGLIA *et al.* (1999)), entre outros. Segundo STAPE (2001), o modelo CENTURY foi inicialmente desenvolvido para descrever a dinâmica de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e S em áreas de gramíneas entre as porções aérea, radicular e o solo. O modelo BGC (“biogeochemical cycles”) é altamente controlado pelo clima e simula os ciclos de C, N e água para áreas amplas e de vegetação homogênea. O modelo GEM (“general ecosystem model”) modela os fluxos de C e N entre os compartimentos da floresta e do solo em resposta a fatores ambientais como umidade do solo, radiação, teor de CO₂, temperatura, fertilidade (N). O modelo descreve a dinâmica de C e N na floresta e no solo. A produtividade primária líquida é função da radiação absorvida e do teor de N nas folhas. Já o 3-PG (“physiological principles predicting growth”) é um modelo ecofisiológico em nível de povoamento que calcula o total de carbono fixado pelas árvores como função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel e restringida pela umidade do solo, déficit de pressão de vapor e idade do povoamento. O modelo PROMOD (BATTAGLIA *et al.* (1999)) prediz a produção anual de biomassa seca com base em informações da posição geográfica e da classificação física e química do solo. O modelo BIOMASS (McMURTRIE *et al.* 1990) foi desenvolvido para estimar a fotossíntese anual líquida de povoamentos de *Pinus radiata* na Nova Zelândia, a partir de dados climáticos, características físicas do local (latitude, longitude, profundidade das raízes e capacidade de retenção de água do solo), de informações do povoamento (densidade populacional, dimensões das copas e índice de área foliar), além de parâmetros fisiológicos como por exemplo, a máxima condutância estomática (que mede a velocidade das trocas gasosas pelas folhas).

STAPE (2002) pesquisando os componentes da produção primária bruta de povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* plantados no norte do Estado da Bahia, detectou e quantificou a contribuição dos recursos naturais: água, luz e nutrientes, calibrando o modelo 3-PG (LANDSBERG &

WARING (1997)) à situação pesquisada. O modelo capturou a influência da água e nutrientes na fixação de carbono e no seu padrão de alocação entre parte aérea e radicular. O autor concluiu que o aporte hídrico se destacou como o principal elemento controlador da produtividade e do uso de recursos naturais. Adicionalmente, detectou-se que os povoamentos mais produtivos foram aqueles que mais utilizam os recursos naturais, porém, o fazem de modo mais eficiente que plantios de menor produtividade. Os resultados da pesquisa demonstraram que o *Eucalyptus* tem sua eficiência quântica (conversão da radiação solar em carbono fixado pela fotossíntese) aumentada, área foliar aumentada e, alocação de fotossintetizados para a raiz diminuída com o aumento do aporte hídrico. Contrariamente, em períodos com déficit hídrico, a produção de madeira é significativamente afetada.

1.3 EXPERIÊNCIAS COM MODELAGEM

Cientistas envolvidos no desenvolvimento de cada uma das formulações, empíricas ou baseadas em processos, frequentemente trabalham separadamente. AMARO & TOMÉ (1997) afirmaram que, no futuro, seria desejável que os modelos orientados ao manejo florestal dentro de abordagem empírica fosse mais fundamentada biologicamente e que os modelos processuais pudessem melhor servir para propósitos práticos.

Algumas iniciativas nessa linha de raciocínio foram já desenvolvidas. Umas, procurando aliar dois modelos, um processual com outro empírico e, outras, procurando introduzir variáveis ambientais nas formulações de modelos descritivos.

1.3.1 Hibridação de Modelos Biométricos e Processuais

BALDWIN *et al.* (1993) combinaram um modelo de árvore individual chamado PTAEDA2 (BURKHART *et al.* (1987)) com um modelo baseado em processos chamado MAESTRO (WANG & JARVIS, 1990). Com o PTAEDA2 projeta-se para uma certa idade as variáveis do povoamento como: razão de copa, forma e comprimento da copa, ou seja, informações sobre a distribuição vertical e horizontal

da biomassa de folhas. Por sua vez, o modelo processual (MAESTRO), baseado nessas expectativas, calcula a produção de biomassa, o qual retorna para o PTAEDA2 ajustar suas previsões. Estes passos são repetidos em escala anual até a idade em que se deseja estimar a produção.

BATTAGLIA & SANDS (1997,1998) e BATTAGLIA *et al.* (1999), ligaram o modelo baseado em processo ProMod com o modelo empírico NitGro desenvolvidos para plantações de *Eucalyptus nitens* na Austrália. O modelo híbrido resultante foi aplicado em 16 talhões de *Eucalyptus globulus* na Tasmânia. A ligação dos modelos baseou-se na relação entre incremento médio anual em volume (IMA) e índice de sítio (IS), derivado do modelo empírico. O modelo processual sendo calibrado para estimar o volume numa determinada idade; e estando assim, apto a fornecer a estimativa do IMA a partir de bases ambientais e fisiológicas, permitiu através da relação empírica, estimar o índice de sítio. E os detalhamentos da produção e das variáveis do povoamento, foram então possíveis através do modelo empírico, baseado no índice de sítio resultante.

ALMEIDA *et al.* (2002) usando considerações similares ao trabalho de BATTAGLIA *et al.* (1999) ligaram o modelo processual 3-PG ao simulador de crescimento E-GROW ARCEL apresentado em MAESTRI (2002), para estimar o potencial produtivo de área superior a 180 mil hectares de plantios de *Eucalyptus grandis* nos estados do Espírito Santo e Bahia. Baseado em dados de solo e clima e em relações fisiológicas das plantas, o modelo processual foi calibrado para estimar o carbono acumulado no tronco para a idade de 6 anos. Usando uma relação entre incremento anual na idade 6 anos e índice de sítio ($R^2=0,99$), oriunda do modelo empírico, foi possível estimar esta última medida, a qual é um direcionador para o E-GROW ARCEL. Este, por sua vez, possibilita a estimativa da estrutura diamétrica do povoamento através da recuperação dos parâmetros da função densidade de probabilidade de Weibull pelo método de momentos. Após estimativa das alturas de cada classe diamétrica pelo uso de relações hipsométricas genéricas, os volumes são obtidos por tipo de tora, com o uso de funções de afilamento do tronco.

KIMMINS *et al.* (1997b) e KIMMINS *et al.* (1999) apresentaram uma abordagem de simulação híbrida através de um modelo de simulação de manejo de ecossistema florestal chamado FORECAST, o qual combina os tradicionais modelos empíricos com modelos baseados em processos para gerar um método de projeção

futura de biomassa bem como de outras variáveis do ecossistema, sob diferentes condições de manejo. O conceito de qualidade de sítio com base na eficiência de uso do nitrogênio foliar, é o direcionador do sistema, embora necessite informações sobre disponibilidade de nutrientes no solo, precipitação pluviométrica e radiação solar. O modelo FORECAST adota uma abordagem empírica para representar a mudança na qualidade de sítio, podendo ser livremente especificada pelo usuário, assumindo valores de altura dominante (conceito de índice de sítio), ou então, classes de produção de biomassa não importando seu valor, mas sim, a relação desta com os dados nutricionais que definem a qualidade de sítio. As alterações em capacidade produtiva são obtidas através de interpolações lineares destas variáveis.

1.3.2 Incorporação de Variáveis Ambientais em Modelos Biométricos

Alguns estudos têm sido desenvolvidos com base na inclusão de variáveis ambientais nas formulações de modelos empíricos. Neste caso, duas abordagens principais são trabalhadas: a) estimativa do índice de sítio a partir destas variáveis; b) estimativa da produção esperada a partir de variáveis ambientais e do povoamento.

HUNTER & GIBSON (1984) usaram a técnica de análise de componentes principais para selecionar variáveis edáficas e climáticas com relação significativa com o crescimento. Eles observaram uma relação positiva entre índice de sítio e precipitação, nutrientes, profundidade do solo e penetrabilidade do solo para plantios de *Pinus radiata* na Nova Zelândia. O modelo resultante foi ajustado por regressão linear múltipla, apresentando um erro padrão da estimativa de 2 m e um coeficiente de determinação de 57%. Em ordem decrescente de importância, as variáveis independentes nos modelos foram: a) precipitação anual; b) fertilidade do solo (N, Ca, Mg e K); c) profundidade do horizonte A; d) resistência do solo (penetrabilidade); e) temperatura média anual; e) teor de fósforo (P) no solo; f) pH do solo.

CARTER *et al.* (1989) relacionaram índice de sítio com déficit de água no solo durante a estação de crescimento (verão) e a concentração de nitrogênio mineralizável no solo de povoamentos de Douglas-Fir na região de British Columbia, no Canadá. O modelo final foi obtido por regressão linear múltipla, apresentando um

erro padrão de 3,1 m em altura dominante e um coeficiente de determinação de 67%.

Examinando a relação entre índice de sítio e fatores ambientais para Douglas-Fir na província de Firenze, Itália, CORONA *et al.* (1998) observou significativa influência da precipitação pluviométrica, excesso de água no solo, teor de argila, conteúdo de carbonato de cálcio e fisiografia. Aproximadamente 58% da variação observada no índice de sítio foi explicada pelas variáveis, num modelo de regressão linear múltipla. Os fatores de origem climática diretamente relacionados ao balanço hídrico tiveram maior influência do que aqueles de natureza topográfica e edáfica.

KAYAHARA *et al.* (1998) investigaram a relação entre índice de sítio e nutrientes do solo e das folhas de *Tsuga heterophylla* na costa sul da região de British Columbia no Canadá. Embora as medidas de solo e nitrogênio foliar mostraram-se importantes como variáveis explanatórias, a maior produtividade dos povoamentos não foi explicada pela maior disponibilidade de nutrientes.

CURT *et al.* (2001) analisaram a relação do índice de sítio com variáveis ecológicas de 202 povoamentos puros de Douglas-Fir em região de média elevação na França. Os resultados demonstraram correlação entre do índice de sítio e o padrão nutricional e umidade do solo. Uma função foi ajustada pelo método de regressão linear múltipla para estimar o índice de sítio tendo como variáveis independentes, em ordem decrescente de significância estatística: a) condição edáfica, dada pelo pH e relação C/N; b) elevação (altitude); c) índice de perda de água; d) capacidade de armazenamento de água; d) exposição topográfica (fisiografia). O modelo apresentou um coeficiente de determinação de 40% e um erro padrão da estimativa de 1,72 m.

Outra linha de pesquisa recai sobre a tentativa de explicar diretamente a produção de madeira a partir de variáveis ambientais. JACKSON & GIFFORD (1974) a partir de 132 locais representativos das diversas zonas climáticas da Nova Zelândia, relacionaram o incremento periódico (intervalo de 7 anos) em volume individual de árvores dominantes de *Pinus radiata* com variáveis do ambiente, como precipitação média anual, distribuição sazonal de precipitação, profundidade do solo, disponibilidade de nitrogênio e de fósforo nos horizontes superficiais do solo e temperatura média mensal diurna e noturna. O modelo de regressão linear múltipla

resultou num coeficiente de correlação de 72% e um erro padrão da estimativa de 0,122 m³.

NAUTIYVAL & COUTO (1984) estabeleceram uma função de crescimento para 36 espécies de eucalipto, plantados em diferentes regiões do Brasil em espaçamento inicial de 3 x 2 m e fertilizados na fase de estabelecimento. Um modelo polinomial envolvendo idade, área basal, evapotranspiração real anual, nível de fósforo no solo e horas de insolação anual, foram capazes de explicar 80% da variação do incremento médio anual em volume.

WOOLLONS *et al.* (1997), SNOWDON *et al.* (1998) e SNOWDON *et al.* (1999) incorporaram um índice climático dentro de modelo de crescimento para *Pinus radiata* na Nova Zelândia. Tanto a precipitação pluviométrica anual como a estimativa de carbono fixado obtido pelos modelos mecanísticos BIOMASS (McMURTRIE *et al.* (1990)) e GROWEST (FITZPATRICK & NIX, (1970)), foram testadas. Segundo os autores, cada observação anual de um índice climático (CI_i) pode ser considerada como composta de duas partes: uma média histórica (MH) e um desvio anual (Δ_i) deste valor, ou seja, $CI_i = MH + \Delta_i$. Estes termos podem ser transformados em escala dividindo-se pela média histórica (MH), resultando num índice climático escalar (SCI_i), ou seja: $SCI_i = 1 + \Delta_i / MH$. A soma destes índices, desde o plantio até uma dada idade, é dada por: $\sum SCI_i = \sum (1 + \Delta_i / MH) = idade + \sum \Delta_i / MH$, e dentro da base de dados usada para definir a média histórica (MH), os desvios escalares tem média zero e sua soma tende a zero. A formulação empírica escolhida para predizer o crescimento e a produção foi o modelo log-recíproco modificado de Schumacher (SCHUMACHER (1939); CLUTTER (1963); CLUTTER & JONES (1980)), dado por:

$$Y_2 = e^{\text{Log}((Y_1 \cdot \frac{T_1}{T_2})^\beta + \alpha \cdot (1 - (\frac{T_1}{T_2})^\beta))}$$

Onde Y_1 e Y_2 representam a produção atual e futura correspondentes às idades T_1 e T_2 respectivamente, α é a estimativa do parâmetro de máxima produção (assíntota) e β o parâmetro de forma. Na formulação original da equação de Schumacher, α era uma função do índice de sítio, β assumia valor igual a 1 e T era

idêntico à idade. Os autores analisaram diversas formas de inclusão dos desvios escalares nos termos α e T , substituindo-os por funções contendo tais índices climáticos derivados do modelo mecanístico BIOMASS e que permitiram reduções superiores a 50% no erro da estimativa em área basal.

SOARES (1999) incluiu a precipitação anual no modelo de área basal, dentro do modelo de volume segundo formulação compatível apresentada por CLUTTER (1963), obtendo resultados satisfatórios para plantios de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* no estado da Bahia, Brasil.

1.4 FORMA MATEMÁTICA PARA REPRESENTAR O CRESCIMENTO

Segundo VANCLAY (1999), equações empíricas descrevem o comportamento da variável de resposta sem, contudo, identificar as causas ou explicar o fenômeno. Isso não significa, no entanto, que tais funções não proporcionem predições biologicamente realísticas, nem que sejam inferiores às presumidas equações processuais. A forma mais amplamente usada das equações empíricas é a linear, que não necessariamente representa uma linha reta, mas sim, apresenta um padrão aditivo das variáveis explanatórias:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + e$$

Onde Y é a variável de resposta (p.ex. incremento em diâmetro) e os X s são as variáveis explanatórias (p.ex. diâmetro da árvore, índice de sítio, área basal), os β s são parâmetros a serem estimados e “ e ” é o termo relativo ao erro.

Ao contrário das equações empíricas, as equações teóricas apresentam hipóteses básicas associadas com as causas ou com a função do fenômeno descrito pela variável de resposta. Segundo o autor, existem poucas equações teóricas formuladas especificamente para aplicações florestais, sendo que a maioria foi emprestada de outras disciplinas. VANCLAY (1999) relata que nas décadas de 40 a 60 na Europa, o pesquisador Bertalanffy criou a hipótese de que o crescimento de um organismo poderia ser representado como a diferença entre a síntese e a degradação de seus materiais formadores. Ele assumiu que o processo de

anabolismo (síntese) e catabolismo (degradação) poderia ser expresso como uma função alométrica da massa (Y) e, assim, o crescimento (dY/dt) se aproximaria a:

$$dY/dt = \beta_1 \cdot Y^\alpha - \beta_2 Y^\gamma$$

Onde α e γ são constantes relativas ao anabolismo e catabolismo respectivamente. Segundo SCOLFORO (1998), uma relação alométrica ocorre quando existem elementos dimensionais de um organismo envolvidos numa equação do tipo $Y = c \cdot X^a$. Isso implica que a taxa de crescimento da variável de resposta mantém uma relação proporcional constante com a taxa de crescimento da variável independente, sendo "a" a constante alométrica e "c" dependerá das condições iniciais e também das mudanças de Y e X .

A forma generalizada da função de Bertalanffy ficou também conhecida como equação de Richards em função dos estudos de RICHARDS (1959) com crescimento de plantas e de CHAPMAN (1961), com populações de peixes, tomando a forma:

$$Y = A \cdot (1 - e^{-k \cdot t})^{\frac{1}{1-m}}$$

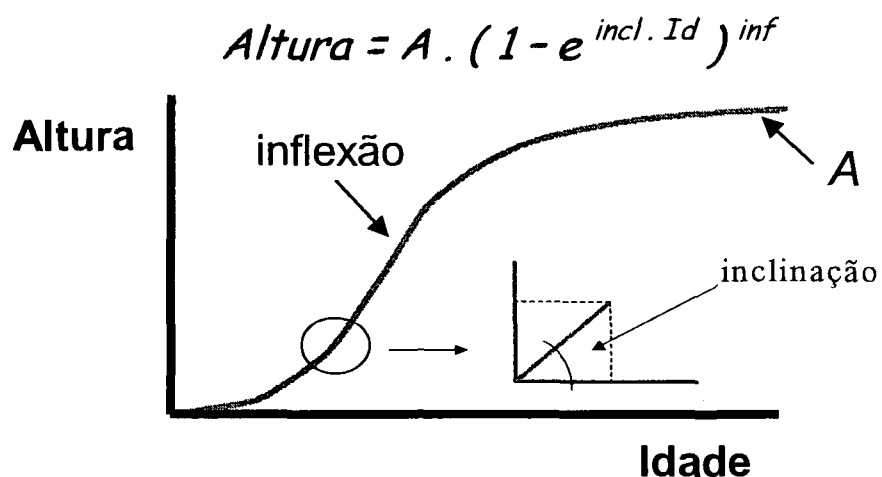
Onde Y representa a massa do organismo, A representa seu valor máximo atingível, t o tempo e, finalmente, k e m são constantes que ditam a forma da curva. O procedimento adotado por RICHARDS (1959), procurou generalizar o valor da constante alométrica, que ele identificou como m .

1.4.1 Interpretação das Constantes do Modelo de Richards

SCOLFORO (1998) apresenta detalhadamente o procedimento de dedução matemática do modelo de Bertalanffy realizado por Richards em 1959, o qual assumiu a forma simplificada apresentada na Figura 2, e que exemplifica o crescimento em altura de um povoamento florestal. O chamado modelo de Richards

possui as características típicas para o ajuste do crescimento de qualquer variável biológica, ou seja, tem início na origem, apresenta acelerado ritmo inicial de crescimento, um ponto de inflexão onde tal ritmo decresce e, por fim, tende a um valor assintótico.

FIGURA 2- MODELO BIOLÓGICO DE RICHARDS E O SIGNIFICADO DE SEUS COEFICIENTES



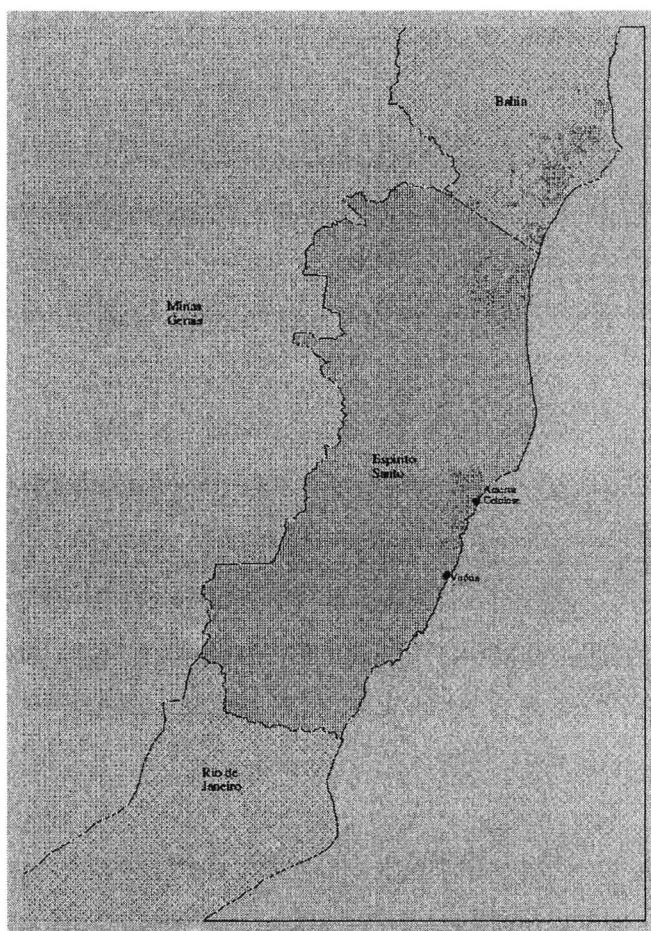
Na equação apresentada na Figura 2, o valor de A representa a máxima altura dominante possível de ser atingida, $incl$ expressa a taxa de crescimento em altura, inf representa o ponto de inflexão da curva e Id a idade (SCOLFORO (1997)). Ou seja, os parâmetros da função de Richards apresentam significado relacionado ao comportamento do crescimento biológico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO

As áreas em estudo, de propriedade da empresa Aracruz Celulose SA estão localizadas na parte leste e nordeste do Estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia, conforme apresenta a Figura 3, em três regiões administrativas.

FIGURA 3- LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁREAS DE ESTUDO



A Tabela 2 apresenta as coordenadas geográficas limites de cada região, a área líquida ocupada com os plantios de eucalipto, bem como a estrutura de parcelas de inventário e remedições do inventário contínuo, mérito do presente estudo.

TABELA 2 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS E RESPECTIVAS ÁREAS LÍQUIDAS DE REFLORESTAMENTOS COM ESTRUTURA DE PARCELAS DE INVENTÁRIO UTILIZADAS NO ESTUDO

Item	Aracruz - ES	São Mateus - ES	Nova Viçosa - BA
Latitude (S)	19°35' a 20°15'	18°05' a 18°45'	17°15' a 18° 05'
Longitude (W)	40°00' a 40°20'	39°30' a 40°10'	39°05 a 40°00'
Área (ha)	39.720	51.020	95.154
Parcelas Inv. Contínuo	166	213	16
Remedições Inv. Cont.	415	504	30
Parcelas Inv. Temporário	850	1105	84

Fonte: Aracruz Celulose SA - dez/2002

O clima na região de abrangência das áreas florestais da empresa varia, pela Classificação de Köppen, entre Aw e Am no Estado do Espírito Santo e Af, Am e Aw no Estado da Bahia (EMBRAPA, 2000). Genericamente esses tipos climáticos apresentam as características apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA NA REGIÃO DE ESTUDO

Tipo Climático de Köppen	Estado	Caracterização
Aw	ES	Clima tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno
Am	ES	Clima tropical úmido, sem estação seca pronunciada
Af	BA	Clima quente, em que o mês mais frio atinge temperatura superior a 18°C – mês mais seco com precipitação pluviométrica > 60mm
Am	BA	Clima tropical chuvoso, de monção
Aw	BA	Clima quente, com temperatura do mês mais frio superior a 18°C – verão chuvoso e inverno seco

Fonte: EMBRAPA (2000)

Os relevos, nas áreas de estudo no Estado do Espírito Santo, são caracterizados por chapadões terciários levemente inclinados em direção ao litoral, com altitude variando entre 30 e 100 metros. No Estado da Bahia, as áreas de plantio encontram-se sobre tabuleiros costeiros que se caracterizam por apresentarem superfícies tabulares recortadas por vales e de altitude similar às áreas do estado do Espírito Santo.

Segundo os macros levantamentos de solos existentes, predominam nas áreas do Espírito Santo, envolvendo a região de estudos, os Grandes Grupos de solo: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, coeso, relevo plano e suave ondulado (platôs litorâneos) e o Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto, relevo plano e suave ondulado (platôs litorâneos), além de Podzol.

Para a região do extremo sul da Bahia, os principais Grandes Grupos de solo, são: Latossolo com baixo teor de ferro, relacionado com sedimentos do tipo Tabuleiro, cor amarela, e os Podzóis relacionados a sedimentos marinhos, constituídos por arenitos não consolidados, de fertilidade muito baixa e má condição de drenagem e com textura arenosa.

2.2 BASE DE DADOS

2.2.1 Inventários Florestais

Os plantios selecionados para o estudo apresentam espaçamento inicial de 9 m² por planta, resultando numa densidade populacional de 1.111 árvores por hectare. São provenientes de plantios em áreas onde o uso anterior, era também silvicultural, sendo definidos como o tipo de manejo "reforma". Para realização desse estudo foram utilizados dados de inventário temporário e contínuo, e que são explanados nos itens a seguir.

2.2.1.1 Inventário Florestal Temporário

Dois processos amostrais temporários foram usados e forneceram dados para o presente estudo: a) O IFL - Inventário Florestal - o qual objetiva avaliar o

padrão de crescimento de cada talhão de eucalipto da empresa nas fases intermediárias do ciclo de produção para servir de base às projeções de produção que são usadas pelo sistema de planejamento florestal de longo prazo. b) O IPC - Inventário Pré Corte - para suportar as decisões de colheita florestal e é operacionalizado apenas a alguns meses antes da intervenção de corte raso. A Tabela 4 apresenta as principais características destes dois tipos de inventário florestal temporário.

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL TEMPORÁRIO

Característica	IFL	IPC
Idade amostrada	aos 2 e aos 4 anos	antes do corte raso (6-7 anos)
Área da unidade amostral	360 m ²	360 m ²
Intensidade Amostral	3 à 10 unidades amostrais por talhão, dependendo da área do talhão	3 à 15, dependendo da área do talhão
Dados coletados	todos DAPs, altura das árvores dominantes	todos DAPs, 25% das alturas em seqüência

Fonte: Aracruz Celulose SA

Obs.: árvores dominantes definidas como as 100 mais grossas por hectare

Para IFL a altura dominante é uma medida obtida diretamente na amostragem. Já para o IPC, tais alturas são obtidas por uma equação hipsométrica local ajustada para cada parcela, baseada em dados de DAP/altura das árvores mensuradas.

2.2.1.2 Inventário Florestal Contínuo

O Inventário Florestal Contínuo – IFC objetiva a geração de um banco de dados que serve para ajustes de modelos de crescimento. Sua estrutura amostral sofreu ajustes em 1995 e, portanto, medições anteriores e posteriores a essa data,

apresentam diferenças na forma de obtenção dos dados. A Tabela 5 apresenta as características principais do IFC, ressaltando as diferenças entre as medições antes e após 1995.

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO

Característica	IFC antes de 1995	IFC após 1995
Forma da unidade amostral	retangular	circular
Tamanho da unidade amostral	500 m ²	855 m ²
Data da medição	no aniversário de cada unidade de amostra	sempre nos meses de inverno
Dados coletados	todos DAPs, altura de 25% das árvores e altura das árvores dominantes	todos DAPs, altura de 25% das árvores e altura das árvores dominantes
Idade inicial de medição	1 ano	2 anos
Intervalo entre medições	1 ano	1 ano

Fonte: Aracruz Celulose SA

2.2.1.3 Cubagem de Árvores

O conhecimento do perfil da forma do tronco das árvores de eucalipto, base para o desenvolvimento de equações de volume e/ou funções de afilamento, foi possibilitado através de dados de cubagem rigorosa. Em 2.000, 404 árvores em diversas idades, locais e sítios de produtividade, foram derrubadas para medições do diâmetro ao longo do fuste. As alturas de coleta dos diâmetros com e sem casca foram estabelecidas relativamente à altura total, em 17 posições, a saber: 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95% e na altura de 1,3 metros (DAP). Esses dados foram utilizados para o desenvolvimento de funções de afilamento para estimativa do diâmetro ao longo do tronco, bem como, do volume por dimensões dos toretes, através de integração matemática da função.

2.2.2 Dados de Solos

A partir do levantamento da estrutura física dos solos realizada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa e que geraram mapas na escala 1:15.0000 (EMBRAPA (2000)), informações do solo foram obtidas. Para tal, trincheiras para avaliação do perfil do solo foram abertas a cada 40 hectares (transecto) e amostras complementares de solo foram colhidas a cada 2 hectares, possibilitando a identificação do tipo de solo bem como de suas características, especificado por talhão florestal da empresa. Para uso operacional das informações edáficas, os diversos tipos de solo foram agrupados em 22 classes e, as informações quantitativas disponíveis estão relacionadas aos aspectos físicos do solo, conforme apresentado na Tabela 6.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS 22 CLASSES DE SOLOS NA REGIÃO DO ESTUDO

Código	CAD (mm/m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
1	88	40,59	7,11	52,31
2	92	30,07	6,26	63,67
3	90	38,23	6,92	54,85
4	94	29,22	5,72	65,06
5	86	40,68	7,43	51,90
6	94	25,97	6,41	67,62
7	84	45,47	7,64	46,89
8	80	55,96	7,70	36,34
10	90	21,22	6,65	72,13
11	86	33,22	7,97	58,81
12	86	41,92	8,17	49,91
13	96	22,29	7,04	70,67
14	86	34,03	6,85	59,13
15	82	41,91	6,45	51,64
16	84	17,37	6,50	76,13
18	96	20,06	8,44	71,50
19	88	29,74	7,39	62,87
20	98	19,60	12,67	67,73
21	86	34,01	7,68	58,31
22	94	8,49	5,55	85,96

FONTE: Aracruz Celulose SA – levantamento de solos EMBRAPA (2000)

* CAD dado em mm de água retida por metro de profundidade do solo. O valor absoluto assumido dependerá da profundidade das raízes que varia em função da idade da cultura.

Segundo PEREIRA *et al.* (1997) a profundidade de solo explorado pelas raízes varia com o estágio de desenvolvimento das plantas. Uma vez definida a profundidade das raízes, tem-se então o volume de controle e, a quantidade máxima de água possível de ser retida para as plantas, é chamada de Capacidade de Água Disponível (CAD). Para sua obtenção utilizaram-se duas fontes de informação: a) o valor da capacidade de água disponível (CAD) por metro de profundidade definido para cada um dos 22 tipos de solo, apresentado na Tabela 6; b) a estimativa da profundidade de raízes - dada pela equação (1) apresentada adiante.

A CAD é resultante de aspectos físicos do solo e da profundidade do sistema radicular, e é dada por $CAD = 0,01.(CC\% - PM\%).d.z$ em que CAD é a Capacidade de Água Disponível (em milímetros) que representa o equilíbrio entre as forças de retenção de água no volume de solo (estrutura e cargas) e a ação da gravidade; CC% é a capacidade de campo (% em peso) e PM% é o ponto de murcha (% em peso); "d" é a densidade global aparente do solo (g/cm^3); e "z" é a profundidade do volume de controle (cm). As variáveis CC%, PM% e "d" foram determinadas por ocasião do levantamento de solos.

Para estimar a profundidade de raízes utilizou-se o modelo de Richards ajustado a uma base em dados de amostragem destrutiva de 58 árvores de eucalipto coletadas na região de Aracruz, dentro da região do estudo, as quais tiveram suas raízes extraídas e a respectiva profundidade mensurada. Para essa determinação, valas de 9 m² foram abertas tendo a árvore em seu centro. A profundidade do sistema radicular foi determinada quando não se observou mais presença de raiz (100% de coleta). A equação resultante estima a profundidade de raízes em função da idade do povoamento, tendo a seguinte forma:

$$z = 287,31 \cdot \left(1 - e^{-0,19483 \cdot Id}\right)^{1,02190} \quad (1)$$

Em que:

z = profundidade das raízes em cm ;

Id = idade (anos)

R² = 66,2% e EPE = +23,1 cm ou 17,9%

Assim, para um mesmo tipo de solo, o valor de CAD a que um povoamento está sujeito, aumenta com a idade, já que a profundidade de suas raízes fazem o volume de controle de solo aumentar. E a capacidade que cada solo tem de reter água para as plantas é fundamental no cálculo do balanço hídrico climatológico, pois a entrada de água no sistema via precipitação, ascensão capilar, drenagem superficial de entrada e drenagem lateral de entrada, tem no valor de CAD, a sua máxima capacidade de retenção e disponibilização para a cultura vegetal presente.

Cada talhão florestal da empresa foi classificado em uma das 22 classes, de acordo com o mapeamento edáfico mencionado, permitindo assim, o cálculo do balanço hídrico climatológico, pela associação com os dados climáticos da estação meteorológica mais próxima.

2.2.3 Dados de Clima

Na área de estudo encontram-se em operação 19 estações meteorológicas automáticas. Inicialmente as estações eram do tipo convencional e mediam precipitação pluviométrica e temperatura do ar, sendo que para a região de Aracruz/ES as coletas de dados foram iniciadas em 1968, na região de São Mateus/ES em 1976 e na região do extremo sul da Bahia em 1988. As estações automáticas foram, então, introduzidas a partir de 1995, sendo que algumas substituíram as estações convencionais e outras foram instaladas em novos locais. A Tabela 7 apresenta a relação das estações meteorológicas e sua localização geográfica.

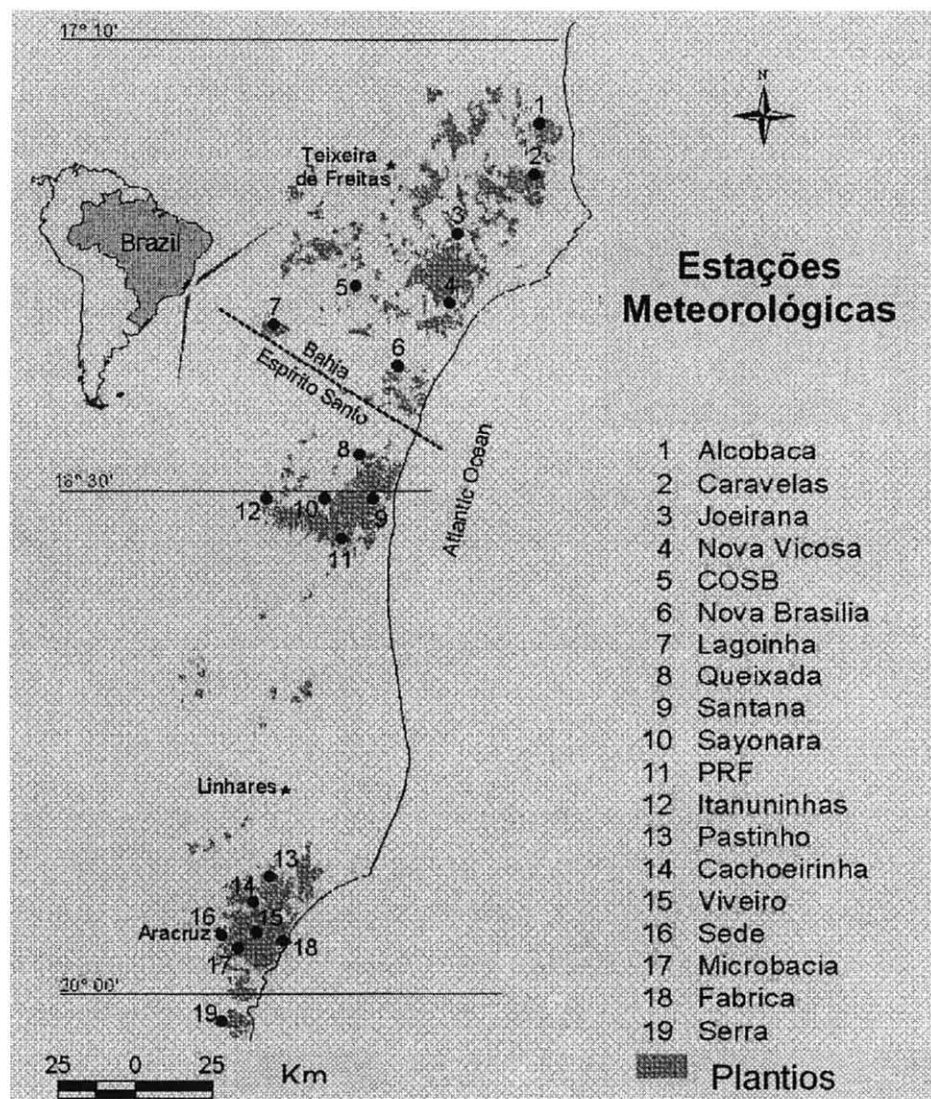
TABELA 7 - RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NA REGIÃO DE ESTUDO

Regional	Nome Estação	Latitude	Longitude
Aracruz	Sede	19° 49' 29"	40° 15' 48"
	Viveiro	19° 48' 51"	40° 09' 26"
	Serra	20° 04' 51"	40° 15' 58"
	Pastinho	19° 39' 06"	40° 06' 51"
	Cachoeirinha	19° 43' 36"	40° 09' 51"
	Microbacia	19° 51' 47"	40° 12' 52"
	Fábrica	19° 50' 29"	40° 04' 26"
São Mateus	Queixada	18° 23' 35"	39° 49' 48"
	Itauninhas	18° 31' 25"	40° 06' 46"
	Santana	18° 31' 32"	39° 47' 26"
	Sayonara	18° 31' 29"	39° 56' 12"
	PRF	18° 38' 30"	39° 53' 61"
Sul Bahia	CO SB	17° 53' 35"	39° 50' 20"
	Joeirana	17° 44' 25"	39° 32' 13"
	Caravelas	17° 33' 58"	39° 18' 20"
	Alcobaça	17° 25' 00"	39° 17' 33"
	Lagoinhas	18° 00' 30"	40° 05' 21"
	Nova Brasília	18° 08' 00"	39° 42' 56"
	Nova Viçosa	17° 56' 50"	39° 33' 34"

A identificação da abrangência da estação meteorológica, que influenciará, no cálculo do balanço hídrico climatológico de cada um dos talhões da região de estudo, foi assumida em função da distância entre o povoamento florestal e o ponto de coleta de dados meteorológicos. Para identificar qual estação meteorológica associar a cada talhão, utilizou-se o sistema ArcINFO para tratamento da base cartográfica digital da região do estudo, existente em nível de talhão. Através do modelo de Thiessen foi calculado o centro geométrico da poligonal que representa cada talhão e, em seguida, calculou-se sua distância às estações meteorológicas. A menor distância definiu a associação entre a estação meteorológica e o talhão (Leomar Mandelli – comunicação pessoal).

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial das estações na região de estudo.

FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DOS PLANTIOS FLORESTAIS E DA REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NA REGIÃO DO ESTUDO



2.2.4 Balanço Hídrico do Solo

Para avaliar o fator “água disponível” foi realizado o balanço hídrico do solo que é o controle das quantidades de água que entram e/ou saem de um determinado volume de solo explorado pelas plantas. Segundo PEREIRA *et al.* (1997), a entrada de água no solo diz respeito à precipitação pluviométrica (P), ascensão capilar (AC) do lençol freático para a região das raízes e pela entrada lateral (*Run In*, RI). Por outro lado, as saídas são representadas pela drenagem profunda (DP) do excesso de água para baixo da zona de raízes, pelo escoamento

superficial (*Surface Run Off*, SRO) que ocorre normalmente em solos encharcados após sucessivos dias de chuva forte, pela saída lateral (*Run Off*, RO) e pela evapotranspiração real (ER) das plantas. Portanto, num intervalo de tempo qualquer, o balanço hídrico do solo, do ponto de vista conceitual, é calculado por:

$$\Delta A = P + AC + RI - DP - SRO - RO - ER$$

Em que ΔA é a variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo. Para situações de cálculo do balanço hídrico de regiões extensas, caso desse estudo, ascensão capilar é compensada pela drenagem profunda, a drenagem lateral se auto anula (*Run In = Run Off*) e o escoamento superficial (SRO) é desprezado. Assim, a água armazenada no solo (ARM) neste mesmo intervalo de tempo (Δt ou $t - [t-1]$) é dada por:

$$ARM_t = ARM_{t-1} + P - ER - EXC \quad (2)$$

Em que o excesso (EXC) é definido quando $ARM > CAD$, ou seja, quando a capacidade de armazenamento do solo atinge seu máximo limite, a quantidade de água adicional é perdida do volume deste controle. O déficit de água no solo é a diferença entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração potencial (ET_p), quando $ET_r < ET_p$, o que significa falta de água para as plantas realizarem a máxima taxa de evapotranspiração possível.

Portanto, para realização do cálculo de balanço hídrico foi necessária a estimativa da evapotranspiração real das plantas, o que se fez usando dois métodos diferentes: a) método empírico de Thornthwaite-Mather; b) método combinado do balanço de energia e do poder evaporante do ar, conhecido como método de Penman-Monteith. As formulações dos dois métodos são encontradas em PEREIRA *et al.* (1997) e SACRAMENTO NETO (2001). No caso do método de Penman-Monteith, a medida de evapotranspiração já é a real, pois conceitualmente leva em consideração as condições da planta, e por isso, nenhuma estimativa adicional precisou ser realizada. Assim o cálculo do balanço hídrico seguiu a formulação dada pela equação (2).

Já no método de Thornthwaite-Mather, segundo PEREIRA *et al.* (1997), a evapotranspiração real (ET_r) é uma função empírica dependente da água armazenada no solo (ARM), da alteração (ALT) nesse armazenamento de um período para o outro e da diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial no período considerado. E por esse método, a água armazenada no solo para o período t , é calculada por:

$$ARM_t = CAD \cdot e^{\frac{NegAcum_t}{CAD}}$$

Onde CAD é a capacidade de armazenamento de água do solo (ou o ARM máximo possível) e NegAcum _{t} é a diferença entre P-ET_p, quando P<ET_p. Usa-se este procedimento para cálculo de ARM para os períodos em que P-ET_p for negativo. Quando, do contrário, houver um período chuvoso em que P-ET_p seja positivo, então:

$$ARM_t = ARM_{t-1} + (P - ET_p)$$

Por fim, se a precipitação for maior que a evapotranspiração potencial (P-ET_p>0), então a evapotranspiração real é igual a evapotranspiração potencial (ET_r=ET_p), pois não estará faltando água no sistema e as plantas estarão evapotranspirando na máxima taxa possível (potencial). No caso em que P - ET_p < 0, então a ET_r será igual à P + |ALT|.

O déficit de água no solo ou déficit hídrico (DEF) é dado por ET_p-ET_r. O excedente hídrico (EXC), por sua vez, é a quantidade de água que sobra no período chuvoso. Se ARM<CAD então EXC=0 e se ARM=CAD, então EXC=(P-ET_p) - ALT.

Uma abordagem teórica e com exemplos de cálculo da evapotranspiração real pelos métodos de Thornthwaite-Mather e Penman-Monteith, são encontrados nos Anexos 1 e 2.

A escala temporal dos dados meteorológicos também influi no cálculo do balanço hídrico. Algumas metodologias são específicas para dados climatológicos mensais, como por exemplo, o método de Thornthwaite-Mather, pois a evapotranspiração potencial estimada, baseia-se na precipitação mensal acumulada

e na temperatura média mensal. Outras metodologias permitem essa avaliação para intervalos diários ou até horários, como é o caso do método de Penman-Monteith. Aproveitando-se do fato dos dados climáticos estarem disponíveis em base diária, adotou-se o cálculo do balanço hídrico diário para as duas metodologias. No caso do método de Thornthwaite-Mather, partiu-se do valor mensal da precipitação e temperatura média para cálculo da evapotranspiração potencial mensal e, após sua divisão pelo número de dias do mês, obteve-se a estimativa da evapotranspiração potencial média diária, permitindo o cálculo do balanço hídrico diário. Assim, o princípio básico do método, baseado em informações climáticas mensais, não foi afetado.

Para o estudo subsequente de modelagem com as variáveis ambientais, no entanto, valores mensais das variáveis foram calculados. Ou seja, embora o balanço hídrico tenha sido realizado em base diária, as variáveis para modelagem adotaram uma base mensal por soma ou média dos valores diários, conforme apresentado na Tabela 8.

TABELA 8 - VARIÁVEIS AMBIENTAIS TRATADAS NO BALANÇO HÍDRICO

Variável	Origem	Obtida por	Unidade final
Precipitação pluviométrica	EC	Soma	mm.mes ⁻¹
Temperatura média	EC	Média	°C
Temperatura mínima	EC	Média	°C
Temperatura máxima	EC	Média	°C
Radiação Solar	EC	Média	MJ.m ⁻²
Déficit de Pressão de Vapor do ar	EC	Media	Kpa
Déficit de Água no solo	BH	Soma	mm.mes ⁻¹
Excedente de Água no solo	BH	Soma	mm.mes ⁻¹
Evapotranspiração Potencial	BH	Soma	mm.mes ⁻¹
Evapotranspiração Real	BH	Soma	mm.mes ⁻¹

EC - dados diários da estação climática ; BH - balanço hídrico diário

2.2.5 Pareamento das Variáveis Ambientais com Dados do Inventário Florestal

A modelagem de crescimento somente é possível se uma perfeita adequação entre as medições dos povoamentos num inventário florestal e as variáveis ambientais, for criteriosamente providenciada em termos espaciais e temporais. Em termos espaciais, cada parcela de inventário assumiu o tipo de solo cadastrado no talhão em que ela foi instalada, bem como, os dados meteorológicos da estação climatológica mais próxima. A escala temporal, dependeu basicamente da natureza da variável ambiental e do objetivo de modelagem. Por natureza da variável entende-se como sendo a sua possibilidade de variar com o tempo, assumindo situação estática ou dinâmica. As variáveis de solo, como por exemplo, teor de argila, areia e silte, bem como de localização geográfica definida pela latitude e longitude, são tipicamente variáveis estáticas. Já aquelas advindas das estações climatológicas e do cálculo do balanço hídrico, são de natureza dinâmica. A unidade temporal dessas variáveis utilizada na fase de modelagem foi em base mensal, embora tenham sido originadas a partir de dados meteorológicos diários, pois presumiu-se ser importante observar a distribuição da precipitação mensal nos diferentes dias dentro do cálculo do balanço hídrico.

Para a modelagem do índice de sítio, onde se procurou relacionar a altura dominante numa determinada idade com as variáveis do ambiente, trabalhou-se com as variáveis estáticas e dinâmicas. No caso dessas últimas, computou-se a média e o desvio padrão da média dos valores mensais de cada variável, entre a data do plantio e a data da medição do inventário.

Para a modelagem do incremento anual em altura dominante, por sua vez, somente foram consideradas as variáveis dinâmicas. Nesse caso, para cada remedição das parcelas permanentes, computou-se a média e o desvio padrão da média dos valores mensais de cada variável, entre a data da primeira medição e a data da segunda medição do inventário.

2.2.6 Seleção de Variáveis Ambientais

Foram utilizadas as técnicas de Análise de Componentes Principais (ACP) e a Análise de Regressão Múltipla pelo procedimento de eliminação de variáveis “backward”, para seleção das variáveis ambientais.

Um conjunto de dados composto por inúmeras variáveis do ambiente apresenta certa complexidade e correlações entre elas ocorrem freqüentemente, o que é chamado de multicolinearidade. Um procedimento de modelagem contendo tais características entre variáveis necessita de uma simplificação, sob pena de aumentar a complexidade do modelo pelo aumento do número de variáveis e, também, de influenciar negativamente as estimativas pela correlação entre variáveis independentes. Conforme GONZÁLES & FORMOSO (2000), a multicolinearidade afeta significativamente os coeficientes da equação de regressão, alterando o valor e até o sinal em relação ao que ocorreria se não houvesse esse problema. Na presença de correlação alta, os coeficientes de regressão estimados tendem a serem imprecisos e as estimativas dos coeficientes podem oscilar consideravelmente de um sub-conjunto de dados para outro. Quando ocorre colinearidade, as estimativas dos mínimos quadrados ainda são não-tendenciosas e eficientes, porém o erro padrão dos coeficientes tende a ser grande e, o teste baseado na estatística t de *Student*, calculará significância menor que a real. Outro efeito da multicolinearidade é que torna difícil obter interpretações sobre o efeito isolado de cada uma das variáveis.

Quando um conjunto de dados é composto de inúmeras variáveis, a identificação de quais são as mais expressivas para a explicação das variações do sistema, recai em um problema típico tratado pelas técnicas de estatística multivariada. Os dados de variáveis aleatórias, através de procedimentos de álgebra matricial, são explorados de forma a se conhecer melhor sua capacidade de representação de um sistema aleatório qualquer. Dentre as técnicas de estatísticas multivariadas, a Análise de Componentes Principais - ACP apresenta-se como ferramenta importante para a averiguação das variáveis que mais explicam a variabilidade geral de um conjunto de dados. Essa técnica não permite que se teste a hipótese da nulidade e/ou não são possíveis estimativas de quantidades. Porém, a ACP é uma técnica exploratória para avaliação da variabilidade de um conjunto de

variáveis (JOHNSON & WICHERN (1998)) e potente no auxílio à formulação de hipóteses a serem testadas em conjunto com outras técnicas estatísticas tais como análise de regressão (ISEBRANDS (1975)). A Análise de Componentes Principais é um procedimento analítico para transformação de um conjunto de variáveis aleatórias em outro conjunto de componentes das variáveis aleatórias, tendo as seguintes propriedades:

- são funções lineares das variáveis aleatórias originais;
- são ortogonais entre si, ou seja, são independentes umas das outras;
- a variação total entre eles é igual a variação total nas variáveis aleatórias originais, conseqüentemente, informações em função de diferenças entre as variáveis aleatórias observadas não é perdida na transformação;
- a variação associada com cada componente é decrescente, onde a primeira componente principal irá representar a máxima proporção possível da variação total, a segunda irá representar a máxima proporção da variação remanescente e assim em diante.

O conjunto de todas as variáveis ambientais foi, então, analisado pela técnica de estatística multivariada de Análise de Componentes Principais – ACP, obtendo tantas componentes (autovalores) quantas eram o número de variáveis. Dentro de cada componente, cada uma das n variáveis teve um peso relativo (coeficientes dos autovetores), que serviu de base para a identificação das variáveis com maior explicação da variabilidade do sistema e baixa correlação entre si, minimizando o efeito da multicolinearidade. Assim, dentro de cada componente principal, a variável que apresentou o maior coeficiente (valor modular) foi escolhida e, na sequência, seguiu para o procedimento de modelagem do crescimento e produção. Foram selecionadas somente as primeiras componentes, cuja variância associada apresentou valor superior a 1,0. A Matriz de Correlação Linear Simples foi utilizada adicionalmente quando houve semelhança de importância entre duas variáveis dentro de uma mesma componente principal. Aquela com maior correlação com a variável de interesse, foi escolhida.

Outra técnica de seleção de variáveis utilizada foi a Análise de Regressão Múltipla através do procedimento de eliminação de variáveis "backward", que

segundo DRAPER & SMITH (1990), busca a minimização dos resíduos das estimativas. Iniciando com um modelo linear múltiplo composto por todas as variáveis independentes, o procedimento conta com a análise da contribuição de cada variável, retirando-as uma de cada vez e, então, é avaliada a significância parcial do modelo, através do teste F. Ao final, o modelo resultante é formado pelas variáveis que demonstraram valor superior àqueles pré definidos pela probabilidade exigida (F de saída), sendo os demais, retirados do modelo.

2.2.7 Modelos de Crescimento e Produção sem Variáveis Ambientais

O sistema de crescimento e produção para *Eucalyptus grandis* sem inclusão de variáveis ambientais foi obtido em MAESTRI (2002), tendo sido desenvolvido com base nas mesmas informações de inventário florestal do presente estudo. O sistema, classificado na biometria florestal como modelo implícito (CLUTTER *et al.* (1983) ; SCOLFORO (1990); MAESTRI (1992); MAESTRI *et al.* (1995)), é baseado na recuperação dos parâmetros da função de probabilidade de Weibull através do método de momentos estatísticos (BURK & NEWBERRY (1984); SCOLFORO (1998)). São apresentadas a seguir as equações para altura dominante, sobrevivência de árvores, área basal, variância de diâmetros, relação hipométrica genérica e função de afilamento do tronco. Uma característica importante do sistema é a compatibilização entre a área basal advinda das classes diamétricas com aquela estimada pelo modelo global de área basal, o que possibilitou uma integração entre os níveis de detalhamento do sistema (global e por classe diamétrica), tornando-o mais preciso e idôneo.

2.2.7.1 Modelo para Estimativa da Altura das Árvores Dominantes

Usou-se a formulação de Richards, amplamente empregada na modelagem florestal (MONSERUD (1984b); SCOLFORO, (1990); MAESTRI (1992); MACHADO (1997)), pois apresenta característica similar ao comportamento biológico de crescimento de qualquer ser vivo.

Através do método da diferença algébrica (BAILEY & CLUTTER (1974); BORDERS *et al.* (1984); MALDONADO *et al.* (1987)) pode-se derivar funções com

comportamento anamórfico ou polimórfico. Anamorfismo significa mesma taxa de crescimento relativo em altura para todos os sítios e polimorfismo, significa crescimento proporcionalmente diferente entre os sítios. Estatisticamente, o que define a metodologia mais apropriada é o comportamento dos dados e os resultados da análise de regressão. Do ponto de vista biológico, a formulação polimórfica é mais coerente, uma vez que sítios mais produtivos tendem a culminar o incremento em idade mais precoce, o que por si só, já é uma expressão de desproporcionalidade dos ritmos de crescimento entre diferentes classes de sítio (MONSERUD (1984a)). Adotou-se o modelo polimórfico pela formulação dada por SCOLFORO (1997) com a seguinte forma:

$$Hd_2 = A \left(\frac{Hd_1}{A} \right)^{\frac{\ln(1 - e^{-incl \cdot Id_2})}{\ln(1 - e^{-incl \cdot Id_1})}} \quad (3)$$

Em que:

Hd_1 e Hd_2 = Alturas dominantes na idade Id_1 e Id_2 , respectivamente

Id_1 e Id_2 = Idades de medição inicial e final, respectivamente.

A e $incl$ = coeficientes do modelo relativos à assíntota e inclinação, respectivamente.

As estatísticas do ajuste aos dados de remedições de parcelas permanentes, demonstraram um coeficiente de determinação igual a 77,4% e erro padrão da estimativa absoluto de 1,49 m ou 6,9% em termos relativos. Aplicando-se o modelo na base independente de dados, obteve-se um erro padrão da estimativa de 1,41 m o que indica comportamento coerente do modelo.

2.2.7.2 Modelo de Sobrevivência de Árvores

A estimativa da quantidade de árvores sobreviventes, ou então, sua mortalidade como também é referenciada na literatura, é fundamental dentro de um sistema de crescimento e produção. Segundo VANCLAY (1999) os padrões de

mortalidade podem diferir em escala, frequência e severidade e esses fatores devem ser considerados na estratégia da modelagem. Em povoamentos bem manejados pela aplicação de desbastes a mortalidade natural é praticamente inexistente e, via de regra, a mortalidade é desconsiderada (SCOLFORD (1990)). Muitos trabalhos evidenciam a influência da capacidade produtiva (sítio) na curva de sobrevivência em plantios, como pode ser observado em MAESTRI (1992) e as formulações matemáticas dos modelos para estimativa do número de árvores são normalmente dependentes da idade inicial, do intervalo de tempo e, em alguns casos, de alguma expressão do sítio.

Os povoamentos clonais de eucalipto apresentam um comportamento peculiar com relação a mortalidade. Ao contrário daqueles com base genética variada, advindos de sementes e que implicam numa maior diferenciação da estrutura vertical do povoamento, os plantios clonais dentro de limites operacionais de idade de rotação (menos que 7 anos) e de espaçamentos (9-12 m²/planta), apresentam baixa mortalidade e pouca influência da capacidade produtiva do sítio.

O modelo selecionado para expressar a mortalidade dos povoamentos clonais de eucalipto, foi baseado na função probabilística de Weibull (ABREU (2000)) e tem a seguinte formulação:

$$N_2 = N_1 \cdot \left(e^{-\frac{(Id_2 - Id_1)}{\beta_1}} \right)^{\beta_2} \quad (4)$$

Em que:

N_1 = Número de árvores por hectare na idade inicial Id_1

N_2 = Número de árvores por hectare na idade final Id_2

$\beta_1 = 0,15896447$

$\beta_2 = 0,00120436$

O modelo apresentou um coeficiente de determinação de 69,1% e um erro padrão da estimativa de 61,4 árvores/hectare.

2.2.7.3 Modelos de Área Basal

A formulação utilizada permite estimativa a partir de uma informação conhecida num inventário na idade inicial (Id_1), bem como, a partir da idade zero. No primeiro caso, trata-se de um modelo de projeção e no segundo, de predição, apresentando as seguintes formas:

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) + \beta_1 \left(\frac{1}{Id_2} - \frac{1}{Id_1} \right) + \beta_2 (\ln(N_2) - \ln(N_1)) + \beta_3 (\ln(Hd_2) - \ln(Hd_1)) \quad (5)$$

$$\ln(G_2) = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{1}{Id_2} \right) + \beta_2 * (\ln(N_2)) + \beta_3 * (\ln(Hd_2)) \quad (6)$$

Em que:

Id_1 e Id_2 = idade inicial e final de medição

G_1 = área basal na idade inicial de medição, Id_1

G_2 = área basal na idade final de medição, Id_2

N_1 e N_2 = número de árvores por hectare na idade Id_1 e Id_2

Hd_1 e Hd_2 = altura dominante na idade Id_1 e Id_2

$\beta_0 = -4,99400146$

$\beta_1 = -0,83836893$

$\beta_2 = 1,09439587$

$\beta_3 = 0,66652191$

O ajuste do modelo aos dados demonstrou um coeficiente de determinação de 99,4% com erro padrão da estimativa de $1,41 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ou 7,9%.

2.2.7.4 Modelo para Variância dos Diâmetros

Em função da estratégia de modelagem adotada, onde se pretende obter a distribuição de diâmetros do povoamento via função probabilística de Weibull usando método de momentos estatísticos para recuperação de seus parâmetros, um

modelo para inferência da variância dos diâmetros é fundamental, pois o parâmetro de forma da distribuição probabilística é relacionado ao coeficiente de variação em diâmetro do povoamento. SCOLFORO (1990) e ABREU (2000) apresentaram alguns modelos para estimativa da variância de diâmetro. Os resultados demonstraram melhores ajustes no primeiro trabalho o qual foi desenvolvido para *Pinus caribaea var hondurensis* com e sem desbaste, com coeficientes de determinação da equação acima de 90%. Já o segundo trabalho desenvolvido para *Eucalyptus grandis* sem desbaste, apresentou estatísticas de ajustes satisfatórias um pouco inferiores, com coeficiente de variação entre 80 e 90%. Ajustou-se no presente estudo, uma formulação que contempla a variância dos diâmetros na idade inicial (Id_1) fornecendo estatísticas de ajuste satisfatórias, demonstrando que essa característica pode ser modelada dentro do conceito de “modelo de projeção”, conforme apresentado a seguir:

$$Var_2 = \beta_1 * \frac{Id_1}{Id_2} * Var_1 + \beta_2 * (1 - \frac{Id_1}{Id_2}) * (\frac{dg_1}{dm_1}) + \beta_3 * (Ln(Hd_2) - Ln(Hd_1)) \quad (7)$$

Em que:

Var_1 = variância dos diâmetros na idade inicial Id_1

Var_2 = variância dos diâmetros na idade final Id_2

dg_1 = diâmetro quadrático na idade inicial Id_1

dm_1 = diâmetro médio aritmético na idade Id_1

Hd_1 e Hd_2 = altura dominante nas idades Id_1 e Id_2

Id_1 e Id_2 = idade inicial e final

$$\beta_1 = 1,42778715$$

$$\beta_2 = 0,73100046$$

$$\beta_3 = 4,58067387$$

O ajuste do modelo aos dados demonstrou um coeficiente de determinação de 87,0 % com erro padrão da estimativa de 1,11 cm² o que representa 29,8 %.

2.2.7.5 Função Densidade de Probabilidade de Weibull

A função densidade de probabilidade de Weibull pode assumir diversas formas e tem grande aplicação na explicação da distribuição diamétrica das árvores de um povoamento florestal. Inúmeros trabalhos de modelagem da estrutura dos povoamentos florestais através dessa função probabilística, são encontrados na literatura florestal brasileira e mundial, entre eles BAILEY & DELL (1973), CAO *et al.* (1982), CLUTTER *et al.* (1983), FINGER (1979), COUTO (1980), BURK & NEWBERRY (1984), GLADE (1986), SILVA (1987), SCOLFORO (1990); MAESTRI (1992) e MAESTRI (1995).

Sua forma matemática é dada por:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{DAP - a}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{DAP - a}{b}\right)^c} \quad (8)$$

Os coeficientes “a”, “b” e “c” são responsáveis pela locação, escala e forma, respectivamente, e seus valores podem ser recuperados, através de diversos métodos, a partir das informações do povoamento florestal. A técnica dos momentos, segundo SCOLFORO (1998), estabelece que o coeficiente de variação em diâmetro tem relação com o parâmetro da forma da distribuição através da seguinte igualdade:

$$CV_{dap} = \frac{\sigma}{\bar{d}} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right)} \quad (9)$$

Em que:

CV_{dap} = coeficiente de variação em diâmetro

σ = desvio padrão do diâmetro ou raiz quadrada da variância do diâmetro

\bar{d} = diâmetro médio aritmético do povoamento

Γ = função gama

c = parâmetro responsável pela forma da função probabilística de Weibull

Através de processo iterativo, o parâmetro “ c ” é recuperado quando a igualdade for estabelecida. Uma vez recuperado o parâmetro da forma, então o parâmetro de escala “ b ”, é recuperado através de:

$$b = \frac{\bar{d}}{\Gamma(1 + \frac{1}{c})} \quad (10)$$

Em que:

b = parâmetro responsável pela escala da função probabilística de Weibull

\bar{d} = diâmetro médio aritmético do povoamento

c = parâmetro de forma já definido pela equação (9)

O parâmetro “ a ” pode ser obtido independentemente. Com isto, seu valor é determinado dentro do processo de compatibilização da área basal advinda da distribuição (soma das áreas transversais de cada classe diamétrica) com a área basal estimada pelo modelo global (eq. 5) ou (eq. 6). Como o parâmetro “ a ” é responsável pela locação (início da distribuição), então uma variação em sua magnitude irá “arrastar” a distribuição para um dos lados, levando a diferentes valores de área basal originada da função de distribuição de diâmetros. Assim, também por processo iterativo, obtém-se o valor do parâmetro de locação quando alcançada tal igualdade, ou seja, para diferentes valores de “ a ”, estima-se a distribuição diamétrica através da função Weibull (parâmetros “ c ” e “ b ” já recuperados pelas formulações (eq. 9) e (eq. 10)) e calcula-se a área basal resultante pela soma das áreas transversais de todas as classes de diâmetro. O valor do parâmetro “ a ” que estabelece a similaridade (menos de 0,1% de diferença) entre a área basal do modelo global (eq. 5) ou (eq. 6) com aquela obtida pelo processo iterativo, foi considerado como ideal.

2.2.7.6 Relação Hipsométrica Genérica

A altura de cada classe diamétrica foi obtida pela aplicação de um modelo de relação hipsométrica genérico, ou seja, uma equação capaz de estimar a altura de uma classe de diâmetro qualquer, levando em consideração também, algumas variáveis de povoamento, como idade, altura dominante, diâmetro quadrático e diâmetro médio aritmético. O modelo foi ajustado com base em dados de árvores individuais mensuradas no inventário florestal e pareadas com as informações de povoamento obtidas nos levantamentos, apresentando a seguinte forma:

$$Ht_i = e^{\beta_1 + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 \ln\left(\frac{Dg}{Dmed}\right) + \beta_4 \left(\frac{1}{Id \cdot DAP_i}\right) + \beta_5 \left(\frac{1}{DAP_i}\right)} \quad (11)$$

Em que:

Ht_i = altura total da classe de DAP_i

DAP_i = centro da classe de diâmetro

Hd = altura das árvores dominantes do povoamento

Dg = diâmetro quadrático do povoamento

$Dmed$ = diâmetro médio aritmético do povoamento

Id = idade do povoamento

$$\beta_1 = 0,43865400$$

$$\beta_2 = 0,89030800$$

$$\beta_3 = -0,30468400$$

$$\beta_4 = 0,73518300$$

$$\beta_5 = -2,52137800$$

O ajuste do modelo com base em 10.203 dados de árvores individuais demonstrou um coeficiente de determinação de 97,4 % com erro padrão da estimativa percentual de 1,90 %.

2.2.7.7 Funções de Afilamento do Tronco

A estimativa volumétrica de cada classe diamétrica foi obtida com o uso de equações de volume individuais ou de funções de afilamento de tronco, úteis para estimativa de volume de diferentes padrões de bitolas de toras ou toretes de madeira. Adotou-se a forma polinomial de potências fracionárias e inteiras conforme descrito por ASSIS (2000), tendo a seguinte forma genérica:

$$\frac{d_i}{DAP_j} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{Ht_j} \right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h_i}{Ht_j} \right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h_i}{Ht_j} \right)^{p_n} + e_i \quad (12)$$

Em que:

d_i = diâmetro do fuste correspondente à altura h_i

h_i = altura do fuste correspondente ao diâmetro d_i

Ht_j = altura total da árvore da classe de diâmetro j

DAP = diâmetro à altura do peito da classe de diâmetro j

$\beta_0 = 1,26295077$

$\beta_1 = -29,09769111$; $p_1 = 0,00001$

$\beta_2 = 30,51501390$; $p_2 = 0,004$

$\beta_3 = 6,46845595$; $p_3 = 0,7$

$\beta_4 = -4,59920810$; $p_4 = 0,3$

$\beta_5 = -4,33666483$; $p_5 = 1$

$\beta_6 = -0,25161442$; $p_6 = 10$

$\beta_7 = 0,04629597$; $p_7 = 40$

O ajuste do modelo aos dados demonstrou um coeficiente de determinação de 99,6% com erro padrão da estimativa percentual de 6,65%. O volume de madeira foi obtido pela integração da função considerando o tronco como um sólido de revolução e, as estimativas, obtidas de uma posição inferior (h_0) até qualquer altura (h_i) do tronco, conforme apresentado a seguir.

$$Vol = \frac{\pi * DAP^2}{40000} * \int_{h_0}^{h_1} (d_i)^2 \quad (13)$$

Em que:

Vol = volume de madeira entre as alturas h_0 e h_1

DAP = diâmetro altura do peito da classe de diâmetro

d_i = diâmetro à altura h_i no fuste

π = 3,14159

h_0 = altura inicial no fuste onde se deseja calcular o volume

h_i = altura final no fuste onde se deseja calcular o volume

2.2.8 Forma de Inclusão das Variáveis Ambientais no Modelo Biométrico

A altura das árvores dominantes de um povoamento florestal representa, no conceito biométrico, a melhor expressão da capacidade do sítio. Sua modelagem, tradicionalmente, ocorre através do relacionamento desta variável com a idade e, diversas classes de sítio são arbitradas gerando famílias de curvas relativas à curva média ajustada aos dados disponíveis. Se variações de produtividade são verificadas em função do ambiente, a incorporação das variáveis ambientais no modelo de altura dominante, preserva o conceito biométrico mencionado. Partindo desse princípio, a inclusão das variáveis ambientais somente no modelo de altura dominante foi mérito do presente trabalho. Como a altura dominante interfere em todo o procedimento de inferência posterior, o restante do sistema de prognose de produção manteve-se inalterado e com isto, a influência das variáveis ambientais para inferência da área basal e do volume, aconteceu de forma indireta e em cadeia. Assim, procurou-se trabalhar na presente pesquisa, a forma de introdução destas apenas no modelo de altura dominante, verificando posteriormente seu reflexo na estimativa da área basal e finalmente no volume.

As variáveis ambientais foram, então, tratadas como modificadores dos coeficientes da função de Richards, conforme descritos nos próximos itens.

2.2.8.1 Modelo para Estimativa do Incremento Anual em altura dominante

O incremento em altura dominante no modelo de Richards está relacionado ao coeficiente “*incl*” da equação pois este é responsável pela inclinação da curva de produção. Com base nesse princípio, um modificador do coeficiente de inclinação foi desenvolvido a partir de uma composição linear das variáveis ambientais, seguindo a seguinte formulação:

$$Modi_{incl} = d_1 \cdot varamb_1 + d_2 \cdot varamb_2 + \dots \quad (14)$$

E sua inclusão no modelo obedeceu a seguinte forma:

$$Hd_2 = A \left(\frac{Hd_1}{A} \right)^{\frac{\ln(1 - e^{incl \cdot (MODI_{incl} \cdot Id_2)})}{\ln(1 - e^{incl \cdot (MODI_{incl} \cdot Id_1)})}} \quad (15)$$

Em que:

Id_1 e Id_2 = idades inicial e final da projeção em anos

A , $incl$ = coeficientes da função de Richards

$Modi_{incl}$ = fator modificador do coeficiente de inclinação

$varamb_i$ = variáveis ambientais selecionadas

d_1 , d_2 , etc = coeficientes da regressão

Nesse caso, o ajuste foi realizado com base em dados de remedições das parcelas permanentes, ou seja, cada parcela mensurada numa idade inicial Id_1 e, depois, numa idade final Id_2 . As variáveis ambientais consideradas foram baseadas em seus valores mensais dentro do intervalo entre as duas medições tendo como base a estação meteorológica mais próxima à parcela permanente.

2.2.8.2 Modelo para Estimativa do Índice de Sítio

A capacidade produtiva de um sítio está relacionada ao valor assintótico que a função pode alcançar, ou seja, possui estreita ligação com o coeficiente A do modelo de Richards e, um fator modificador desse coeficiente em função das variáveis ambientais, foi desenvolvido tomando a seguinte forma:

$$Modi_A = c_1 \cdot var\ amb_1 + c_2 \cdot var\ amb_2 + \dots \quad (16)$$

E sua inclusão no modelo obedeceu a seguinte forma:

$$Hdom = A \cdot (Modi_A) \cdot (1 - e^{-incl \cdot Id})^{inf} \quad (17)$$

Em que:

$Hdom$ = Altura dominante estimada para a idade Id

Id = idade em anos onde se deseja estimar $Hdom$

$A, incl, inf$ = coeficientes da função de Richards

$Modi_A$ = fator modificador do coeficiente assintótico

$var\ amb_i$ = variáveis ambientais selecionadas

c_1, c_2, \dots = coeficientes da regressão

Para esse ajuste, foram usados dados de parcelas permanentes, porém tratados como valores temporários, ou seja, sem pareamento de remedições. Adicionalmente, a cada observação de altura dominante e idade, relacionou-se uma série de variáveis do ambiente. As variáveis estáticas como granulometria do solo, latitude, longitude e granulometria do solo, foram consideradas diretamente. As variáveis dinâmicas como precipitação, déficit de água, evapotranspiração, entre outras, tiveram suas médias e desvios mensais calculados desde o plantio de cada povoamento até a data da medição considerada e foram, então, pareadas aos dados de altura dominante e idade da parcela.

A curva média tratada originalmente nos procedimentos de classificação de sítio como uma função exclusiva da idade, adquire assim, um comportamento flexível em função também, das condições ambientais históricas do local onde se deseja estimar o índice de sítio. Para mostrar a flexibilidade do modelo proposto, foi adotada uma análise de sensibilidade dos parâmetros para avaliar o comportamento das estimativas em situações extremas das variáveis ambientais, ou seja, para além da amplitude verificada na base de dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MODELO PARA INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS

3.1.1 Modelo com Variáveis Ambientais Geradas pelo Método de Thornthwaite-Mather

As variáveis ambientais para o desenvolvimento da modelagem foram pareadas às variáveis dendrométricas provenientes de 616 remedições de parcelas permanentes de povoamentos clonais de eucalipto em manejo reforma, cobrindo ampla faixa de variação das principais variáveis ambientais e de ritmos de crescimento. Suas estatísticas sumarizadas são apresentadas na Tabela 9.

TABELA 9 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS DA BASE COM 616 PARES DE DADOS PARA DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES DE MODELAGEM (BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE-MATHER)

Variável	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)
Precipitação Mensal (mm)	90,5	52,3	166,6	26,4
Desvio Padrão da Média da Precipitação Mensal (mm)	22,7	12,1	48,8	32,7
Déficit de Água no Solo Mensal (mm)	47,9	18,8	70,9	30,2
Desvio Padrão da Média do Déficit Mensal (mm)	5,6	1,7	11,8	31,2
Excedente Hídrico Mensal (mm)	24,8	0,0	72,2	65,7
Desvio Padrão da Média do Excedente Mensal (mm)	13,3	0,0	39,6	57,6
Evapotranspiração Potencial Mensal (mm)	99,8	76,6	113,7	8,7
Desvio Padrão da Média da ETp (mm)	8,1	5,2	14,4	18,5
Evapotranspiração Real Mensal (mm)	51,8	31,3	79,2	20,0
Desvio Padrão da Média da ETr (mm)	8,5	5,3	12,0	16,5
Déficit de Pressão de Vapor (kPa)	0,39	0,18	0,63	24,5
Desvio Padrão da Média do DPV (kPa)	0,02	0,01	0,08	46,7
Temperatura Média (°C)	23,5	20,7	24,6	3,1
Temperatura Máxima (°C)	28,0	25,8	30,9	3,2
Temperatura Mínima (°C)	20,4	17,2	21,6	4,2
Idade Inicial de Medição (anos)	3,8	2,3	7,5	20,6
Idade Final de Medição (anos)	4,8	3,0	8,6	16,6
Altura Dominante na Idade Inicial (m)	18,9	8,7	31,8	17,6
Incremento Anual em Altura Dominante (m)	2,8	0,0	7,9	52,8
Incremento Anual em Área Basal (m ² /ha)	2,5	0,1	7,2	57,7
Incremento Anual em Volume (m ³ /ha)	36,8	2,6	111,1	51,4

A alta variabilidade ambiental é percebida na base de dados. A precipitação mensal variou de 52,3 a 166,6 mm.mês⁻¹, o que significa em termos anuais, precipitação aproximada de 630 a 2.000 mm.ano⁻¹. Da mesma forma, as demais variáveis apontaram para uma base de dados rica em situações ambientais distintas. Do ponto de vista do crescimento florestal, grande variabilidade também foi observada. As idades variaram de 2,3 a 8,6 anos e os incrementos anuais em altura dominante variaram de 0 até 7,9 m. Os menores incrementos sempre estiveram associados a um menor suprimento de água, onde em situações extremas, apresentaram crescimento baixo ou nulo.

3.1.1.1 Relação entre Variáveis Ambientais e de Crescimento

Uma análise inicial da correlação entre as variáveis ambientais com o crescimento florestal, demonstra a dependência entre elas, com claras evidências de que os povoamentos de eucalipto são sensíveis ao fator “disponibilidade de água no sistema”, o que combina com as conclusões de STAPE (2002). As Figuras 5 a 7 exemplificam a relação do incremento anual em altura dominante observado entre a idade de 4 e 5 anos, com três variáveis do ambiente: precipitação mensal, déficit hídrico e evapotranspiração real. Tais tendências são similares para outras faixas de idade.

FIGURA 5 - RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE

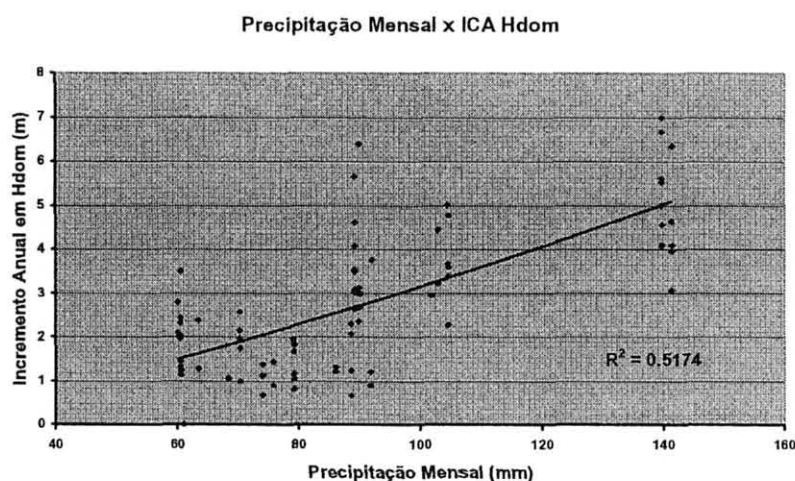


FIGURA 6 - RELAÇÃO ENTRE DÉFICIT HÍDRICO MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE.

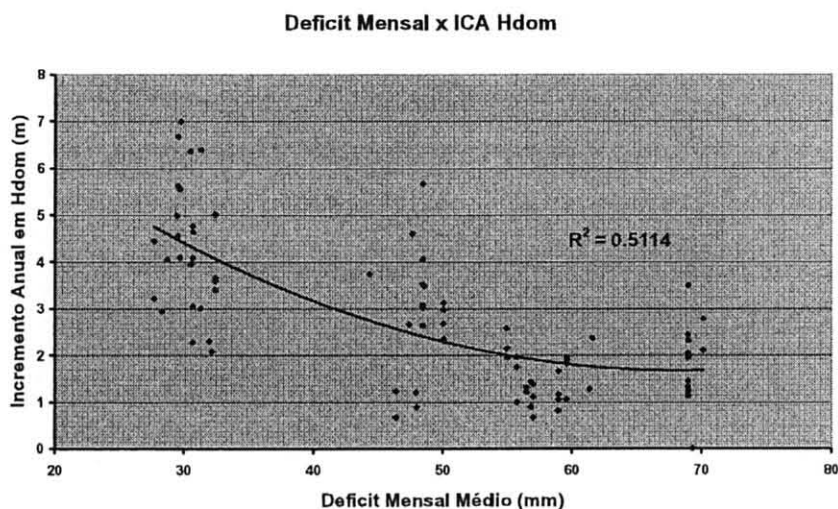
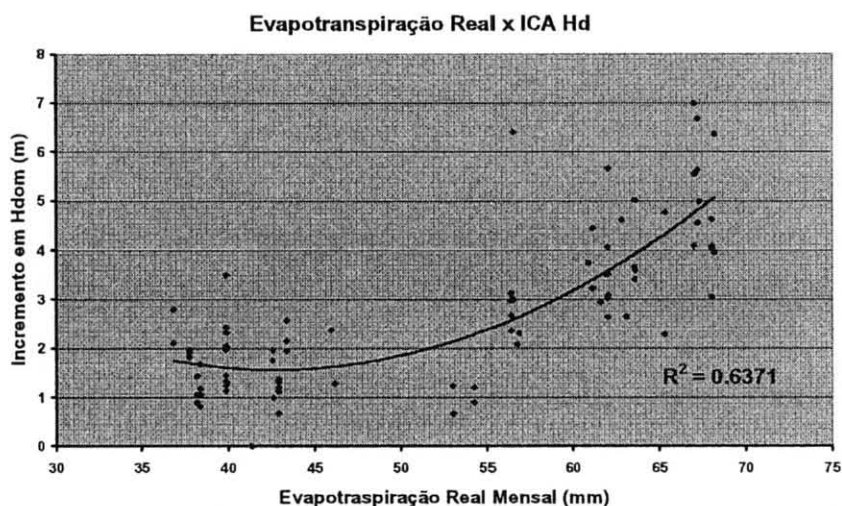


FIGURA 7 - RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE.



Embora as relações apresentem grande dispersão de dados, fica evidente que o crescimento sofre interferência do meio ambiente. Os valores de incremento anual, nos exemplos das Figuras 5 a 7, vão de 0 até 7 metros de altura dominante demonstrando relação com a disponibilidade de água. A Tabela 10 apresenta a correlação linear simples entre o incremento anual das variáveis do povoamento e as variáveis ambientais dinâmicas envolvidas.

TABELA 10 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE, ÁRVORES POR HECTARE, ÁREA BASAL E VOLUME

Variáveis	INCREMENTO ANUAL			
	em HD	em Arv/ha	em AB	em VOL
Precipitação Média	0,51	0,13	0,74	0,66
Precipitação Média - dpm	0,37	0,08	0,63	0,49
Déficit Hídrico Mensal	-0,36	-0,11	-0,62	-0,60
Déficit Hídrico Mensal - dpm	-0,37	-0,03	-0,26	-0,38
Excedente Hídrico	0,49	0,13	0,72	0,60
Excedente Hídrico - dpm	0,45	0,12	0,67	0,56
Evapotranspiração Potencial	-0,08	-0,07	-0,36	-0,29
Evapotranspiração Potencial - dpm	-0,27	0,00	-0,42	-0,44
Evapotranspiração Real	0,44	0,10	0,57	0,60
Evapotranspiração Real - dpm	-0,20	-0,13	-0,33	-0,34
Déficit de Pressão do Ar	-0,18	-0,14	-0,34	-0,26
Déficit de Pressão do Ar - dpm	-0,13	-0,05	-0,04	-0,05
Temperatura Média Mensal	-0,19	-0,08	-0,45	-0,40
Temperatura Média Mensal - dpm	-0,23	0,00	-0,57	-0,44
Temperatura Máxima Mensal	-0,34	-0,09	-0,56	-0,51
Temperatura Máxima Mensal - dpm	-0,36	-0,03	-0,52	-0,47
Temperatura Mínima Mensal	-0,15	-0,08	-0,38	-0,35
Temperatura Mínima Mensal - dpm	-0,01	0,03	-0,33	-0,19
Incremento Anual em Hdom	1,00	0,06	0,64	0,80
Incremento Anual em Arv.ha ⁻¹	0,06	1,00	0,16	0,12
Incremento Anual em Área Basal	0,64	0,16	1,00	0,84
Incremento Anual em Volume.ha ⁻¹	0,80	0,12	0,84	1,00

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais entre duas medições

As correlações entre as variáveis ambientais com as variáveis de crescimento mais significativas situam-se na faixa de 50% para incremento em altura dominante, 75% para área basal e 66% para volume por hectare. A mortalidade anual aparentemente não sofre influência da situação ambiental, onde as correlações não são superiores a 14%. Pode-se observar, também, que a mortalidade anual tem baixa relação com o incremento em altura dominante, área basal e volume. LANDSBERG & GOWER (1997) salientam que a variação das condições ambientais ao longo de um período também oferece impacto no crescimento florestal. Tal fato também pode ser observado através das correlações entre o desvio padrão da média de diversas variáveis ambientais com as variáveis de incremento do povoamento. Um exemplo disso diz respeito ao déficit hídrico

mensal, que apresenta uma correlação linear simples de -36% com o incremento em altura, e o desvio padrão da média do déficit mensal, de -37%, ou seja, o nível do déficit hídrico mensal teve a mesma correlação com a variação em altura dominante que a variação do déficit ao longo dos meses entre as duas medições do inventário.

Uma característica das variáveis ambientais é a de apresentarem correlações entre si, conforme salientam alguns autores (LANDSBERG & GOWER (1996), KIMMINS (1997a)). Tal fato deve ser observado quando o interesse é desenvolver modelos tendo variáveis autocorrelacionadas como termos independentes, pois isso pode conferir uma dependência aos erros das estimativas, violando princípios básicos da análise de regressão. A Tabela 11 apresenta as correlações lineares entre algumas das principais variáveis ambientais, onde pode-se perceber essa situação.

TABELA 11 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Variáveis Ambientais	Variáveis ambientais							
	Precip.	Deficit	Exced.	ETp	ETr	DPV	TMED	TMAX
Precipitação Média	1,00	-0,75	0,93	-0,25	0,84	-0,28	-0,38	-0,60
Precipitação Média - dpm	0,87	-0,66	0,85	-0,28	0,69	-0,30	-0,37	-0,50
Déficit Hídrico Mensal	-0,75	1,00	-0,61	0,71	-0,80	0,44	0,76	0,73
Déficit Hídrico Mensal - dpm	-0,32	0,43	-0,27	0,24	-0,40	-0,06	0,46	0,48
Excedente Hídrico	0,93	-0,61	1,00	-0,28	0,61	-0,25	-0,37	-0,62
Excedente Hídrico - dpm	0,91	-0,66	0,94	-0,33	0,65	-0,31	-0,38	-0,59
Evapotranspiração Potencial	-0,25	0,71	-0,28	1,00	-0,15	0,38	0,86	0,71
Evapotranspiração Potencial - dpm	-0,45	0,54	-0,28	0,20	-0,59	0,07	0,51	0,41
Evapotranspiração Real	0,84	-0,80	0,61	-0,15	1,00	-0,29	-0,34	-0,42
Evapotranspiração Real - dpm	-0,38	0,48	-0,30	0,40	-0,34	0,25	0,41	0,44
Déficit de Pressão do Ar	-0,28	0,44	-0,25	0,38	-0,29	1,00	0,34	0,21
Déficit de Pressão do Ar - dpm	0,01	-0,08	-0,14	0,10	0,20	0,19	0,09	0,27
Temperatura Média Mensal	-0,38	0,76	-0,37	0,86	-0,34	0,34	1,00	0,76
Temperatura Média Mensal - dpm	-0,49	0,52	-0,54	0,52	-0,29	0,20	0,43	0,58
Temperatura Máxima Mensal	-0,60	0,73	-0,62	0,71	-0,42	0,21	0,76	1,00
Temperatura Máxima Mensal - dpm	-0,41	0,32	-0,55	0,32	-0,18	0,19	0,26	0,51
Temperatura Mínima Mensal	-0,31	0,69	-0,26	0,75	-0,34	0,40	0,91	0,49
Temperatura Mínima Mensal - dpm	-0,34	0,45	-0,32	0,51	-0,21	0,06	0,41	0,50

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

Diversas variáveis apresentam valores de correlação simples acima de 80% demonstrando que são autocorrelacionadas, como é o caso, por exemplo, entre a precipitação total mensal média e o excedente hídrico, desvio padrão da média do

excedente hídrico, evapotranspiração real e o desvio padrão da média da própria precipitação mensal. O déficit hídrico mensal, por sua vez, apresenta correlação acima de 70% com a precipitação mensal, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, temperatura média mensal e temperatura máxima.

3.1.1.2 Seleção das Variáveis Ambientais por Análise de Componentes Principais

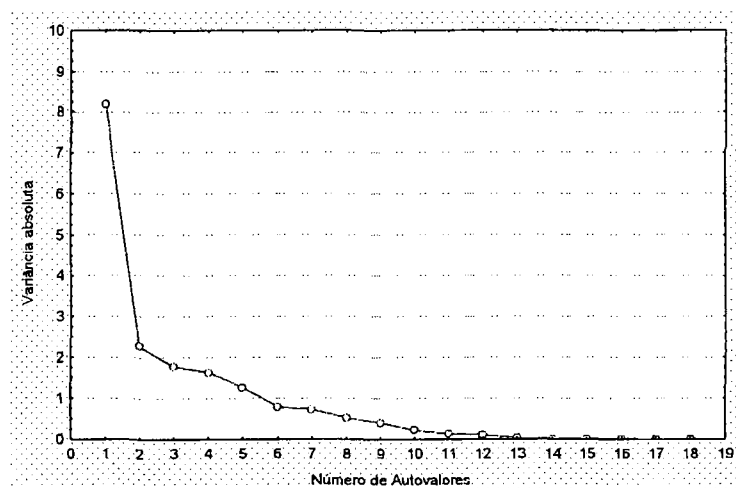
A Análise de Componentes Principais foi utilizada para definir as principais variáveis explicadoras da variação total do sistema e, em função de sua metodologia que procura a ortogonalidade entre as diversas componentes ou autovalores, buscou atenuar os efeitos da multicolinearidade entre variáveis. Partindo da análise de 18 variáveis ambientais, a ACP detectou que 83,9% da variação total estava contida nos cinco primeiros componentes. Tal fato permitiu afirmar que, em havendo mais 13 componentes para explicar os 16,1% da variância restante, evidencia-se a existência de multicolinearidade entre variáveis. A Tabela 12 apresenta as variâncias totais e acumuladas para as primeiras 5 componentes. A Figura 8 apresenta a variância para todas as 18 componentes.

TABELA 12 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DINÂMICAS

Componente Principal	Variância Total	Variância Total %	Variância Acumulada	Variância Acumulada %
1	8,2	45,5	8,2	45,5
2	2,3	12,6	10,5	58,1
3	1,8	9,8	12,2	67,9
4	1,6	9,0	13,8	76,9
5	1,3	7,0	15,1	83,9

Somente a primeira componente explicou 45,5% da variância total do sistema de variáveis ambientais dinâmicas geradas pelo método empírico de Thornthwaite e também pelas medições diretas das estações meteorológicas. A partir da sexta componente, a variância explicada é menor que 1,0.

FIGURA 8 - VARIÂNCIA ABSOLUTA DAS 18 COMPONENTES (AUTOVALORES) DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS DINÂMICAS



O passo seguinte, na busca das variáveis que mais explicam o sistema ambiental e que possuam baixa correlação entre si, baseia-se na análise dos autovetores, os quais definem a importância de cada variável dentro de cada componente. Selecionando-se uma variável de cada uma das primeiras componentes, e essa, sendo a de maior coeficiente absoluto, estará selecionando-se aquelas variáveis que mais explicam a variabilidade total e que menos relação apresentam entre si. Porém, como as componentes possuem importância decrescente na explicação do sistema traduzido por autovalores baixos (normalmente menores que 1,0), então haverá um ponto em que a baixa correlação não mais estará presente. Uma fonte de balizamento importante nessa questão é a matriz de correlação simples entre as variáveis selecionadas, permitindo assim definir com maior critério, quais variáveis deverão ser selecionadas para a modelagem. A Tabela 13 apresenta os autovetores das 5 componentes principais do sistema de variáveis ambientais analisado.

TABELA 13 - AUTOVETORES DAS 5 COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Variáveis ambientais	Componentes Principais				
	1	2	3	4	5
Precipitação Media	-0,85	-0,47	0,12	-0,08	-0,09
Precipitação Media - dpm	-0,80	-0,46	0,01	-0,07	-0,07
Déficit Hídrico Mensal	0,92	-0,14	-0,06	0,20	0,08
Déficit Hídrico Mensal - dpm	0,45	-0,15	-0,63	-0,10	-0,51
Excedente Hídrico	-0,80	-0,47	0,05	0,20	-0,11
Excedente Hídrico - dpm	-0,83	-0,44	0,08	0,07	-0,15
Evapotranspiração Potencial	0,67	-0,62	0,20	-0,17	0,12
Evapotranspiração Potencial - dpm	0,60	-0,06	-0,17	0,37	-0,47
Evapotranspiração Real	-0,72	-0,33	0,25	-0,42	-0,01
Evapotranspiração Real - dpm	0,50	-0,24	-0,07	0,27	0,22
Déficit de Pressão do Ar	0,41	-0,15	-0,07	-0,09	0,72
Déficit de Pressão do Ar - dpm	0,03	-0,09	-0,53	-0,74	0,07
Temperatura Média Mensal	0,76	-0,59	-0,05	0,00	-0,05
Temperatura Média Mensal - dpm	0,68	0,07	0,61	-0,24	-0,18
Temperatura Máxima Mensal	0,83	-0,20	-0,01	-0,28	-0,15
Temperatura Máxima Mensal - dpm	0,52	0,15	0,21	-0,59	-0,17
Temperatura Mínima Mensal	0,64	-0,62	-0,11	0,20	0,13
Temperatura Mínima Mensal - dpm	0,54	-0,04	0,70	0,08	-0,19

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

As variáveis mais significativas para explicar o sistema de variáveis ambientais em ordem crescente do número das componentes (sombreadas), foram:

- 1) Déficit Hídrico Mensal
- 2) Evapotranspiração Pontencial
- 3) Déficit Hídrico Mensal - dpm
- 4) Déficit de Pressão de Vapor do Ar - dpm
- 5) Déficit de Pressão de Vapor do Ar

Parte da explicação do sistema envolve médias mensais das variáveis, como é o caso do déficit hídrico, evapotranspiração potencial e déficit de pressão do ar. Variáveis que expressam a variabilidade ambiental ao longo do intervalo anual complementam a explicação da variância total existente. Uma questão básica importante é que, embora essas variáveis sejam as que mais explicam a

variabilidade do sistema de variáveis ambientais, não necessariamente são as que apresentam as maiores correlações absolutas com a variável florestal de interesse.

Da Tabela 11 pode-se extrair a correlação simples entre essas variáveis, e destas com o incremento em altura dominante, os quais são sintetizados na Tabela 14.

TABELA 14 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Variáveis Ambientais	Déficit Médio	Déficit dpm	ETp Média	DPV Médio	DPV dpm	ICA Hdom
Déficit Hídrico Mensal	1,00	0,43	0,71	0,44	-0,08	-0,36
Déficit Hídrico Mensal - dpm		1,00	0,24	-0,06	0,35	-0,37
Evapotranspiração Potencial			1,00	0,38	0,10	-0,08
Déficit de Pressão do Ar				1,00	0,19	-0,18
Déficit de Pressão do Ar - dpm					1,00	-0,13

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

A correlação entre as variáveis selecionadas pela Análise de Componentes Principais é relativamente baixa, quando comparadas às maiores correlações entre elas apresentadas na Tabela 11 e cujos valores estiveram acima de 90%. Isso significa que a técnica multivariada permitiu selecionar variáveis dentro do conceito de explicação da variabilidade total e com a menor correlação possível entre elas. Somente o déficit hídrico mensal apresenta com a evapotranspiração potencial mensal uma correlação de 71%, porém nesse nível não se espera maiores transtornos com multicolinearidade (GONZÁLES & FORMOSO (2000)).

Partindo das 5 variáveis selecionadas por ACP, foram geradas 3 novas variáveis por transformações do tipo: $\frac{1}{x}$, x^2 e $\ln(x)$, e então, avaliou-se a correlação linear simples com o incremento em altura dominante, conforme apresentado na Tabela 15. Essas transformações objetivaram captar as tendências de relação entre variáveis, conforme exemplificado nas Figuras 5, 6 e 7. Por fim, selecionou-se, para a modelagem, a forma mais correlacionada de cada variável ambiental com o crescimento.

TABELA 15 - CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELA ACP E SUAS TRANSFORMAÇÕES COM O INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE

Variáveis	ICA em Hdom
DEF	-0,36
1/DEF	0,40
DEF ²	-0,33
LNDEF	-0,38
DEF dpm	-0,37
1/DEF dpm	0,33
DEF dpm ²	-0,35
LN DEF dpm	-0,36
ETP	-0,08
1/ETP	0,07
ETP ²	-0,08
LN ETP	-0,07
DPV	-0,18
1/DPV	0,19
DPV ²	-0,18
LN DPV	-0,19
DPV dpm	-0,13
1/DPV dpm	0,20
DPV dpm ²	-0,05
LN DPV dpm	-0,19

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

As variáveis selecionadas para compor o modelo de Richards polimórfico para estimativa do incremento anual em altura dominante, foram:

- 1) Inverso do Déficit Hídrico Mensal
- 2) Evapotranspiração Potencial Mensal
- 3) Déficit Hidrico Mensal - dpm
- 4) Déficit de Pressão de Vapor do Ar - dpm
- 5) Inverso do Déficit de Pressão de Vapor

O coeficiente modificador do coeficiente de inclinação do modelo (14) de Richards resultou na forma apresentada a seguir e, as estatísticas de ajuste, encontram-se na Tabela 16.

$$Modi_{incl} = c1 \cdot \frac{1}{DEF} + c2 \cdot ETP + c3 \cdot DEF_{dpm} + c4 \cdot DPV_{dpm} + c5 \cdot \frac{1}{DPV} \quad (18)$$

TABELA 16 - ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS POR ACP

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	31,64955	
incl	-0,09530	R ² = 83,72%
c1	92,94018	
c2	0,01351	Sxy = 1,23 m
c3	-0,25590	
c4	4,99834	Sxy% = 5,7%
c5	0,15235	

3.1.1.3 Variáveis Ambientais Seleccionadas por Procedimento de Análise de Regressão por Eliminação de Variáveis "Backward"

O procedimento de regressão linear múltipla "backward", onde a variável dependente foi o incremento em altura dominante e os termos independentes foram todas as variáveis ambientais e suas transformações, determinou como variáveis mais significantes:

- 1) Precipitação Mensal Média
- 2) Déficit Hídrico Mensal - dpm
- 3) Inverso do Déficit de Pressão de Vapor do Ar - dpm
- 4) Quadrado do Déficit de Pressão de Vapor do Ar – dpm

Estas variáveis foram, então, incorporadas ao modelo (15) ficando o coeficiente modificador do coeficiente de inclinação do modelo de Richards com a forma apresentada a seguir e as estatísticas de ajuste são apresentadas na Tabela 17.

$$Modi_{incl} = c1.PREC + c2.DEFdpm + c3.\frac{1}{DPVdpm} + c4.DPVdpm^2 \quad (19)$$

TABELA 17 - ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS POR ANÁLISE DE REGRESSÃO “BACKWARD”

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	32,72402	
incl	-0,12366	R ² = 85,58%
c1	0,02810	
c2	-0,19378	Sxy = 1,15 m
c3	0,00666	
c4	12,56056	Sxy% = 5,3%

Houve um ganho em precisão em relação ao modelo com variáveis selecionadas por Análise de Componente Principais de 4,9%, pois o erro padrão da estimativa passou de 1,23m para 1,15m. O coeficiente de determinação, que atesta o quanto da variação do incremento em altura dominante é explicada pelo modelo, passou de 83,7% para 85,6%, confirmando a melhor condição do procedimento corrente em relação a seleção por ACP.

Quando comparado com o modelo de altura dominante sem variáveis ambientais que apresentou um coeficiente de determinação de 77,8% e erro padrão da estimativa de 1,43 m, o ganho em precisão é superior para os dois procedimentos de seleção de variáveis ambientais. Para o modelo com variáveis selecionadas por ACP, o ganho foi de 13,6% e para o modelo com variáveis selecionadas por “backward”, o ganho foi de 19,2 %. Em ambos os casos, ficou atestada a melhoria das estimativas pela inclusão das variáveis ambientais.

3.1.1.4 Variáveis Ambientais Selecionadas em Função de sua Praticidade Operacional

Muitas vezes o primor estatístico pode ceder espaço à praticidade de aplicação operacional de alguma metodologia, tornando-a mais útil e difundida. A possibilidade de propiciar, ao usuário de um determinado procedimento, o poder de

escolha entre uma solução cientificamente mais robusta e outra de maior praticidade, desde que suportada técnica e cientificamente, aumenta em muito seu espectro de uso. Outras vezes no entanto, a solução de maior rigor científico não consegue expressar as respostas esperadas, sugerindo que a abordagem deve ser analisada por outras perspectivas não consideradas anteriormente.

No presente caso de modelos de crescimento com variáveis ambientais, a necessidade de uma estrutura de coleta de dados em base diária e com maior sofisticação, bem como a realização de inúmeros cálculos para se chegar ao balanço hídrico, possibilita um rigor científico maior, porém implica normalmente em soluções menos práticas. Nesse sentido, procurou-se também selecionar variáveis ambientais de fácil obtenção operacional e que não necessitem cálculos exaustivos para se obter informações sobre a questão "água no sistema". Para tal, estabeleceu-se como premissa que a praticidade estaria relacionada ao custo, e assim, foram descartadas as variáveis provenientes de dados obtidos exclusivamente por estações meteorológicas automáticas. A necessidade de cálculos diários implica também em maior quantidade de operações e disponibilidades computacionais e, por isso, foram selecionadas variáveis possíveis de serem obtidas em escala mensal. Foram selecionadas as variáveis: precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial, temperaturas máxima, média e mínima, todas em escala mensal. Também foram selecionadas as variáveis decorrentes delas, como por exemplo, o desvio padrão da média dos valores mensais entre as duas medições de inventário. Foram efetuadas transformações gerando assim, novas variáveis, dadas por: $\frac{1}{x}$, x^2 e $\text{Ln}(x)$. Com a nova base de dados gerada procedeu-se, então, com uma análise de regressão linear múltipla pelo método de "backward" para seleção de variáveis que melhor expliquem o incremento anual em altura dominante. Optou-se por esse procedimento em função dos melhores resultados verificados quando comparados aqueles do modelo com variáveis ambientais selecionadas por ACP. As seguintes variáveis foram indicadas pelo método:

- 1) quadrado da precipitação mensal
- 2) evapotranspiração potencial - dpm
- 3) temperatura máxima - dpm

4) temperatura mínima - dpm

O coeficiente modificador do coeficiente de inclinação do modelo de Richards apresentou a forma a seguir e, as estatísticas de ajuste, encontram-se na Tabela 18.

$$\text{Modi}_{incl} = c1.PREC^2 + c2.ETP \text{ dpm} + c3.TMAX\text{dpm} + c4.TMIN\text{dpm} \quad (20)$$

TABELA 18 - ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS DE FÁCIL OBTENÇÃO, SELECIONADAS POR ANÁLISE DE REGRESSÃO "BACKWARD"

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	33,66258	
incl	-0,17471	$R^2 = 85,31\%$
c1	0,00012	
c2	-0,06874	$S_{xy} = 1,16 \text{ m}$
c3	-0,70546	
c4	1,96201	$S_{xy}\% = 5,4\%$

Com essas variáveis chegou-se praticamente aos mesmos resultados dos procedimentos que incluíram variáveis de obtenção mais trabalhosa, ou seja, provenientes de cálculos do balanço hídrico em escala diária. Tal fato sugere que:

- as variáveis de medição direta pela estação meteorológica, como precipitação, temperaturas e evapotranspiração potencial (que deriva de funções empíricas em função de temperatura, latitude e época do ano), conseguem explicar grande parte da variabilidade do crescimento, sem necessariamente envolver variáveis com maior sentido fisiológico para as plantas, como o déficit hídrico e evapotranspiração real.
- quanto maior a compatibilidade entre as escalas temporais entre as variáveis ambientais e a variável dependente (incremento anual em altura dominante), maior relação será encontrada, independente do sentido da variável, se com maior sentido ecofisiológico ou mais empírico.

3.1.2 Modelo com Variáveis Ambientais Geradas pelo Método de Penman-Monteith

As variáveis ambientais para o desenvolvimento da modelagem foram pareadas às variáveis dendrométricas provenientes de 736 remedições de parcelas permanentes em povoamentos clonais de eucalipto (manejo reforma) cobrindo ampla faixa de variação das principais variáveis ambientais e de ritmos de crescimento. Suas estatísticas sumarizadas são apresentadas na Tabela 19.

TABELA 19 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS DA BASE COM 736 PARES DE DADOS PARA DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES DE MODELAGEM (BALANÇO HÍDRICO PELO MÉTODO PENMAN-MONTEITH)

Variável	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)
Precipitação Mensal (mm)	93,3	47,2	192,1	27,3
Desvio Padrão da Média da Precipitação Mensal (mm)	24,3	10,7	55,0	34,1
Déficit de Água no Solo Mensal (mm)	76,5	23,8	146,9	32,8
Desvio Padrão da Média do Déficit Mensal (mm)	9,6	2,8	18,0	28,4
Excedente Hídrico Mensal (mm)	22,0	0,0	89,8	73,8
Desvio Padrão da Média do Excedente Mensal (mm)	13,2	0,0	36,7	65,0
Evapotranspiração Potencial Mensal (mm)	134,6	45,8	190,2	16,8
Desvio Padrão da Média da ETp (mm)	8,3	3,9	17,3	23,7
Evapotranspiração Real Mensal (mm)	58,1	15,3	91,2	23,1
Desvio Padrão da Média da ETr (mm)	9,5	2,6	14,0	20,0
Radiação Solar (MJ.m ⁻²)	17,0	14,5	19,5	4,9
Desvio Padrão da Média da Radiação Solar (MJ.m ⁻²)	1,0	0,7	1,5	16,5
Déficit de Pressão de Vapor (kPa)	0,4	0,2	0,6	25,7
Desvio Padrão da Média do DPV (kPa)	0,0	0,0	0,1	46,7
Temperatura Média (°C)	23,4	20,7	24,6	2,9
Temperatura Máxima (°C)	28,1	25,8	30,9	3,8
Temperatura Mínima (°C)	20,3	17,2	21,6	4,0
Idade Inicial de Medição (anos)	3,9	2,3	7,5	20,6
Idade Final de Medição (anos)	4,8	3,0	8,6	16,6
Altura Dominante na Idade Inicial (m)	18,9	8,7	31,8	18,1
Incremento Anual em Altura Dominante (m)	2,9	0,0	7,9	52,1
Incremento Anual em Área Basal (m ² /ha)	2,7	0,0	7,2	53,3
Incremento Anual em Volume (m ³ /ha)	39,4	3,2	111,1	48,9

A alta variabilidade ambiental é percebida na base de dados. A precipitação mensal variou de 47 a 192 mm, que em termos anuais representa 500 e 2.300 mm respectivamente. Os incrementos anuais em altura dominante variaram entre 0 e 7,9 m e, para volume, entre 3,2 e 111 m³.ha⁻¹.

3.1.2.1 Relação entre Variáveis Ambientais e de Crescimento

Procedeu-se com uma análise inicial da correlação entre as variáveis ambientais geradas a partir da metodologia de Penman-Monteith para cálculo do Balanço Hídrico com o crescimento florestal e evidenciou-se a sensibilidade dos povoamentos de eucalipto à presença de água no sistema. As Figuras 9 e 10 exemplificam a relação do incremento anual em altura dominante observado entre a idade de 4 e 5 anos, com o déficit hídrico e a evapotranspiração real.

FIGURA 9 - RELAÇÃO ENTRE DÉFICIT HÍDRICO MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE

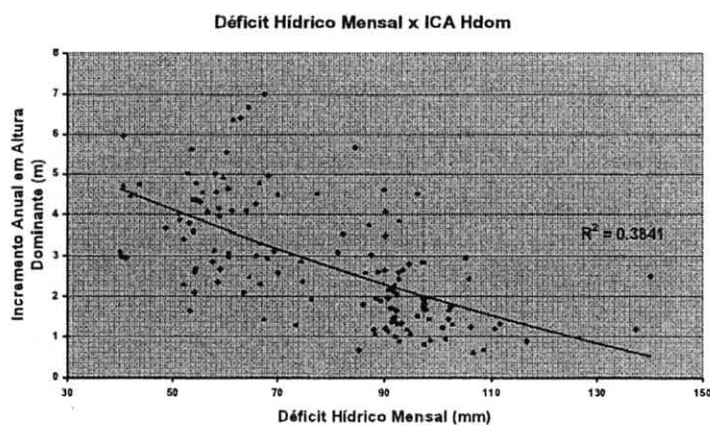
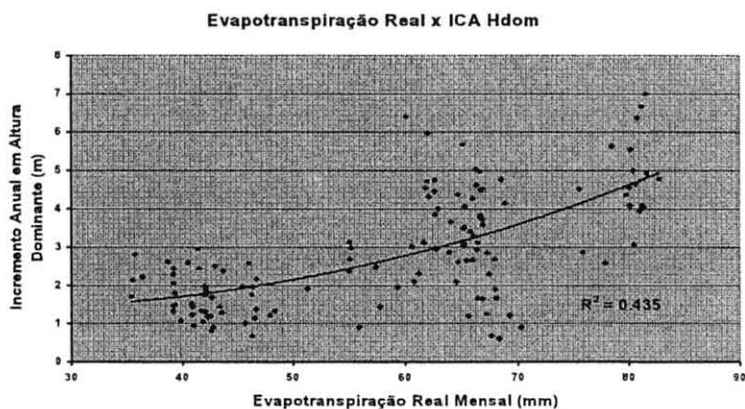


FIGURA 10 -RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MENSAL E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE DE 4 PARA 5 ANOS DE IDADE



Embora as relações registradas nas Figuras 9 e 10 apresentem grande dispersão de dados, fica evidente a interferência do meio ambiente no crescimento dos povoamentos de eucalipto. A Tabela 20 apresenta a correlação linear simples entre as variáveis do povoamento e as variáveis ambientais dinâmicas envolvidas.

TABELA 20 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE, ÁRVORES POR HECTARE, ÁREA BASAL E VOLUME

Variáveis	INCREMENTO ANUAL			
	em Hdom	em Arv/ha	em AB	em Vol/ha
Precipitação Média	0,55	0,17	0,70	0,64
Precipitação Média – dpm	0,39	0,12	0,56	0,47
Déficit Hídrico Mensal	-0,37	-0,20	-0,57	-0,46
Déficit Hídrico Mensal – dpm	-0,19	-0,08	-0,00	-0,06
Excedente Hídrico	0,52	0,17	0,65	0,54
Excedente Hídrico – dpm	0,49	0,17	0,61	0,53
Evapotranspiração Potencial	-0,16	-0,16	-0,33	-0,18
Evapotranspiração Potencial – dpm	-0,21	-0,04	0,01	-0,10
Evapotranspiração Real	0,42	0,11	0,52	0,56
Evapotranspiração Real – dpm	-0,17	-0,12	-0,22	-0,18
Radiação Solar (MJ.m ⁻²)	-0,04	0,05	-0,14	-0,07
Desvio Padrão da Média da Radiação Solar (MJ.m ⁻²)	-0,17	0,06	-0,10	-0,13
Déficit de Pressão do Ar	-0,28	-0,17	-0,42	-0,33
Déficit de Pressão do Ar – dpm	-0,16	-0,05	-0,07	-0,08
Temperatura Média Mensal	-0,26	-0,11	-0,47	-0,42
Temperatura Média Mensal – dpm	-0,24	-0,04	-0,49	-0,39
Temperatura Máxima Mensal	-0,36	-0,14	-0,54	-0,47
Temperatura Máxima Mensal – dpm	-0,40	-0,10	-0,48	-0,50
Temperatura Mínima Mensal	-0,19	-0,08	-0,37	-0,34
Temperatura Mínima Mensal – dpm	-0,02	0,01	-0,25	-0,12
Incremento Anual em Hdom	1,00	0,09	0,68	0,81
Incremento Anual em Arv.ha ⁻¹	0,09	1,00	0,19	0,14
Incremento Anual em Area Basal	0,68	0,19	1,00	0,84
Incremento Anual em Volume.ha ⁻¹	0,81	0,14	0,84	1,00

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais entre duas medições

As correlações entre as variáveis ambientais com as variáveis de crescimento mais significativas situam-se na faixa de 55% para incremento em altura dominante, 70% para área basal e 64% para volume por hectare. A mortalidade anual aparentemente não sofre influência da situação ambiental, onde as correlações não são superiores a 20%. Pode-se observar, também, que a

mortalidade anual tem baixa relação com o incremento em altura dominante, área basal e volume.

A análise de correlação entre as variáveis ambientais é apresentada na Tabela 21 e evidencia a complexidade do sistema, o que se percebe pela existência de relações fortes entre algumas delas, com diversos valores acima de 80%.

TABELA 21 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Variáveis	Precip.	Déficit	Exced.	ETp	ETr	Rad.	DPV	T med	T max	T min
Precipitação Media	1,00	-0,68	0,87	-0,27	0,81	-0,03	-0,43	-0,38	-0,61	-0,22
Prec. Média - dpm	0,84	-0,56	0,78	-0,24	0,64	-0,12	-0,45	-0,33	-0,53	-0,13
Déficit Hídrico	-0,68	1,00	-0,69	0,85	-0,45	0,29	0,78	0,54	0,39	0,57
Déficit Hídrico dpm	0,04	0,24	-0,15	0,41	0,23	0,13	0,23	0,10	0,01	0,17
Exc. Hídrico	0,87	-0,69	1,00	-0,51	0,43	-0,06	-0,48	-0,29	-0,51	-0,15
Exc. Hídrico dpm	0,85	-0,63	0,91	-0,40	0,51	-0,01	-0,51	-0,30	-0,53	-0,13
Evapot. Potencial	-0,27	0,85	-0,51	1,00	0,10	0,33	0,75	0,38	0,10	0,49
ET. Potencial dpm	0,16	-0,05	0,07	0,04	0,17	0,24	0,05	0,06	-0,01	0,03
ET. Real	0,81	-0,45	0,43	0,10	1,00	0,01	-0,20	-0,36	-0,55	-0,23
ET Real dpm	-0,14	0,44	-0,27	0,54	0,10	-0,19	0,49	0,07	0,02	0,23
Radiação (MJ.m ⁻²)	-0,03	0,29	-0,06	0,33	0,01	1,00	0,20	0,45	0,09	0,44
Radiação dpm	0,09	0,12	0,01	0,20	0,10	0,62	0,09	0,35	0,06	0,31
Déficit Pressão	-0,43	0,78	-0,48	0,75	-0,20	0,20	1,00	0,36	0,30	0,33
Déf. Pressão dpm	-0,03	0,13	-0,15	0,21	0,13	0,37	0,21	0,16	0,22	0,01
Temp. Média	-0,38	0,54	-0,29	0,38	-0,36	0,45	0,36	1,00	0,69	0,84
Temp. Média dpm	-0,42	0,23	-0,38	0,04	-0,36	-0,03	0,21	0,41	0,61	0,11
Temp. Máxima	-0,61	0,39	-0,51	0,10	-0,55	0,09	0,30	0,69	1,00	0,26
Temp. Máxima dpm	-0,39	0,30	-0,47	0,18	-0,26	-0,05	0,23	0,33	0,57	0,11
Temp. Mínima	-0,22	0,57	-0,15	0,49	-0,23	0,44	0,33	0,84	0,26	1,00
Temp. Mínima dpm	-0,28	0,00	-0,17	-0,16	-0,28	0,01	0,06	0,31	0,51	-0,03

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

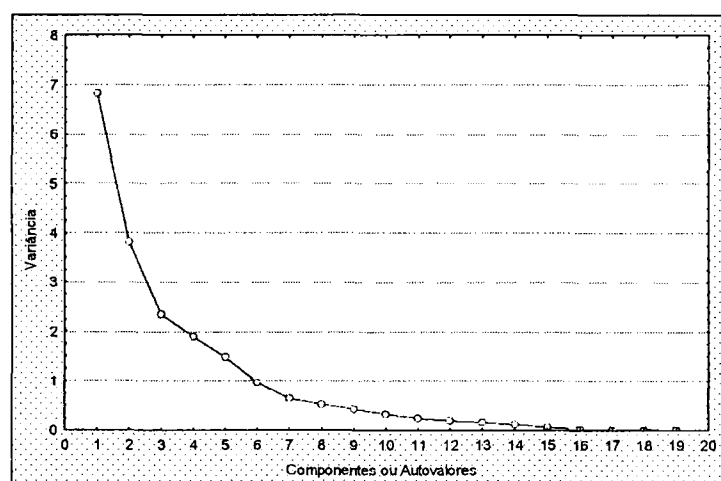
3.1.2.2 Seleção das Variáveis Ambientais por Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais foi utilizada e permitiu definir as principais variáveis explicadoras da variação total do sistema. Partindo da análise das 20 variáveis ambientais geradas diretamente ou então utilizadas pelo método Penman-Monteith para cálculo da evapotranspiração, a análise de componentes principais detectou que nas cinco primeiras componentes, 81,75% da variação total estava contida (Tabela 22). A Figura 11 apresenta a variância para todas as 20 componentes.

TABELA 22 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Componente Principal	Variância Total	Variância %	Variância Acumulada	Var. Acum %
1	6,83	34,16	6,83	34,16
2	3,81	19,06	10,64	53,22
3	2,34	11,70	12,99	64,93
4	1,89	9,45	14,87	74,37
5	1,48	7,38	16,35	81,75

FIGURA 11 - VARIÂNCIA ABSOLUTA DAS 20 COMPONENTES (AUTOVALORES) DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS



A análise dos autovetores, os quais definem a importância de cada variável dentro de cada componente, permitiu selecionar as variáveis ambientais de cada uma das primeiras componentes. A Tabela 23 apresenta os autovetores das 5 componentes principais do sistema de variáveis ambientais analisado.

TABELA 23 - AUTOVETORES DAS 5 COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Variáveis	Autovetor				
	1	2	3	4	5
Precipitação Media	-0,93	0,08	-0,20	-0,09	-0,08
Prec. Média - dpm	-0,92	0,08	-0,17	-0,11	0,04
Déficit Hídrico	0,62	0,01	0,00	0,45	0,58
Déficit Hídrico dpm	-0,01	0,75	-0,19	-0,01	0,48
Exc. Hídrico	-0,86	-0,09	-0,15	0,00	-0,30
Exc. Hídrico dpm	-0,91	-0,05	-0,16	0,02	-0,21
Evapot. Potencial	0,27	0,12	-0,13	0,40	0,78
ET. Potencial dpm	-0,15	0,86	0,06	0,01	0,02
ET. Real	-0,71	0,19	-0,22	-0,17	0,22
ET Real dpm	0,00	0,04	0,10	-0,12	0,90
Radiação (MJ.m ⁻²)	0,05	0,32	-0,15	0,78	-0,15
Radiação dpm	-0,09	0,74	0,08	0,48	-0,09
Déficit Pressão	0,44	0,06	0,04	0,28	0,64
Déf.. Pressão dpm	0,12	0,83	-0,08	0,11	0,01
Temp. Média	0,22	0,06	0,41	0,80	0,13
Temp. Média dpm	0,24	-0,07	0,92	0,07	0,03
Temp. Máxima	0,51	0,10	0,64	0,25	-0,03
Temp. Máxima dpm	0,30	0,42	0,70	-0,07	0,18
Temp. Mínima	0,05	-0,03	0,08	0,83	0,32
Temp. Mínima dpm	0,14	-0,39	0,74	0,11	-0,20

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

As variáveis mais significativas para explicar o sistema de variáveis ambientais em ordem crescente do número das componentes (sombreadas), foram:

- 1) Precipitação Mensal
- 2) Evapotranspiração Potencial - dpm
- 3) Temperatuta Média - dpm
- 4) Temperatura Mínima
- 5) Evapotranspiração Real - dpm

Da Tabela 21 pode-se extrair a correlação simples entre essas variáveis, e destas com o incremento em altura dominante, os quais são sintetizados na Tabela 24.

TABELA 24 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Variáveis	Precipitação	ETp dpm	ETr dpm	T med dpm	T min
Precipitação	1,00	0,16	-0,14	-0,42	-0,22
ETp dpm		1,00	0,07	-0,04	0,03
ETr dpm				0,08	0,23
T med dpm				1,00	0,11
T min					1,00

As correlações entre as variáveis selecionadas na Análise de Componentes Principais são baixas, não ultrapassando a 42%, o que reforça a validade do procedimento adotado. Partindo das 5 variáveis selecionadas por ACP, foram geradas 3 novas variáveis por transformações do tipo: $\frac{1}{x}$, x^2 e $\text{LN}(x)$, e então, avaliou-se a correlação linear simples com o incremento em altura dominante, conforme apresentado na Tabela 25.

TABELA 25 - CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELA ACP E SUAS TRANSFORMAÇÕES COM O INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE

Variáveis	ICA em Hdom
PREC	0,55
PREC ²	0,55
PREC ⁻¹	-0,51
LN(PREC)	0,54
ETP dpm	-0,21
ETP dpm ²	-0,20
ETP dpm ⁻¹	0,21
LN(ETP dpm)	-0,22
Tmed dpm	-0,24
Tmed dpm ²	-0,25
Tmed dpm ⁻¹	0,22
LN(Tmed dpm)	-0,23
Tmin	-0,19
TMIN ²	-0,19
T min ⁻¹	0,19
LN(Tmin)	-0,19
ETR dpm	-0,17
ETR dpm ²	-0,14
ETR dpm ⁻¹	0,17
LN(ETR dpm)	-0,18

As variáveis selecionadas para compor o modelo de Richards polimórfico, a partir da transformação das variáveis selecionadas por ACP mais correlacionadas com o incremento anual em altura dominante, foram:

- 1) Precipitação Mensal
- 2) Evapotranspiração Potencial Mensal - dpm
- 3) Quadrado da Temperatura Média - dpm
- 4) Temperatura Mínima
- 5) Logaritmo Natural da Evapotranspiração Real – dpm

O coeficiente modificador do coeficiente de inclinação da equação (15) de Richards resultou na forma apresentada a seguir e, as estatísticas de ajuste, encontram-se na Tabela 26.

$$\text{Modi}_{incl} = c_1.PREC + c_2.ETPdpm + c_3.TMEDdpm^2 + c_4.TMIN + c_5.Ln(ETr\ dpm) \quad (21)$$

TABELA 26 - ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS POR ACP

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	36,29026	
Incl	-0,02291	$R^2 = 87,30\%$
c1	0,17793	
c2	-0,66885	$S_{xy} = 1,12\ m$
c3	6,34975	
c4	-0,20383	$S_{xy}\% = 5,2\%$
c5	-0,30596	

3.1.2.3 Variáveis Ambientais Selecionadas por Procedimento de Análise de Regressão por Eliminação de Variáveis "Backward"

O procedimento de regressão linear múltipla, onde a variável independente foi o incremento em altura dominante e os termos independentes foram todas as

variáveis ambientais e suas transformações, determinou como variáveis mais significativas:

- 1) Precipitação Mensal Média
- 2) Logaritmo Natural da Precipitação Mensal Média
- 3) Inverso da Evapotranspiração Potencial - dpm
- 4) Inverso da Radiação Solar - dpm
- 5) Quadrado do Déficit de Pressão de Vapor do Ar - dpm
- 6) Inverso do Déficit de Pressão de Vapor do Ar - dpm

Procedeu-se com a análise de correlação linear entre essas variáveis e, os resultados, são apresentados na Tabela 27.

TABELA 27 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR "BACKWARD"

Variáveis	Precip.	LN(Prec)	1/ETPdpm	1/RADdpm	DPVdpm ²	1/DPVdpm	ICA Hd
Precip.	1,00	0,99	-0,17	-0,07	-0,04	-0,02	0,55
LN(Prec)		1,00	-0,18	-0,06	-0,01	-0,06	0,54
1/ETPdpm			1,00	0,54	-0,43	0,64	0,21
1/RADdpm				1,00	-0,44	0,37	0,19
DPVdpm ²					1,00	-0,70	-0,09
1/DPVdpm						1,00	0,23

Com exceção da alta correlação entre as variáveis precipitação e LN(precipitação), as demais apresentam correlações intermediárias à baixas. Resolveu-se não incorporar a variável LN(precipitação) na modelagem da altura dominante com o modelo de Richards, em função da correlação de 99% com a variável precipitação mensal e, também, optou-se por não incluir a variável $DPVdpm^2$ por apresentar baixa correlação (-9%) com o incremento em altura dominante. O modelo final do coeficiente modificador do coeficiente de inclinação da equação (15) de Richards é apresentado a seguir e as estatísticas de ajuste encontram-se na Tabela 28.

$$Modi_{incl} = c1.PREC + c2.\frac{1}{ETPdpm} + c3.\frac{1}{RADdpm} + c4.\frac{1}{DPVdpm} \quad (22)$$

TABELA 28 - ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR "BACKWARD"

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	33,58921	
incl	-0,05464	R ² = 85,21%
c1	0,06404	
c2	6,38224	Sxy = 1,21 m
c3	-2,73636	
c4	0,00783	Sxy% = 5,6%

Percebe-se que os modelos sofreram melhora significativa pela incorporação das variáveis ambientais, independente da metodologia de seleção destas. Contudo, a seleção de variáveis baseada no procedimento de Análise de Componentes Principais (item anterior) foi superior a seleção por regressão linear múltipla pelo método de "backward", traduzida pelo erro padrão da estimativa de 1,12 m contra 1,21 m.

3.1.2.4 Variáveis Ambientais Diretamente Ligadas ao Método de Penman-Monteith para Estimativa da Evapotranspiração

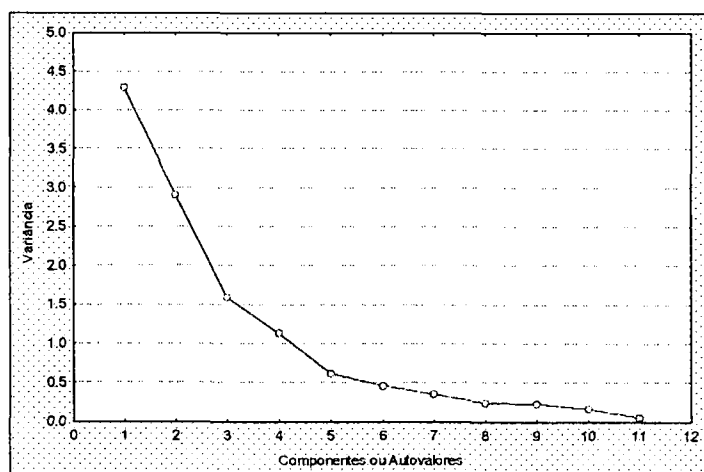
Incluíram-se nessa análise, somente as variáveis originadas pelo processamento dos cálculos pelo método de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração, pelas variáveis utilizadas diretamente na sua formulação e por seu respectivo balanço hídrico. Com isso, por exemplo, variáveis como precipitação mensal e temperaturas não foram consideradas na análise. Permaneceram no procedimento de seleção as seguintes variáveis: déficit hídrico, excedente hídrico, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, radiação solar e déficit de pressão de vapor. Para estas, foram consideradas as médias mensais e o desvio padrão da média dos valores mensais entre duas medições da parcela de inventário (que gerou a variável dependente: incremento anual em altura dominante). Para

seleção das variáveis optou-se pela Análise de Componentes Principais, pois foi a que conferiu melhor redução do erro das estimativas para os modelos com variáveis ambientais originadas pelo método de Penman-Monteith. A ACP das 12 variáveis ambientais demonstrou que existem 4 componentes principais que explicam 82,6% da variação total conforme apresentado na Tabela 29 e na Figura 12.

TABELA 29 - RESULTADO DAS 4 PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS DO CONJUNTO DE VARIÁVEIS ORIGINADAS PELO MÉTODO PENMAN-MONTEITH PARA CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO

Componente Principal	Variância Total	Variância %	Variância Acumulada	Var. Acum %
1	4,29	35,78	4,29	35,78
2	2,90	24,17	7,19	59,95
3	1,59	13,25	8,78	73,20
4	1,13	9,40	9,91	82,60

FIGURA 12 - VARIÂNCIA ABSOLUTA DAS 12 COMPONENTES (AUTOVALORES) DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS



Os coeficientes dos autovetores que identificam as principais variáveis dentro de cada componente (autovalor) são apresentados na Tabela 30.

TABELA 30 - AUTOVETORES DAS 4 COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Variáveis	Autovetor			
	1	2	3	4
Deficit	-0,54	-0,02	0,77	0,20
Deficit dpm	0,05	0,84	0,37	-0,11
Excedente	0,82	-0,07	-0,40	0,05
Exced. dpm	0,87	-0,04	-0,32	0,07
Etp	-0,12	0,11	0,94	0,19
ETp dpm	0,07	0,87	-0,08	0,15
Etr	0,82	0,21	0,14	-0,06
ETr dpm	0,04	0,22	0,73	-0,49
Radiação	0,02	0,14	0,20	0,91
Rad. dpm	0,04	0,61	0,03	0,65
DPV	-0,33	0,06	0,79	0,11
DPV dpm	-0,10	0,78	0,06	0,29

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

As variáveis mais significativas para explicar o sistema de variáveis ambientais em ordem crescente do número das componentes (sombreadas), foram:

- 1) Excedente Hídrico - dpm
- 2) Evapotranspiração Potencial - dpm
- 3) Evapotranspiração Potencial
- 4) Radiação Solar

Partindo das 4 variáveis selecionadas por ACP, foram geradas 3 novas variáveis por transformações do tipo: $\frac{1}{x}$, x^2 e $\ln(x)$, e então, avaliou-se a correlação linear simples com o incremento em altura dominante, conforme apresentado na Tabela 31. Por fim, selecionou-se, para a modelagem, a forma mais correlacionada de cada variável ambiental com o crescimento.

TABELA 31 - CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PELA ACP E SUAS TRANSFORMAÇÕES COM O INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE

Variáveis	ICA em Hdom
EXCdpm	0,48
EXCdpm ²	0,43
EXCdpm ⁻¹	-0,10
LN(EXCdpm)	0,44
ETPdpm	-0,19
ETPdpm ²	-0,17
ETPdpm ⁻¹	0,20
LN(ETPdpm)	-0,20
ETP	-0,15
ETP ²	-0,14
ETP ⁻¹	0,15
LN(ETP)	-0,15
RAD	-0,05
RAD ²	-0,05
RAD ⁻¹	0,05
LN(RAD)	-0,05

dpm - desvio padrão da média dos valores mensais

As variáveis selecionadas para compor o modelo de Richards polimórfico para estimativa do incremento anual em altura dominante, foram:

- 1) Excedente Hídrico - dpm
- 2) Inverso da Evapotranspiração Pontencial - dpm
- 3) Evapotranspiração Pontencial
- 4) Radiação Solar

O modelo do coeficiente modificador do coeficiente de inclinação da equação (15) de Richards, resultou na forma apresentada a seguir e, as estatísticas de ajuste, encontram-se na Tabela 32.

$$MODI_{incl} = c_1 \cdot EXCdpm + c_2 \cdot \frac{1}{ETPdpm} + c_3 \cdot ETP + c_4 \cdot RAD \quad (23)$$

TABELA 32 - ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS RELACIONADAS AO MÉTODO PENMAN-MONTEITH SELECIONADAS POR ACP

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	35,67541	
incl	-0,09483	$R^2 = 84,53\%$
c1	0,12418	
c2	8,83004	$S_{xy} = 1,23 \text{ m}$
c3	0,00824	
c4	-0,11057	$S_{xy}\% = 5,7\%$

3.1.3 Validação dos Modelos

Duas bases de dados independentes separadas previamente permitiram validar os modelos desenvolvidos. Os dados, distribuídos nas diversas regiões geográficas do estudo, representam a variabilidade de situações climáticas, de idades dos povoamentos e das capacidades produtivas existentes. As variáveis ambientais foram geradas pelos mesmos procedimentos já descritos, bem como, seu pareamento com as medições das parcelas permanentes. Os modelos gerados pela inclusão de variáveis ambientais geradas pelo método empírico de estimativa da evapotranspiração – Thornthwaite-Mather, foram validados contra 213 dados pareados. Já os modelos com variáveis geradas pelo método combinado – Penman-Monteith, foram validados contra 168 registros independentes. Um sumário das estatísticas descritivas das duas bases de dados é apresentado na Tabela 33. Ao final da mesma tabela são apresentadas algumas estatísticas ambientais com o intuito de caracterizar o ambiente da base de dados de validação.

TABELA 33 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS BASES DE DADOS DE VALIDAÇÃO

Povoamento	Thornthwaite-Mather			Penman-Monteith		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Idade Inicial - Id ₁	3,7	2,6	7,0	3,6	2,6	5,8
Idade Final - Id ₂	4,7	3,6	8,0	4,6	3,3	6,9
Hdom - Id ₁	18,6	11,4	28,7	18,4	9,9	26,3
Hdom - Id ₂	21,4	14,2	30,5	21,1	14,5	30,1
ICA em Hdom	2,8	0,0	7,1	2,7	0,0	7,9
Arv/ha - Id ₁	1033	526	1228	1034	807	1310
Arv/ha - Id ₂	1027	515	1228	1031	807	1310
Area Basal - Id ₁	12,3	4,4	20,2	12,0	3,3	20,5
Area Basal - Id ₂	14,9	7,4	22,7	14,2	7,5	23,1
Volume/ha - Id ₁	91,7	12,5	235,4	86,1	8,2	200,0
Volume/ha - Id ₂	129,2	33,7	279,9	119,5	37,1	234,9
Índice de Sítio (5 anos)	22,4	17,7	30,4	22,2	15,2	29,8

Ambiente	Thornthwaite-Mather			Penman-Monteith		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Precipitação Anual	1014	566	1722	1019	660	1465
Temp. Média Anual	23,5	22,4	24,6	23,7	22,4	24,5
Temp. Máxima Anual	28,9	26,6	30,9	28,5	27,0	29,8
Temp. Mínima Anual	20,0	18,5	21,3	20,4	18,6	21,6
Latitude (em escala decimal)	-19,07	-19,82	-17,42	-18,82	-19,82	-17,74

A variação da precipitação anual demonstra grande amplitude nos dois bancos de dados com anos de pluviosidade abaixo de 600 mm e acima de 1.200 mm, conforme os histogramas de frequência apresentados nas Figuras 13 e 14. A variação do incremento anual em altura dominante também cobriu toda a base de dados existente, de zero a 8 metros, o que permitiu testar os modelos para inferência desta que é a principal variável dependente do sistema. Como exemplificação disso, a Figura 15 apresenta a distribuição do incremento anual em altura dominante da base de dados - Thornthwaite.

FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL DA BASE DE DADOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS CALCULADAS PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE-MATHER

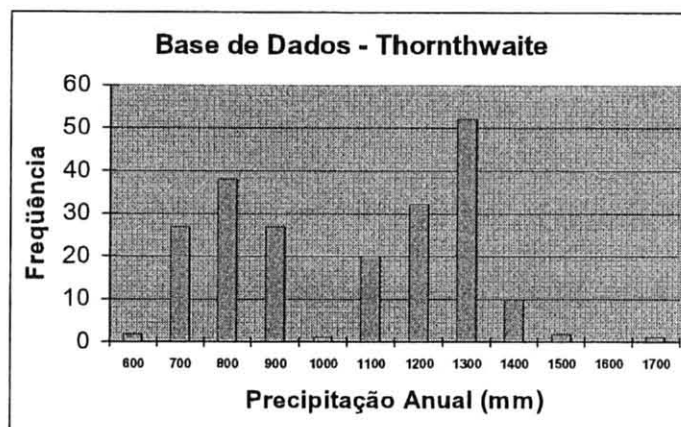


FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL DA BASE DE DADOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS CALCULADAS PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

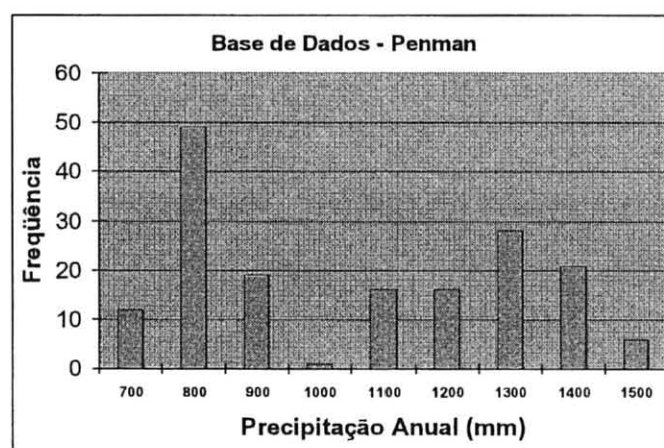
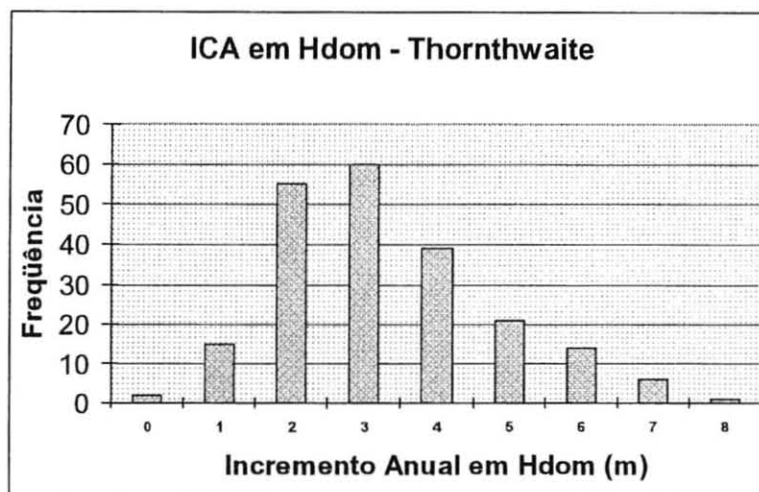


FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DO INCREMENTO ANUAL DA BASE DE DADOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS CALCULADAS PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE-MATHER



3.1.3.1 Modelos para Estimativa do Incremento em Altura Dominante

Os modelos desenvolvidos podem ser divididos em duas categorias quanto a formulação para cálculo da evapotranspiração, e dentro destas, pela forma de seleção das variáveis ambientais:

- Modelos com variáveis ambientais relacionadas ao método Thornthwaite-Mather:
 - o modelo 1 - seleção de variáveis por Análise de Componentes Principais;
 - o modelo 2 - seleção de variáveis por Análise de Regressão "backward";
 - o modelo 3 - seleção das variáveis com maior facilidade de obtenção operacional, usando Análise de Regressão "backward";
- Modelos com variáveis ambientais relacionadas ao método Penman-Monteith:
 - o modelo1 - seleção de variáveis por Análise de Componentes Principais;
 - o modelo 2 - seleção de variáveis por Análise de Regressão "backward";
 - o modelo 3 - seleção de variáveis ligadas diretamente ao método Penman-Monteith usando Análise de Componentes Principais.

As estimativas de altura dominante geradas por esses modelos foram comparadas àquelas produzidas pelo modelo sem variáveis ambientais, descrito na

metodologia. A partir dos desvios quadráticos entre as estimativas e os valores mensurados, foram calculados os erros padrão da estimativa. A redução obtida nessa medida de dispersão, foi considerada como ganho em precisão, conforme apresentado na Tabela 34. Os resíduos entre os valores observados e os estimados permitiram avaliar o efeito da inclusão das variáveis ambientais no modelo de Richards.

TABELA 34 - ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM ALTURA DOMINANTE GERADO PELOS MODELOS CONTRA OS DADOS INDEPENDENTES

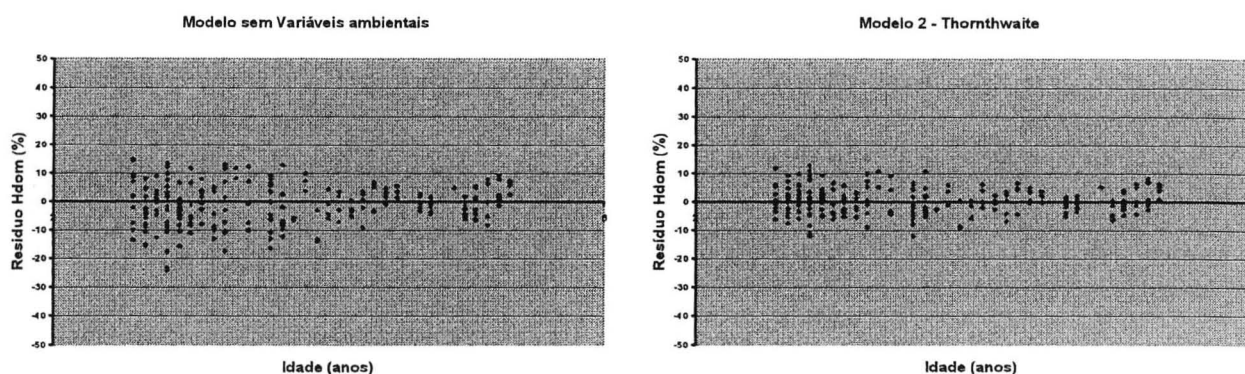
Variável	Thorthwaite-Mather				Penman-Monteith			
	s/ v.amb	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	s/ v.amb	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Hdom (m)	1,46	1,12	1,02	1,02	1,41	1,13	1,19	1,27
Ganho (%)	-	23,5	30,4	30,1	-	20,1	15,8	10,2

A redução no erro padrão da estimativa pela incorporação de variáveis do ambiente no modelo de altura dominante chega a alcançar 30,4%, o que qualifica a metodologia desenvolvida. Avaliando-se os ganhos em função da metodologia de geração das variáveis ambientais, percebe-se que o método empírico de estimativa da evapotranspiração foi superior ao método de Penman-Monteith.

Um resultado importante do ponto de vista de aplicação prática foi o ganho gerado pelo modelo 3 - Thornthwaite, que obteve a segunda maior redução do erro padrão da estimativa, ressaltando a validade técnica e operacional do método.

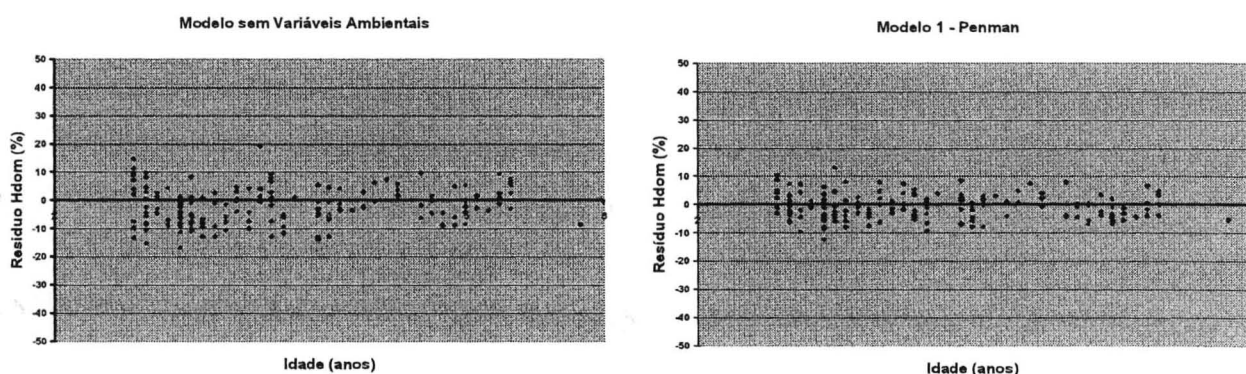
Os gráficos dos resíduos relativos $[(\text{real-estimado})/\text{real}.100]$ das estimativas demonstram, também, o melhor comportamento das estimativas dos modelos com variáveis ambientais quando comparados com os resíduos gerados pelo modelo sem variáveis ambientais, conforme apresentados pela Figura 16 para Thornthwaite (modelo 2) e Figura 17 para Penman (modelo 1).

FIGURA 16 - RESÍDUOS RELATIVOS EM ALTURA DOMINANTE DO MODELO SEM VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO MODELO 2 - THORNTWHAITE



Percebe-se uma redução visual da dispersão dos resíduos das estimativas de altura dominante feitas pelo modelo 2 - Thornthwaite.

FIGURA 17 - RESÍDUOS RELATIVOS EM ALTURA DOMINANTE DO MODELO SEM VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO MODELO 1 - PENMAN



Além de uma maior concentração dos resíduos em valores próximos a zero, houve melhora na tendência de dispersão dos dados com a inclusão das variáveis ambientais calculadas pelo método de Penman-Monteith.

3.1.3.2 Validação Integrada do Sistema de Crescimento e Produção

O sistema de crescimento formado pelos modelos de sobrevivência, área basal, variância de diâmetros, relação hipsométrica genérica e funções de volume e

afilamento do tronco, bem como, a recuperação dos parâmetros da função Weibul, foram avaliados para cada uma das opções de inclusão de variáveis ambientais no modelo de altura dominante. Em cada situação avaliada, somente o modelo de altura dominante foi alterado pelas variáveis do ambiente. Os demais modelos de prognose foram, então, influenciados indiretamente uma vez que utilizam como variável independente, a estimativa da altura dominante.

Os desvios quadráticos e o erro padrão da estimativa foram calculados para área basal e volume por hectare e comparados com o erro padrão da estimativa gerado pelo sistema sem variáveis ambientais. A Tabela 35 apresenta o resultado da comparação para área basal e volume por hectare.

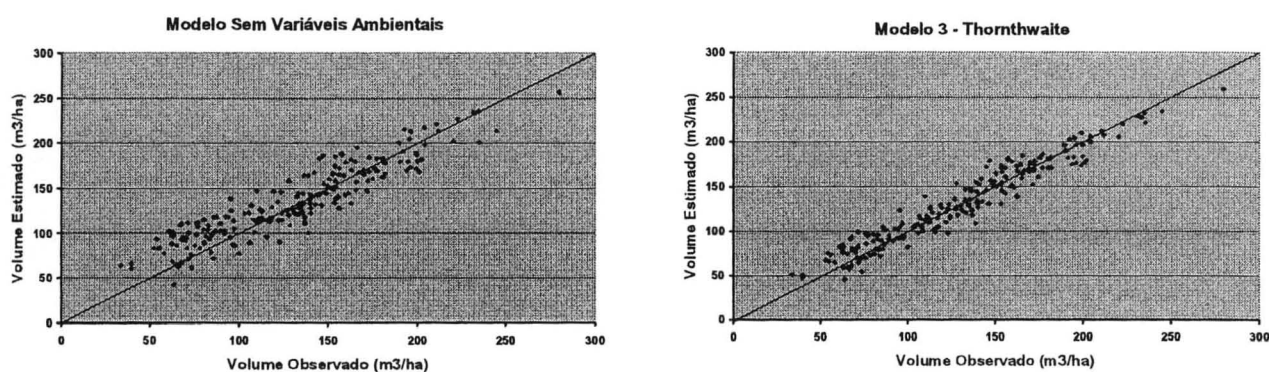
TABELA 35 - ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM ÁREA BASAL E VOLUME/HA GERADO PELOS MODELOS APLICADOS A DADOS INDEPENDENTES

Variável	Thornthwaite-Mather				Penman-Monteith			
	s/ v.amb	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	s/ v.amb	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
AB (m²/ha)	1,51	1,29	1,22	1,18	1,46	1,16	1,19	1,21
Ganho (%)		14,3	19,2	21,9		23,3	21,6	20,2
VOL (m³/ha)	19,5	15,1	13,4	12,5	20,8	15,0	16,0	17,2
Ganho (%)		22,8	31,6	36,0		28,1	23,2	17,3

Os ganhos em diminuição do erro padrão da estimativa pela incorporação de variáveis do ambiente foram observados em todas as metodologias desenvolvidas, alcançando na melhor situação, a redução de 23,3 % na estimativa da área basal (modelo 1 - Penman) e de 36,0% na estimativa do volume (modelo 3 - Thornthwaite). Não se observou consistência na redução do erro em altura dominante, área basal e volume com um mesmo modelo. Por exemplo, a maior redução no erro padrão da estimativa da altura dominante foi observada com a aplicação do modelo 2 - Thornthwaite, porém não se observou este maior ganho para área basal e volume. As formulações empregadas para cálculo das variáveis ambientais também resultaram em diferentes respostas na redução do erro, onde o modelo empírico de Thornthwaite-Mather apresentou ligeira vantagem. O modelo 3 - Thornthwaite, cujas variáveis foram selecionadas em função do baixo custo e praticidade de obtenção, resultou na melhor situação de ganho em precisão para estimativa do volume,

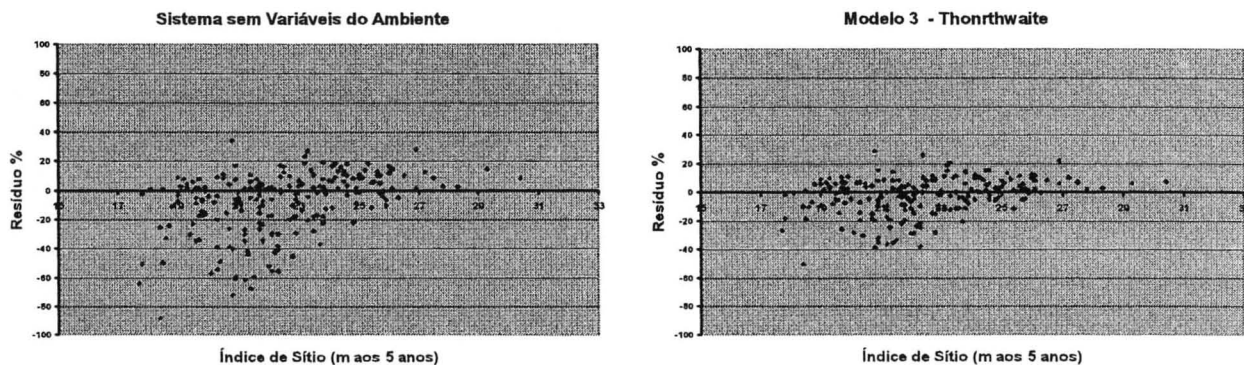
aliando o aspecto técnico ao operacional e econômico, o que se torna uma grande oportunidade para difusão da metodologia. A Figura 18 demonstra a distribuição do volume observado sobre volume estimado pelo sistema formado por modelos sem e com variáveis (modelo 3 - Thornthwaite). A dispersão é nitidamente mais convergente para a igualdade no sistema com variáveis do ambiente.

FIGURA 18 - DISPERSÃO DE VOLUMES OBSERVADOS X ESTIMADOS NO SISTEMA SEM E COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS



Uma avaliação importante é a análise gráfica dos resíduos relativos, normalmente como função de uma variável de interesse. A Figura 19 apresenta o comportamento das estimativas em função do índice de sítio, traduzida pela altura dominante na idade de 5 anos, tanto para o sistema sem variáveis ambientais quanto para aquele com inclusão destas.

FIGURA 19 - RESÍDUOS RELATIVOS EM VOLUME PARA SISTEMA SEM E COM VARIÁVEIS DO AMBIENTE EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO



A dispersão dos resíduos pelo sistema sem variáveis ambientais apresentou forte tendência à super estimativa em sítio inferiores, traduzidos pelos valores negativos. Por sua vez, o sistema com variáveis ambientais propiciou sensível melhora na distribuição dos resíduos gráficos.

3.1.3.3 Efeito das Variáveis Ambientais na Variação do Índice de Sítio

A análise da variação da estimativa do índice de sítio ao longo de diversas medições num inventário contínuo, determina a maior ou menor habilidade dos modelos de sítio em uso. Uma característica comum nas espécies de rápido crescimento como o eucalipto, é a instabilidade de estimativas numa seqüência de remedições anuais das parcelas permanentes, ora apontando para sítios mais fracos ora para sítios mais fortes. Normalmente reputa-se ao modelo de projeção da altura dominante, o ônus da instabilidade e, por vezes, são assumidas classes de sítio mais amplas para atenuar os efeitos não completamente entendidos. Biologicamente, espécies de crescimento rápido e vigoroso sofrem influências significativas do ambiente, traduzido por exemplo, no crescimento vigoroso em determinado ano quando a situação ambiental é favorável e, seguido de um crescimento inferior em ano posterior, influenciado por condição adversa do meio, e vice-versa. Para cada ano de medição de uma parcela de inventário é possível através do modelo de projeção da altura dominante, então, se estimar esta variável até a idade índice, obtendo-se assim, seu índice de sítio. Duas medições da mesma parcela, em anos sucessivos, permitem estimar o índice de sítio relativo a cada momento de medição. A diferença entre os dois índices define o padrão de estabilidade das estimativas e o ideal é que apresentem baixa variação.

Analisou-se a projeção do índice de sítio para cada uma das duas medições das parcelas permanentes do banco de dados independentes. A diferença entre as projeções feitas a partir da idade inicial (Id_1) e idade final (Id_2), através do modelo sem variáveis ambientais, foi analisada como função das variáveis ambientais geradas pelo método de Thornthwaite-Mather e do coeficiente modificador ($MODI_{incl}$) do parâmetro de inclinação da função de Richards. O valor do coeficiente modificador ($MODI_{incl}$) foi obtido pela aplicação da equação 20 ao conjunto de valores de variáveis ambientais pareados às remedições das parcelas permanentes.

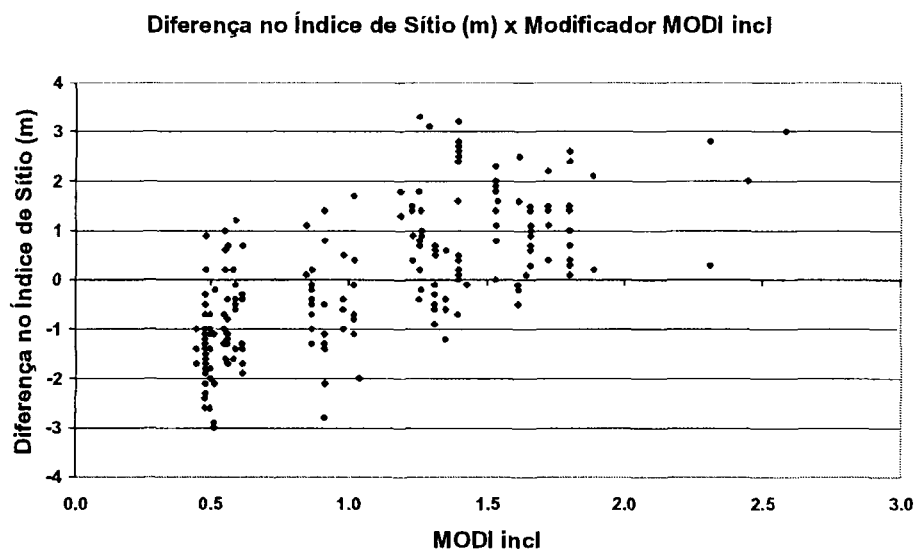
A Tabela 36 apresenta as correlações lineares entre a diferença nas projeções do índice de sítio e essas variáveis.

TABELA 36 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A DIFERENÇA NO ÍNDICE DE SÍTIO (IS) ESTIMADO PELO MODELO SEM VARIÁVEIS AMBIENTAIS A PARTIR DE DUAS MEDIÇÕES CONSECUTIVAS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO E AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Variável	Diferença no Índice de Sítio
MODI_{incl}	-0,71
Precipitação mensal	-0,67
Déficit Hídrico	0,62
Déficit de Pressão de Vapor do Ar	0,46
Temperatura Máxima - dpm	0,40
Evapotransp. Potencial	0,36
Déficit de Pressão de Vapor do Ar - dpm	0,35
Déficit Hídrico - dpm	0,33
Evapotransp. Potencial - dpm	0,29
Temperatura Mínima - dpm	-0,12

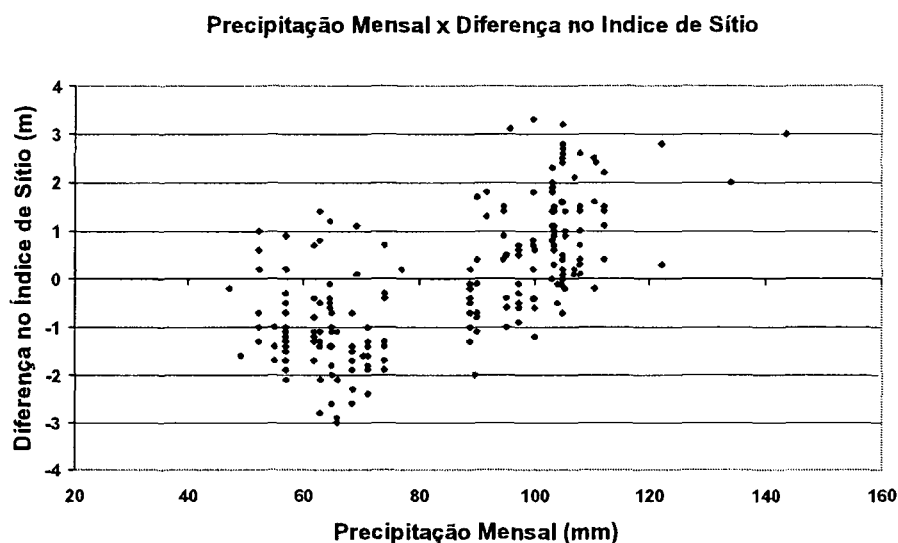
A correlação de -71% da diferença de estimativa do índice de sítio com o coeficiente MODI_{incl} gerado pelo modelo 3 - Thornthwaite, sugere que a variação no índice de sítio encontra explicação, em grande parte, pelas variáveis ambientais consideradas no modelo. A maior correlação apresentada pelo modificador MODI_{incl} quando comparada àquelas das variáveis ambientais individualmente, reforça a validade do procedimento de seleção de variáveis para explicação da variação em altura dominante entre duas medições. A Figura 20 apresenta o gráfico de dispersão da diferença entre as estimativas do Índice de Sítio com o modificador MODI_{incl}.

FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE A DIFERENÇA ABSOLUTA NA PROJEÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO ENTRE DUAS MEDIÇÕES SUCESSIVAS COM O COEFICIENTE $MODI_{INCL}$ DO MODELO 3 - THORNTHWAITTE



Ao se analisar as correlações individuais das variáveis ambientais com a diferença de estimativa do índice de sítio entre duas medições, percebe-se que a precipitação mensal e o déficit hídrico mensal, exercem as maiores influências, com valores absolutos superiores a 60%. A Figura 21 apresenta a dispersão dos dados de diferença absoluta das projeções de índice de sítio entre duas medições com a precipitação mensal. Observa-se clara tendência da diferença na projeção da altura dominante na idade índice aumentar à medida que a precipitação mensal também aumenta, demonstrando a influência do ambiente nesta importante medida biométrica.

FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE A DIFERENÇA NA PROJEÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO ENTRE DUAS MEDIÇÕES SUCESSIVAS COM PRECIPITAÇÃO MENSAL (MM)



3.1.3.4 Análise de Sensitividade de Parâmetros do Modelo de Altura Dominante

A sensibilidade dos parâmetros do modelo de altura dominante em função das variáveis do ambiente permite avaliar o poder de extrapolação e o grau de incerteza ou risco que se está sujeito ao se aplicar a metodologia proposta. Ao se simular uma condição do meio muito diferente das condições encontradas na base de dados de ajuste, pode-se incorrer em estimativas irreais da altura dominante do povoamento e, com isto, o uso da ferramenta fica limitado exclusivamente aos limites de variação ambiental original. O ideal seria que as estimativas com base em valores não convencionais (extrapolados) das variáveis independentes fossem controladas pela formulação matemática do modelo. No caso da função de Richards, como ela apresenta comportamento orientado ao crescimento de qualquer ser vivo através da sua composição algébrica, grande parte desse problema, é evitado, conforme pode se perceber através da análise do modelo 3 - Thornthwaite pela variação das 4 variáveis do ambiente de sua composição: precipitação mensal, evapotranspiração potencial - dpm, temperatura máxima - dpm e temperatura

mínima - dpm. Para estabelecer os valores dessas variáveis na análise de sensibilidade das estimativas do modelo de Richards, buscou-se da base original de dados de ajuste, a estrutura de variação de cada uma delas, conforme apresentado na Tabela 37.

TABELA 37- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DO MODELO 3 - THORNTHWAITE

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Precipitação Mensal	90,5	52,3	166,6	23,9
ETp dpm	8,1	5,2	14,4	1,5
Tmax dpm	0,59	0,30	0,83	0,059
Tmin dpm	0,55	0,36	0,84	0,073

A Tabela 37 define os limites de variação das variáveis ambientais na base de dados de ajuste. A precipitação mensal apresentou valor mínimo de 52,3 mm e máximo de 166,6 mm, o que representa uma precipitação anual entre 627 mm e 2.000 mm, com média mensal de 90,5 mm e anual de 1.086 mm. Tal variação já permite uma simulação em ampla faixa de situações ambientais. O desvio padrão da média da temperatura máxima mensal apresentou variação mínima de 0,30°C e máxima de 0,83°C, com média de 0,59°C.

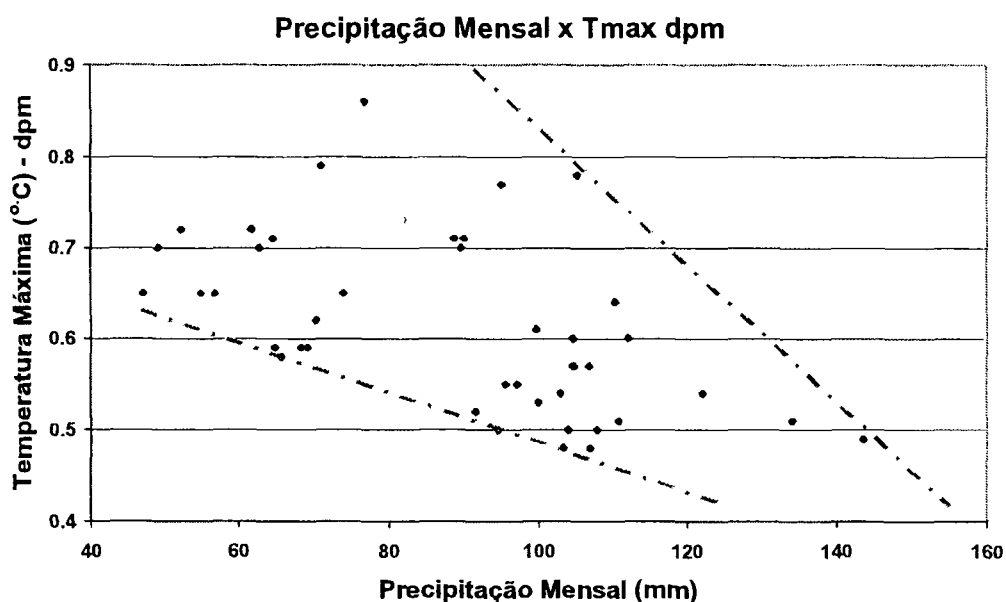
A fim de melhor conhecer o comportamento das variáveis envolvidas observou-se a correlação linear entre elas (Tabela 38). Da análise dessa, pôde-se inferir que: as variáveis mais relacionadas ao incremento em altura dominante são, em ordem decrescente: precipitação mensal, desvio padrão da média da temperatura máxima mensal, desvio padrão da média da evapotranspiração potencial e desvio padrão da média da temperatura mínima anual. Pode-se ainda observar que as duas primeiras variáveis, precipitação mensal e desvio padrão da média da temperatura máxima, apresentam correlação negativa entre si, ou seja, são inversamente proporcionais. Quando uma aumenta a outra diminui.

TABELA 38 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E INCREMENTO EM ALTURA

Variáveis	Prec	ETp dpm	Tmax dpm	Tmin dpm
ICA em Hdom	0,51	-0,27	-0,36	-0,01
Précipitação Mensal	1,00	-0,45	-0,41	-0,34
ETp dpm		1,00	0,19	0,34
Tmax dpm			1,00	0,22
Tmin dpm				1,00

A Figura 22 apresenta as dispersões dos dados de precipitação mensal e desvio padrão da temperatura máxima, indicando as situações mais comuns encontradas na base de dados de validação, ou seja, onde o modelo encontra-se sustentado por dados mensurados.

FIGURA 22 - REGIÃO DE OCORRÊNCIA PROVÁVEL DAS VARIÁVEIS: PRECIPITAÇÃO MENSAL E DESVIO PADRÃO DA MÉDIA DA TEMPERATURA MÁXIMA MENSAL PARA A REGIÃO DO ESTUDO



Procedeu-se com a análise de sensibilidade do modificador ($MODI_{incl}$) que incide no coeficiente de inclinação do modelo de Richards (modelo 3 – Thornthwaite) para ampla faixa de variação em precipitação mensal e desvio padrão da média da

temperatura máxima. As duas variáveis restantes (desvio padrão da média das temperaturas máxima e mínima) consideradas no modificador ($MODI_{incl}$) foram mantidas fixas em seus valores médios observados na base de dados de ajuste. A Tabela 39 apresenta a estimativa do modificador - $MODI_{incl}$ - e a Tabela 40 apresenta a estimativa do incremento anual em altura dominante esperado ocorrer na faixa de variação da tabela precedente, para um povoamento com idade inicial de 3,8 anos e com 18,9 m de altura dominante, que foi o valor médio encontrado na base de dados de ajuste (Tabela 9). Utilizou-se o desvio padrão das duas variáveis para definir valores das variáveis independentes para simulação.

TABELA 39 - SENSITIVIDADE DO FATOR MODIFICADOR ($MODI_{incl}$) DO COEFICIENTE DE INCLINAÇÃO DO MODELO DE RICHARDS (MODELO 3 - THORNTHWAITTE) EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS: PRECIPITAÇÃO MENSAL E TEMPERATURA MÁXIMA - DPM

		Desvios	-3,5	-2,5	-1,5	0	1,5	2,5	3,5	4,5
		Precipitação Mensal (mm)								
Desvios	Tmax dpm	6,85	30,75	54,65	90,5	99,582	150,25	174,15	198,05	
-3,5	0,38	0,26	0,36	0,60	1,21	1,41	2,89	3,80	4,84	
-2,0	0,47	0,19	0,30	0,54	1,15	1,35	2,83	3,74	4,78	
0,0	0,59	0,11	0,22	0,46	1,06	1,27	2,75	3,65	4,69	
1,0	0,71	0,07	0,18	0,41	1,02	1,22	2,71	3,61	4,65	
3,5	0,80	-0,03	0,07	0,31	0,92	1,12	2,60	3,51	4,55	
4,5	0,86	-0,08	0,03	0,27	0,88	1,08	2,56	3,47	4,51	

A região destacada (sombreada) define a faixa esperada de variação da precipitação mensal e do desvio padrão da média da temperatura máxima para a região do estudo e, nessas condições, o fator modificador variou entre 0,27 e 2,89. A faixa de precipitação testada variou desde uma condição de extrema seca, com valores anuais de 82 mm de chuva, até uma condição de grande excesso hídrico, definida por uma precipitação anual de 2.376 mm.

TABELA 40 - ESTIMATIVAS DE INCREMENTO ANUAL EM ALTURA DOMINANTE COMO REFLEXO DO FATOR MODIFICADOR (MODI_{INCL}) DO COEFICIENTE DE INCLINAÇÃO DO MODELO DE RICHARDS (MODELO 3 - THORNTHWAITTE)

Tmax dpm	Precipitação Mensal (mm)							
	6,85	30,75	54,65	90,5	99,582	150,25	174,15	198,05
0,38	1,29	1,49	1,91	2,83	3,12	5,13	6,26	7,45
0,47	1,16	1,38	1,80	2,74	3,03	5,05	6,18	7,38
0,59	0,95	1,20	1,66	2,62	2,91	4,94	6,08	7,29
0,65	0,82	1,11	1,59	2,56	2,85	4,88	6,03	7,25
0,80	n.c.	0,82	1,40	2,40	2,70	4,75	5,90	7,13
0,86	n.c.	0,65	1,31	2,34	2,64	4,69	5,85	7,08

n.c. - não realizado cálculo por incoerência matemática dos valores

A Tabela 40 propicia uma rica fonte de discussão. Na região provável de ocorrência das variáveis independentes simuladas (sombreada), o incremento anual em altura dominante para um povoamento médio com 3,8 anos de idade e altura dominante de 18,9 m, variou de 1,31 m a 5,13 m, ou seja, dependendo das condições ambientais o modelo poderia estimar a altura dominante na idade 4,8 anos (1 ano mais tarde) entre 20,2 m e 24,0 m.

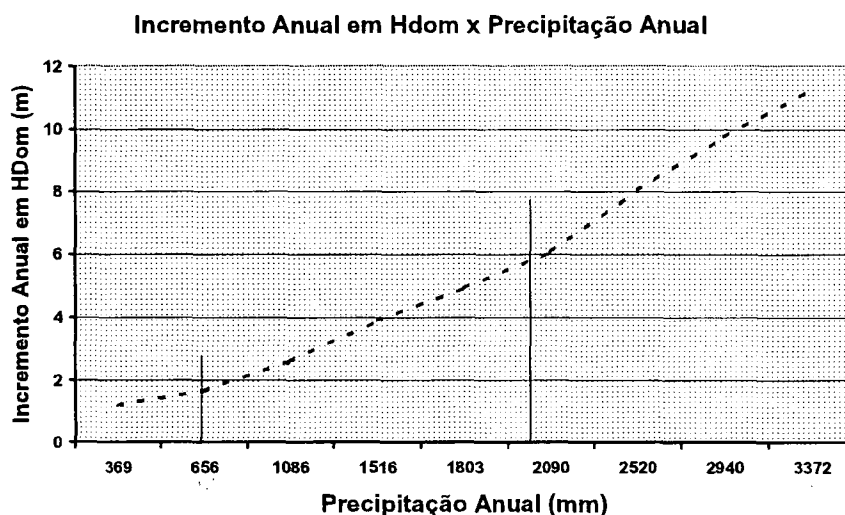
O comportamento do incremento em altura dominante é diretamente proporcional à precipitação pluviométrica e inversamente proporcional ao desvio padrão da média da temperatura máxima mensal. Isto implica dizer que uma condição mais homogênea de temperatura máxima induz a um melhor crescimento, o que concorda com a expectativa fisiológica apontada por LANDSBERG & GOWER (1996).

Uma variação da precipitação pluviométrica em 10%, de 90,5 mm para 99,6 mm, induz a um acréscimo de 9% no incremento em altura dominante, passando de 2,62 m para 2,91 m. Uma variação de 10% no desvio padrão da média da temperatura máxima, de 0,59 °C para 0,65 °C, implica numa variação negativa de 2,4% no incremento, passando de 2,62 m para 2,56 m. Ou seja, a precipitação afeta mais fortemente a variável dependente que o desvio padrão da média da temperatura máxima.

Outra questão verificada é que, em se mantendo o desvio padrão da temperatura máxima em seu valor médio, o incremento em altura dominante pode variar de 0,64 m numa situação quase desértica, para até 7,29 m numa condição de

excesso de chuva. É pouco provável que a espécie de eucalipto mantenha um comportamento biológico coerente com aquela encontrada na base de dados estudada, numa condição de extrema seca como aquelas simuladas nas Tabelas 39 e 40, porém necessário é se verificar o comportamento matemático da inferência nestas condições. É mais provável supor que a precipitação excessiva possa manter a coerência biológica de crescimento apresentada aqui. Neste caso, torna-se interessante observar o que o modelo expressa matematicamente com o aumento demasiado da precipitação pluviométrica. A Figura 23 apresenta a expectativa do incremento anual em altura dominante obtido pelo modelo ao se alterar demasiadamente a precipitação pluviométrica.

FIGURA 23 - ESTIMATIVAS DO INCREMENTO EM ALTURA DOMINANTE PELA SIMULAÇÃO DE VARIAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA - (MODELO 3 - THORNTHWAITTE)



Observa-se que existe uma correlação diretamente proporcional entre a precipitação pluviométrica e a estimativa do incremento anual em altura dominante e, dentro da amplitude da variável ambiental encontrada na base de dados (linhas verticais dentro do gráfico), a estimativa variou entre 1,8 m e 6,0 m. Para situações de intensa condição pluviométrica, como 2.500 mm anuais, o incremento estimado será de 8 m, o que ainda pode ser considerado biologicamente possível, se comparado aos maiores valores da base de dados (valor máximo observado foi de

7,9 m - ver Tabela 9). A partir daí, as extrapolações adquirem uma componente empírica maior o que compromete a indicação de uso da metodologia.

3.2 MODELO PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SÍTIO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Foram utilizados dados de levantamentos do inventário florestal temporário 1.999 talhões com idades entre 1 e 12 anos, implantados com o mesmo material clonal de eucalipto e na mesma região do estudo. A altura dominante por talhão, que é a variável dependente estudada, foi originada das médias das alturas dominantes de cada unidade de amostra. A amostragem do inventário foi com um mínimo de 2 parcelas, um máximo de 75 e em média 5,3 parcelas. O uso de dados médios contribuiu para uma melhor representatividade da capacidade de sítio aqui representada pela altura das árvores dominantes, além de atenuar qualquer efeito de erros crassos de amostragem.

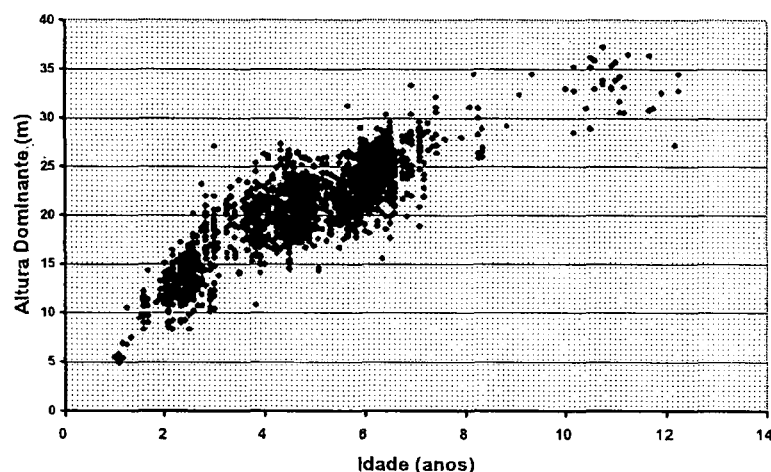
As variáveis ambientais utilizadas nesse processo de modelagem dizem respeito a medidas de simples obtenção em estações meteorológicas convencionais, como precipitação mensal, evapotranspiração potencial mensal, calculada pelo método empírico de Thornthwaite-Mather, e finalmente, temperaturas mensais média, mínima e máxima. O cálculo dessas variáveis de natureza dinâmica, foi embasado nos seus valores mensais compreendidos entre a data do plantio e a data da medição do povoamento. Algumas variáveis estáticas também fizeram parte da análise, como latitude e teores de argila, silte e areia do solo. A Tabela 41 apresenta as estatísticas descritivas da base de dados de ajuste. A Figura 24 apresenta a distribuição de dados de altura dominante por idade observada na base de dados de ajuste.

TABELA 41 - CARACTERÍSTICAS DA BASE DE DADOS DE AJUSTE PARA MODELAGEM DO ÍNDICE DE SÍTIO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS – 1.999 REGISTROS PAREADOS

Variáveis	Estatísticas Descritivas			
	Média	Mínimo	Máximo	CV %
Do Povoamento:				
Ano Plantio	1994,9	1987,0	2000,0	0,1
Altura Dominante (m)	21,1	4,9	37,3	22,4
Idade (anos)	5,0	1,0	12,3	33,3
Do ambiente:				
Latitude	19,1	17,6	19,9	3,3
Teor de Argila no solo (%)	35,6	8,5	56,0	19,9
Teor de Silte no solo (%)	7,0	5,5	8,3	6,7
Teor de Areia no solo (%)	57,2	36,2	86,0	12,8
Temperatura Mensal Máxima (°C)	28,4	26,1	30,5	3,1
Temperatura Mensal Média (°C)	23,8	21,3	25,1	2,5
Temperatura Mensal Mínima (°C)	20,3	17,9	21,3	3,0
Incremento Médio Anual em Hdom	4,5	2,2	9,0	20,5
Precipitação Mensal (mm)	94,5	63,0	188,0	12,7
Precipitação Mensal - dpm (mm)	11,7	6,9	43,3	30,7
Evapotranspiração Potencial Mensal (mm)	103,8	75,6	120,5	7,1
Evapotranspiração Potencial Mensal (mm) - dpm	4,1	2,3	7,1	18,3

dpm – desvio padrão da média dos valores mensais das variáveis

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DAS ALTURAS DOMINANTES POR IDADE DOS 1999 TALHÕES AMOSTRADOS



A variação observada de altura dominante na idade de 6 anos, por exemplo, foi de aproximadamente 10 m, o que implicou em diferentes capacidades produtivas dos povoamentos, criando assim, a base elementar para a análise do efeito das variáveis ambientais no seu comportamento.

3.2.1 Seleção de Variáveis e Desenvolvimento da Modelagem

Utilizou-se a Análise de Componentes Principais (ACP) para se averiguar, entre as 12 variáveis do ambiente apresentadas na Tabela 41, a estrutura de variância existente. A Tabela 42 apresenta os autovalores das 4 primeiras componentes, as quais são responsáveis por 84,24% da variação total.

TABELA 42 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Componente Principal	Variância Total	Variância %	Variância Acumulada	Var. Acum %
1	3,54	32,21	3,54	32,21
2	2,79	25,40	6,34	57,60
3	1,63	14,82	7,97	72,42
4	1,30	11,82	9,27	84,24

A seleção das variáveis para os trabalhos de modelagem foi embasada nos coeficientes individuais dentro de cada autovetor, sendo escolhida, a variável de maior valor absoluto. A Tabela 43 apresenta os autovetores das 4 primeiras componentes principais.

TABELA 43 - AUTOVETORES DAS 4 PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS

Variáveis	Autovetor			
	1	2	3	4
Latitude	0,386	-0,596	-0,446	-0,342
Argila	0,567	-0,695	0,276	0,159
Silte	0,467	-0,446	0,283	0,334
Areia	-0,574	0,696	-0,290	-0,177
Temp. máxima	-0,612	-0,422	-0,480	-0,147
Temp. média	-0,843	-0,384	0,283	-0,168
Temp. mínima	-0,526	0,093	0,779	0,061
Precipitação	0,438	0,136	0,296	-0,722
Precipitação - dpm	0,540	0,451	0,323	-0,498
ETp	-0,822	-0,430	0,283	-0,179
ETp - dpm	-0,058	-0,729	-0,032	-0,401

As variáveis mais importantes na explicação da variância total do sistema de variáveis ambientais analisado, foram:

- 1) Temperatura Média
- 2) Evapotranspiração Potencial – dpm
- 3) Temperatura Mínima
- 4) Precipitação Mensal

Embora essas variáveis sejam responsáveis pela maior parte da explicação da variabilidade ambiental, não significa *a priori*, que elas sejam altamente relacionadas à altura dominante dos povoamentos. Analisou-se, então, a matriz de correlação entre as variáveis selecionadas na ACP com o incremento médio em altura dominante IMA(Hdom). O IMA(Hdom) foi utilizado para se separar o efeito da idade na análise e, também, por representar a capacidade produtiva do povoamento. Optou-se, também, por não incluir na análise, povoamentos com idades abaixo de 5 anos e acima de 8 anos, visando refletir a melhor relação das variáveis ambientais com o Índice de Sítio, o qual se embasa em idades índice entre 5 e 7 anos para povoamentos manejados para produção de celulose. O número de registros na análise foi, então, reduzido para 1568.

TABELA 44 - ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O INCREMENTO MÉDIO EM ALTURA DOMINANTE NAS IDADES DE 5 A 8 ANOS E AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS SELECIONADAS NA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Variáveis	IMA Hdom
TMED	-0.35
ETP dpm	-0.25
TMIN	-0.17
PREC	0.27

Observou-se que a relação entre IMA(Hdom) e as variáveis ambientais não são acentuadas. As variáveis ambientais: temperatura média, temperatura mínima e desvio padrão da média da evapotranspiração potencial, tiveram relação inversamente proporcional com a variável do povoamento. Já a precipitação média apresentou relação direta, indicando que a maior disponibilidade de água esteve relacionada à maior produtividade dos plantios.

A correlação linear entre temperatura média e desvio padrão da média da evapotranspiração potencial foi de 33%. Por dificuldades de finalização do processo de análise de regressão não linear com uso das quatro variáveis, optou-se pela inclusão de apenas 2 delas.

Procedeu-se, então, com o ajuste do modelo de Richards, primeiramente sem considerar as variáveis do ambiente e, posteriormente com a inclusão destas no modificador $MODI_A$ - modelo (16) em conjunto com o modelo (17). As variáveis ambientais consideradas foram temperatura média e precipitação média. O coeficiente modificador do coeficiente assintótico da função de Richards apresentou a forma a seguir.

$$MODI_A = c_1.TMED + c_2.PREC \quad (24)$$

A Tabela 45 apresenta as estatísticas de ajuste dos modelos sem e com variáveis ambientais.

TABELA 45 - ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DO MODELO PARA ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SÍTIO

Estatísticas	Sem variáveis Ambientais	Com Variáveis Ambientais
Assíntota (A)	42,82011	50,01209
c₁ [Tmed]	-	0,014321
c₂ [Prec]	-	0,003096
B₂ (inclinação)	-0,09055	-0,1927
B₃ (inflexão)	0,675889	0,782733
R²	67,9	72,2
EPE (m)	2,32	2,16
Ganho (%)	-	6,9

Comparado ao modelo sem variáveis ambientais, conseguiu-se um aumento no coeficiente de determinação de 67,9% para 72,2% e redução do erro padrão da estimativa de 2,32 m para 2,16 m, o que configura um ganho em precisão de 6,9%. O ganho em precisão na estimativa do índice de sítio pela inclusão das variáveis ambientais foi pequeno se comparado aos ganhos observados nas estimativas dos modelos para incremento em altura dominante. Porém, o maior benefício se dá pelo aumento da flexibilidade em se estimar a capacidade produtiva em função de fatores do meio, o que se torna muito interessante do ponto de vista da aplicação prática. Nesse sentido, uma simulação de uso do modelo em situações extremas, permite avaliar o comportamento da ferramenta desenvolvida em situações além da faixa de dados da amostragem. A Tabela 46 apresenta as projeções anuais da altura dominante para a idade de 7 anos, como função das duas variáveis ambientais incluídas no modelo, cujos valores simulados obedeceram às estatísticas descritivas dessas variáveis (Tabela 41) baseadas na média e desvio padrão.

TABELA 46 - ESTIMATIVAS DE ALTURA DOMINANTE NA IDADE DE 7 ANOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL E TEMPERATURA MÉDIA MENSAL

		Precipitação Mensal (mm)							
	No. desvios	-3,50	-2,50	-1,50	0,00	1,5	2,50	3,50	6,0
No. desvios	TMED	52	64	76	95	113	125	137	167
-3,50	21,86	21,1	22,5	24,0	26,2	28,4	29,9	31,4	35,0
-2,50	22,44	20,7	22,2	23,7	25,9	28,1	29,6	31,0	34,7
-1,50	23,02	20,4	21,9	23,3	25,5	27,7	29,2	30,7	34,4
0,00	23,89	19,9	21,4	22,8	25,1	27,2	28,7	30,2	33,9
0,55	24,21	20,4	21,9	23,3	25,5	27,7	29,2	30,7	34,4
2,50	25,34	20,7	22,2	23,7	25,9	28,1	29,6	31,0	34,7
3,50	25,92	21,1	22,5	24,0	26,2	28,4	29,9	31,4	35,0

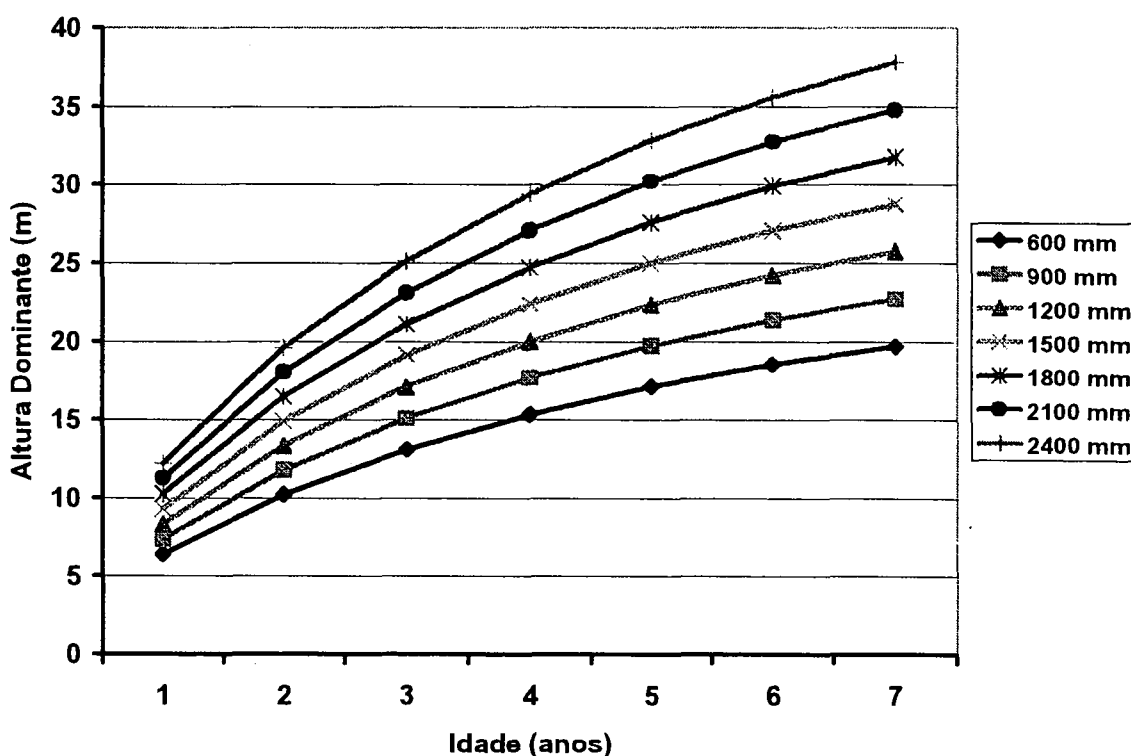
Nas condições simuladas, a altura dominante na idade de 7 anos apresentou variação de até 21 m. A última coluna da Tabela 46 representa uma situação de excesso de precipitação equivalente a 6 desvios padrão acima da média dos dados de ajuste, e que em termos anuais, representa 2.000 mm. Nessas condições a estimativa se apresentou coerente, dentro de valores condizentes com os valores mais altos da amostragem. Esse comportamento se deve a estrutura biológica do modelo de Richards que, independente do valor das variáveis independentes, mantém um padrão de resposta biologicamente coerente.

A variação em 10% na precipitação pluviométrica para uma mesma condição de temperatura média, resultou numa variação de 1,2 m na altura dominante, passando de 25,1 m para 26,3 m. A variação de 10% temperatura média, para uma mesma condição de precipitação, resultou numa variação de 1,3 m na altura dominante, passando de 25,1 m para 26,4 m.

Com base nessa metodologia, curvas de altura dominante, que em termos da modelagem de crescimento e produção definem as classes de sítio, foram obtidas pela variação das condições climáticas locais. A Figura 25 apresenta uma simulação para 7 diferentes condições de precipitação pluviométrica que, em termos anuais, são representados por precipitações de 600 mm a 2.400 mm. Para simplificar a forma de apresentação das curvas de sítio optou-se por evidenciar o efeito de apenas uma variável ambiental. Para isso, observou-se a existência de uma relação entre as duas variáveis ambientais consideradas, e assim, foram

relacionadas num modelo de regressão linear simples para estimativa da temperatura média em função da precipitação média, com base nos dados sob análise. A equação resultante teve a forma: $TMED = 24,153 - 0,00324.PREC$, com $R^2 = 33\%$ e $EPE = 0,59$ °C, sendo inserida na equação baseada no modelo (24) para definição das curvas das diversas classes de sítio.

FIGURA 25 - CURVAS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL (MM) PELO USO DA EQUAÇÃO (17) COM INCLUSÃO DO MODIFICADOR $MODIA$ (EQUAÇÃO (24))



A amplitude das classes de índice de sítio na idade de 7 anos variou 18,1 m, passando de 19,7 m a 37,8 m, para precipitações anuais de 600 e 2.400 mm respectivamente.

3.2.2 Validação do Modelo

Uma base de dados independente com 40 registros pareados foi reservada para validar a metodologia proposta. A estrutura de amostragem e a forma de pareamento dos dados ambientais com os resultados do inventário foram idênticas à utilizada na base de dados de ajuste. Uma região inteira ao sul da área de estudo, no Município da Serra no Estado do Espírito Santo, com latitude 20°04'51'' Sul, foi reservada para esse fim,

Os modelos sem e com variáveis do ambiente foram então aplicados aos dados da base independente e as estatísticas comparativas dos resultados das estimativas encontram-se na Tabela 47.

TABELA 47 - ESTATÍSTICAS COMPARATIVAS DA APLICAÇÃO DOS MODELOS SEM E COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA DOMINANTE CONTRA BASE DE DADOS INDEPENDENTE

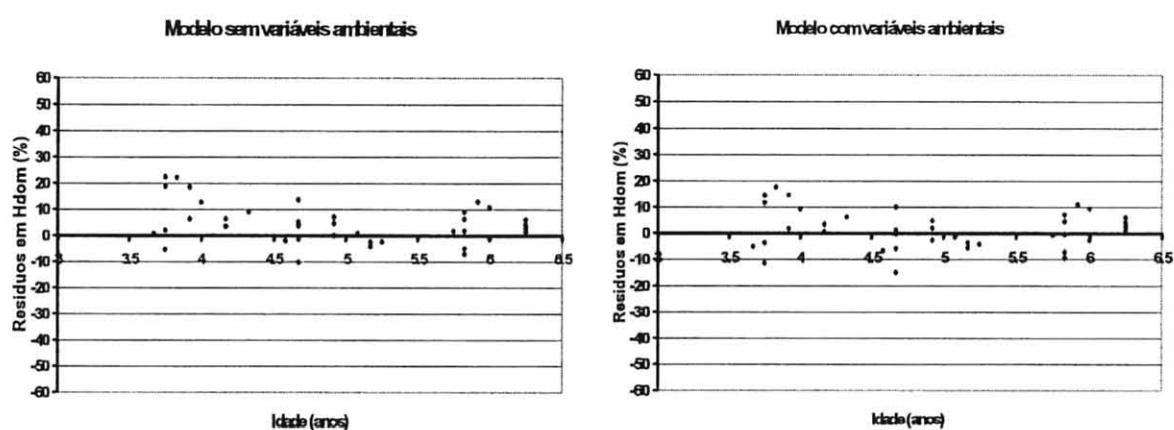
Estatísticas	Modelo de Altura Dominante	
	s/ var. ambientais	c/ var. ambientais
EPE (m)	4,34	2,89
EPE (%)	19,38	12,83
Ganho (%)	-	33,6
Resíduo Médio (%)	4,42	1,46

A inclusão da temperatura média e precipitação média no modelo, resultou numa melhor estimativa da altura dominante, quando comparada àquelas feitas pelo modelo sem variáveis ambientais. O erro padrão da média diminuiu em 33,6% e, além disso, o resíduo médio passou de 1,46% contra 3,99% gerados pelo modelo convencional, o que demonstra, inclusive, que as estimativas foram menos tendenciosas.

A distribuição gráfica dos resíduos relativos em altura dominante demonstra melhor comportamento de tendência do modelo com variáveis ambientais, como demonstra a Figura 26. O modelo sem variáveis ambientais tende a maiores

subestimativas em idades abaixo de 4 anos, traduzido por valores positivos dos resíduos.

FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS RELATIVOS DA ESTIMATIVA DA ALTURA DOMINANTE PELO USO DO MODELO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS



3.3. LIMITAÇÕES E USOS DA METODOLOGIA PROPOSTA

É certo que estabelecer um vínculo de previsões meteorológicas com a metodologia proposta no presente estudo para obtenção de prognoses de crescimento, pode constituir-se num exercício meramente especulativo. Embora existam evidências no meio científico que os sistemas de informações e previsões meteorológicas estejam em constante evolução, é prudente limitar seu uso para situações específicas de tempo e localização. Para que pudessem embasar as projeções volumétricas, as variáveis climáticas como precipitação, temperatura, radiação, umidade, entre outras, deveriam ser prognosticadas para horizontes de no mínimo 1 ano e com alta precisão nas suas estimativas mensais. Se tais quesitos forem satisfatoriamente atendidos pelos sistemas climatológicos, então, as projeções volumétricas com base nos modelos com variáveis ambientais podem ser efetuadas

com segurança. Porém, é prudente considerar essa questão quando estimativas futuras estiverem sendo demandas.

Mas usos não menos importantes podem estar associados à metodologia desenvolvida no presente estudo. A redução de custos na atividade de inventário florestal é certamente uma dessas aplicações. Em extensas áreas florestais, constituída para suprirem processos industriais com matéria prima lenhosa, o conhecimento do ritmo de crescimento das diversas unidades de plantio é de fundamental importância para o planejamento de uso do recurso existente. Inventários florestais são, então, operacionalizados para embasar as projeções de volume de madeira através de modelos biométricos de crescimento. O custo dessa atividade é tanto maior quanto forem, para um mesmo local, a intensidade e a periodicidade de amostragem aplicadas. Assim, levantamentos de campo são operacionalizados em intervalos amplos de tempo, como por exemplo de 2, 3 ou até mais anos. Mas as informações sobre o perfil produtivo são freqüentemente solicitadas a qualquer instante pela alta gerência ou equipe de planejamento. E nesse contexto, modelos de crescimento com variáveis ambientais podem ser utilizados para atualização dos dados de inventário em qualquer tempo, reduzindo a necessidade de alta freqüência dos levantamentos e, gerando em contrapartida, estimativas confiáveis de volume. Para isso, necessário é que dados meteorológicos estejam associados aos plantios em termos de tempo e local. Vale ressaltar que projeções geram respostas menos precisas que inventários florestais, mas podem ser obtidas dentro de limites aceitáveis de precisão estatística e com enorme vantagem em custo.

Uma outra possibilidade de uso da metodologia está no ajuste do efeito do ambiente na estrutura anual de coleta de dados de parcelas de inventário contínuo como base para o desenvolvimento de modelos de crescimento. Considerando que o ambiente influi no padrão produtivo dos povoamentos de eucalipto, modelos biométricos tradicionais ajustados a dados obtidos em situações climáticas atípicas, podem implicar em estimativas tendenciosas. Mas se as variáveis ambientais são consideradas na formulação de tais modelos, seus efeitos podem ser minimizados nas projeções futuras pelo uso das médias climáticas históricas, eliminando assim, o efeito de um provável desequilíbrio de amostragem na base de dados de ajuste. Essa situação é mais comum quando a estrutura de dados do inventário contínuo

está em formação ou quando não é observada a necessária distribuição uniforme das parcelas em variadas condições do ambiente no tempo e no espaço.

Uma importante função dos modelos com variáveis ambientais está na inferência da capacidade produtiva potencial de um determinado local com ausência de plantios, ou seja, sem dados históricos de crescimento. Curvas de produtividade para diferentes índices de sítio podem ser obtidas em função de variáveis do ambiente e, assim, auxiliar na análise da potencialidade produtiva. Por conceito de formulação, os modelos biométricos tradicionais não são apropriados para esse uso, pois não levam em conta as condições ambientais locais. Convém ressaltar que embora as estatísticas de ajuste tenham sido favoráveis, é recomendável que tal metodologia seja aplicada para regiões próximas dos plantios amostrados no presente estudo, pois outros fatores limitantes do crescimento podem estar associados, como por exemplo, variáveis edáficas e/ou nutricionais.

Finalmente, simulações de produção para diferentes cenários ambientais, com base nos históricos climáticos regionais, são possíveis e, assim, avaliações de riscos são obtidas.

CONCLUSÕES

Os desenvolvimentos realizados no presente estudo permitem afirmar que:

- Variáveis ambientais apresentam correlações com a produção e o crescimento dos povoamentos de eucaliptos e, quando consideradas dentro dos modelos de produção biométricos convencionais, podem reduzir significativamente o erro padrão das estimativas, ou seja, aumentam a precisão dos modelos de inferência.
- A interpretação dos parâmetros da função de Richards permite relacionar as variáveis ambientais dentro de conceitos biológicos coerentes.
- A alteração do parâmetro de inclinação do modelo de Richards por um coeficiente modificador ($MODI_{incl}$) gerado em função de variáveis ambientais, permite estimativas mais precisas do incremento anual em altura dominante em relação ao modelo sem variáveis do ambiente.
- Variáveis ambientais originadas de coleta direta na estação meteorológica e/ou geradas por cálculo de balanço hídrico diário, mas consideradas mensalmente, podem apresentar alta correlação com o crescimento anual em altura dominante, área basal e volume dos povoamentos de eucalipto. Nota-se que foi possível aumento na precisão das estimativas de altura dominante, área basal e volume por hectare de 30,4%, 23,3% e 36,0% respectivamente, quando as variáveis ambientais foram inclusas somente no modelo de Richards para altura dominante.
- Tanto o nível quanto a variação ao longo do tempo das variáveis ambientais conferem redução significativa no erro padrão da estimativa em volume, através do modelo de incremento em altura dominante, concordando com a expectativa de comportamento fisiológico das plantas.
- As variáveis ambientais de baixo custo, de fácil obtenção e baseadas em dados em escala mensal, quando incluídas nos modelos de estimativa da altura dominante permitem, dentro do sistema de crescimento desenvolvido, reduções do erro padrão da estimativa da altura dominante, área basal e volume, no mínimo semelhantes àquelas geradas pela metodologia de Penman-Monteith, embasada em dados climáticos diários, e que apresentam maior rigor conceitual do ponto de vista ecofisiológico.

- Um processo de validação com base de dados independente demonstrou que as diferenças entre as estimativas dos índices de sítio, geradas a partir de sucessivas medições da mesma parcela permanente, apresentam correlação de -71% com o modificador ($MODI_{incl}$) do coeficiente de inclinação da função de Richards, atestando a validade da inclusão das variáveis ambientais no modelo.
- Para estimativa do Índice de Sítio, as variáveis ambientais oriundas de variações climáticas tendem a ser significativamente superiores àquelas relacionadas aos aspectos físicos do solo e de localização geográfica.
- A alteração do parâmetro assintótico do modelo de Richards por um coeficiente modificador ($MODI_A$) gerado em função das variáveis ambientais temperatura média mensal e precipitação média mensal, permite estimativas mais precisas e flexíveis da altura dominante, possibilitando gerar curvas para classificação de sítio em bases ecológicas.
- O modelo de Richards e a forma de inclusão das variáveis do ambiente desenvolvida, permitem estimativas do Índice de Sítio, para situações ambientais para além das faixas de dados das bases de ajuste, ou seja, não geram estimativas de altura dominante com valores irrealis, o que define o caráter extrapolativo da metodologia.
- O fator “disponibilidade de água” representado por variáveis coletadas diretamente na estação meteorológica ou via cálculo de balanço hídrico, afeta significativamente o crescimento e o Índice de Sítio dos povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis*.

REFERÊNCIAS

- ABREU, E.C.R. **Modelagem da prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 2000, 70 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras.
- ALENDAG, I.S. **National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada**. Canadian Journal of Forest Research, Ottawa, v.21, 1991. p 1466-1473.
- ALMEIDA, A C.; MAESTRI, R., LANSDBERG, 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.
- AMARO, A.; TOMÉ, M. **Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation**. Preface. p 5-7. Edições Salamandra, Oeiras, Portugal, 1997.
- ASSIS, A. L. de. **Avaliação de modelos polinômiais segmentados e não segmentados na estimative de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda***. 2000, 189 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras.
- BAILEY, R.L.; CLUTTER, J.L. **Base-age invariant polymorphic site curves**. Forest Science, Washington, v. 20, n. 2, p. 155-159, June 1974.
- _____; DELL, T.R. **Quantifying diameter distribution with the Weibull function**. Forest Science, Peking, v19(2): 27-104, June 1973.
- BALDWIN, V. C.; BURKHART, H. E.; DOUGHERTY, P. M.; TESKEY, R. O. **Using a Growth and Yield Model (PTAEDA2) as a Driver for a Biological Process Model (MAESTRO)**. U.S. Department of Agricultural, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, LA, Res. Pap SO-276. 9pp. 1993.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P.J. **Modelling site productivity of *Eucalyptus globulus* in response to climatic and site factors**. Aust. J. Plant Physiology, v24, pp 831-850. 1997.
- _____; _____. **Process-based forest productivity models and their application in forest management**. Forest Ecology and Management 102, 1998. pp.13-32.
- _____; _____. **Hybrid growth model to predict height and volume growth in young *Eucalyptus globulus* plantations**. Forest Ecology and Management 120, pp. 193-201. 1999.

BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L.; WARE, K.D. **Slash pine site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic difference method.** *Forest Science*, Vol 30, No. 2, 1984, pp 411-423.

BURK, T.E.; NEWBERRY, J.D. **A simple algorithm for moment based recovery of Weibull distribution parameters.** *Forest Science*, Peking, v30(2): pp329-332, June 1984.

BURKHART, H. E. **Development of Empirical Growth and Yield Models.** In: *Empirical and Process Based Models for Forest Tree and Stand Growth Simulation*. P. 53-60. Edições Salamandra. 1997. Oeiras, Portugal.

_____; FARRAR, K.D.; AMATEIS, R.L.; DANIELS, R.F. **Simulation of individual tree growth and stand development in loblolly pine plantations on cutover, site-prepared areas.** School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia. Publication No. FWS-1-87. 47p. 1987.

CARTER, R.E.; KLINKA, K. **Relations Between Growing-Season Soil Water-Deficit, Mineralizable Soil Nitrogen and Site Index of Coastal Douglas Fir.** *Forest Ecology and Management* 30, pp. 301-311.1989.

CAO, Q.V.; BURKHART, H.E.; LEMIN JR.,R.C. **Diameter distributions and yields of thinned loblolly pine plantations.** Virginia, 1982. 62p. (Publ. FWS,1).

CHAPMAN, D.G. **Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations.** In: *Proc. 4th Berkeley Symp. Math. Stat. and Prob.*, Univ. Calif. Press, Berkeley, 1961. pp 153-168.

CLUTTER, J.L. **Compatible growth and yield models for loblolly pine.** *Forest Science*. V9. 1963. pp 354-371.

_____; JONES, E.P. **Prediction of growth after thinning in old-field slash pine plantations.** USDA For. Serv. Res. Paper SE-217.1980.

_____; FORTSON, J.C.; PIENAR, L.V.; BRISTER, G.H & BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach.** New York, John Willey e Sons, 1983. 333 p.

COMINS, H.N.; McMURTRIE, R.E. **Long-term response of nutrient-limited forests to CO₂ enrichment; equilibrium behavior of plant-soil models.** *Ecological Applications* 3, 1993. pp. 666-681.

CORONA, P.; SCOTTI, R.; TARCHIANI, N. **Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantations in central Italy.** *Forest ecology and Management*, 110:pp. 195-207.1998.

COUTO., H.T.Z. **Distribuição de diâmetros em plantações de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*.** ESALQ, Piracicaba, 1980. 79 p. (Tese de Livre Docência).

CURT, T.; BOUCHAUD, M.; AGRECH, G. **Predicting site index fo Douglas-fir plantations from ecological variables in the Massif Central area of France.** Forest Ecology and Management 149, 2001. pp. 61-74

DRAPER, N.R; SMITH, H. **Applied Regression Analisys.** New York, John Willey e Sons, 2th ed.,1980. 709 p.

EMBRAPA, CNPS. **Levantamento generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S.A.** no Estado do Espírito Santo e extremo sul da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto. Boletim de Pesquisa 1, Rio de Janeiro. 2000. 111 p.

FINGER, C.A.G. **Distribuição de diâmetros em *Acacia mearnsii* de Wild em diferentes povoamentos e idades.** Universidade Federal do Paraná, 1979, 124p. Dissertação de Mestrado.

FITZPATRICK, E.A.; NIX, H.A. **The climatic factor in Australian grassland ecology.** In: Moore, R.M., (Ed.), Australian Grasslands, Australian National University Press, Camberra. 1970.

GLADE, J.E. **Prognose de volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden.** Universidade Federal do Paraná, 1986. 99p. Dissertação de Mestrado

GONZÁLEZ, M. A. S.; FORMOSO, C. T. **Análise conceitual das dificuldades na determinação de modelos de formação de preços através de análise de regressão.** In: Revista Engenharia Civil (Universidade do Minho), n.8, p.65-75, 2000.

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

ISEBRANDS, J.G.; CROW, T.R. Introduction to uses and interpretation of **principal component analysis in Forest biology.** North Central Forest Experiment Station – US Forest Service, Minnessota, 1975.

JACKSON, D.S.; GIFFORD, H.H. **Environmental variables influencing the increment of radiata pine periodic volume increment.** New Zealand Journal of Forestry Science, Rotorua, v.4, n.1, p3-26, March 1974.

JOHNSON. R.; WICHERN, D. **Applied Multivariate Statistical Analysis.** Prentice Hall Inc, New Jersey, 4th Ed. 1998. 767 p.

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 74, 1998. pp. 161-169.

KIMMINS, J.P.; COMEAU, P.G.; KURZ, W. **Modelling the interaction between moisture and nutrients in the control of forest growth.** *Forest Ecology and Management* 30, 1990. pp. 361-379.

_____. **Forest Ecology: a foundation for sustainable management.** Prentice Hall Inc, New Jersey, 2th Ed. 1997a. 596 p.

_____; SCOLLAR, K.A.; ANDISON, D.W. BRADLEY, R. **Forceeing and Forecasting the Horizon: Hybrids Simulation Modeling of Forest Ecosystem Sustainability.** In: *Empirical and Process Based Models for Forest Tree and Stand Growth Simulation.* p 431-441. Edições Salamandra. 1997b. Oeiras, Portugal.

_____; MAILLY, D.; SEELY, B. **Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST.** *Ecological Modelling*, v.122, 1999. pp195-224.

LANDSBERG, J.J; GOWER, S.T. **Applications of Physiological Ecology to forest Management.** Academic Press, Inc. USA. 1997. 354 p.

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

MALDONADO, H.R.; BAILEY, R.L.; BORDERS, B.E. **Some implications of the algebraic difference approach for developing growth models.** *Proceedings of IUFRO Forest Growth Modelling and Prediction Conference, Minneapolis, MN, 1987.*

MACHADO, S. A. M. **Site index curves for *Mimosa scabrella*.** In: *Empirical and Process Based Models for Forest Tree and Stand Growth Simulation.* p 243-253. Edições Salamandra. 1997. Oeiras, Portugal.

MAESTRI, R. **Estimativa de produção presente futura de volume de madeira e peso de casca para povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* de Wild).** 1992, 102 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

_____; SCOLFORO, J.R.S.; HOSOKAWA, R.T. **Um sistema de predição do crescimento da produção de povoamentos de acácia negra (*Acacia mearnsii* de Wild).** *Revista Árvore*, v.19, n.3, p. 358-381, 1995

_____. **E-GROW ARCEL: Sistema de Simulação de Crescimento e Produção Florestal.** Relatório não publicado – Aracruz Celulose SA. 2002.

McMURTRIE, R.E.; ROOK, D.A. ; KELLHER, F.M. **Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen.** *Forest ecology and Management*, 30:pp.381-413.1990.

MOHREN, G.M.J. ; BURKHART, H.E. **Contrasts between biologically-based process models and management- oriented growth and yield models.** *Forest Ecology and Management* 69, pp. 1-5. 1994.

MONSERUD, R.A. **Problems with site index curves: an opinionated review.** In: J. Bockheim, ed. *Forest land classification: experiences, problems, perspectives.* Symposium proceedings. University of Wisconsin Cooperative Extension, Madison. 1984a p. 167-180.

_____. **Height growth and site index curves for inland douglas-fir based on stem analysis and forest habitat type.** *Forest Science*, vol 30, No. 4, 1984b. pp 943-965.

NAUTIYVAL, J.C.; COUTO, L. **The nature and uses of the timber production function: *Eucalyptus grandis* in Brazil.** *Forest Science* Vol 30:No. 3: pp. 761-773. 1984.

OLIVEIRA, E. B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regime de manejo.** 1995. 134 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

PARTON, W.J.; McKEOWN, R.; KIRCHNER V.; OJIMA D. **CENTURY Users' Manual.** Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Ft. Collins. 1992.

PASSIOURA, J.B. **Simulation models: science, snake oil, education, or engineering?** *Agronomy Journal*, 88, 1996. pp. 690-694.

PEREIRA, A R.; VILLA NOVA, N.A ; SEDIYAMA, G.C. **Evapo (transpiração).** FEALQ Piracicaba, USP/ESALQ, 1997, 183 p.

RASTTETER, E. B.; RYAN, M. G.; SHAVER, G. R.; MELILLO, J. M.; NADELHOFFER, K. J.; HOBBIIE, J. E.; ABER, J. D. **A general biogeochemical model describing the responses of the C and N cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO₂, climate and N deposition.** *Tree Physiology* 9: 1991. pp. 101-126.

REED, D.D. **Ecophysiological Models of Forest Growth: Uses and Limitations.** In: *Empirical and Process Based Models for Forest Tree and Stand Growth Simulation.* p. 305-311. Edições Salamandra. 1997. Oeiras, Portugal.

RENNOLLS, K. **Data requirements for forest modelling.** In: *Empirical and Process Based Models for Forest Tree and Stand Growth Simulation.* p. 11-22. Edições Salamandra. 1997. Oeiras, Portugal.

RICHARDS, F.J. **A flexible growth function for empirical use.** *J. Exp. Bot.* V10. 1959. p 290-300.

RUNNING, S.W.; GOWER S.T. **FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications, II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets.** *Tree Physiology*, 9, 1991. pp. 147-160.

SACRAMENTO NETO, O. B. **Balanço Hídrico em Plantios Jovens de Eucalipto na Região de Belo Oriente-MG**. 2001. 77 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa.

SANQUETTA, C.R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. FUPEF, Série Didática No. 8. 1996. 49 p.

SCHUMACHER, F.X. **A new growth curve and its application to timber yield studies**. *Journal of Forestry*. v37. 1939. pp 819-820.

SCOLFORO, J.R.S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção com otimização de remuneração de capitais para *Pinus caribaea* var. *hondurensis***; 1990. 290 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

_____. **Biometria Florestal – Módulo 3; Métodos para Classificação de Sítios Florestais**. UFLA/FAEPE/DCF, Lavras, 1997.

_____. **Biometria Florestal – Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. UFLA/FAEPE/DCF, Lavras, 1998.

SILVA, J. A A da; BAILEY, R. A. **Predicting diameter distribution in fertilized slash pine plantations with the Weibull distribution**. *Acta Forestalia Brasiliensis*, 2(1):47-62, 1987.

SNOWDON, P.; JOVANOVIĆ, T.; BOOTH, T.H. **Incorporation of indices of annual climatic variation into growth models for *Pinus radiata***. *Forest Ecology and Management* 117, pp. 187-197. 1999.

_____; WOOLLONS, R.C.; BENSON, M.L. **Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment**. *New Forest* 16, pp. 101-123. 1998.

SOARES, C.P.B. **Um modelo para o gerenciamento da produção de madeira em plantios comerciais de eucalipto**. Vicosa: UFV, 1999. 71p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)- Universidade Federal de Viçosa, 1999.

SPURR, S.H. **Forestry Inventory**. New York, Ronald Press. 1952. 476 p.

STAPE, J.L. **O Papel da Pesquisa Florestal na Sustentabilidade e Estabilidade de Sistemas Silviculturais “Momentaneamente” Otimizados**. In: III Simpósio de Pesquisa Florestal, SIF/UFV, Viçosa, Dez.1999.

_____. **Abordando a sustentabilidade da produção florestal e da qualidade do solo através de modelos de ecossistema**. Relatório não publicado. Nov. 2001.

STAPE, J.L. **Production Ecology of clonal Eucalyptus Plantations in northeastern Brazil**; 2002. 225 p. PhD Thesis. Colorado State University.

THROWER, J.S.; GOUDIE, J.W. Estimating Dominant Height and Site Index of Even-Aged Interior Douglas-Fir in British Columbia. *Western Journal Applied Forestry*, 7(1): 20-25, 1992.

VANCLAY, J. K. Modelling Forest Growth and Yield - Applications to Mixed Tropical Forests. CABI Publishing, Oxon, UK, 1999. 312 p.

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

WOOLLONS, R.C.; SNOWDON, P.; MITCHELL, N.D. Aumenting empirical stand projection equation with edaphic and climatic variables. *Forest Ecology and Management* 98, pp. 267-275.1997.

ANEXO I
EVAPOTRANSPIRAÇÃO

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

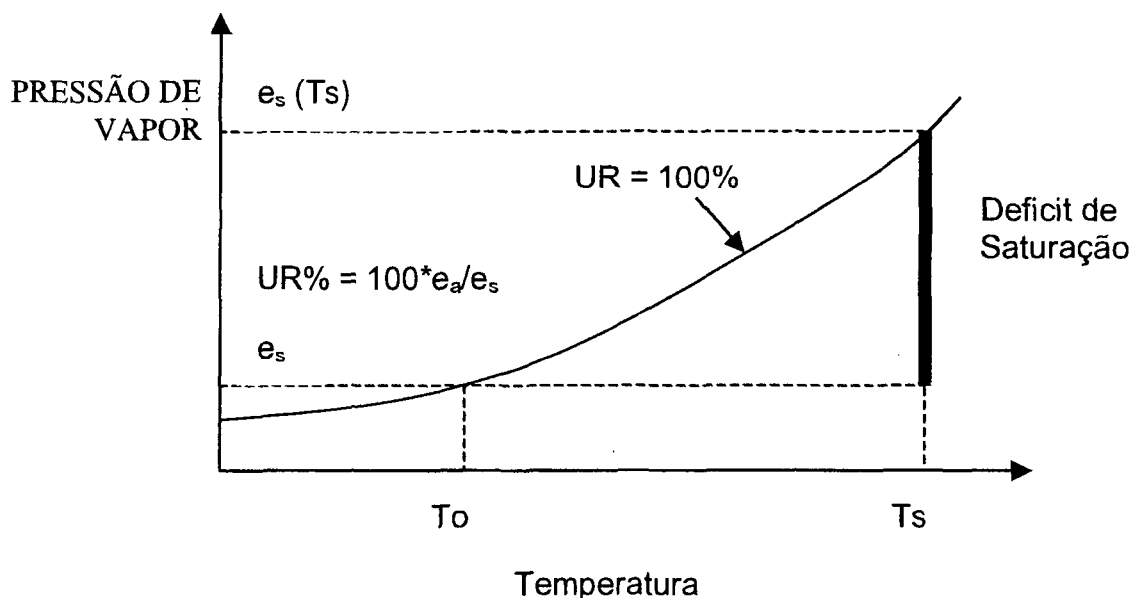
Evaporação é o fenômeno pelo qual uma substância passa da fase líquida para a fase gasosa (vapor). É um fenômeno que exige o suprimento de energia externa ao sistema e a transforma em calor latente de evaporação, que é a quantidade de energia necessária para evaporar a massa de 1 g de água estando esta à temperatura T.

A psicometria tem por objetivo estudar as propriedades termodinâmicas do ar úmido e que governam as trocas de energia entre o ar e a superfície da Terra, seja ela vegetada ou não. Num ambiente fechado, por exemplo, contendo um pouco de água e ar, ambos com mesma temperatura, após algum tempo o ar estará saturado, ou seja, o número de moléculas que saem e entram no líquido se igualam. Nessas condições, não há evaporação efetiva e o ar se encontra saturado de vapor d'água (equilíbrio dinâmico). Pela lei de Dalton das pressões parciais, sabe-se que numa mistura gasosa cada gás exerce uma pressão parcial independente da presença dos demais gases. Isso significa que o vapor d'água contido no recipiente exerce o que se chama de pressão parcial do vapor (e). Nesse exemplo, essa pressão é dita de saturação (e_s). Na natureza, o ar não se encontra contido num recipiente e um enorme volume de ar envolve uma massa de água e se satura apenas em algumas situações especiais. Portanto, num dado instante a pressão parcial de vapor (e ou e_a) é menor que a pressão de saturação. Nessas condições, diz-se que existe um déficit de saturação que é representado pela diferença ($e_s - e_a$) = Δe . Aumentando-se a temperatura do ar, aumenta-se e_s , resultando em maior Δe . Outra maneira de se verificar o déficit de saturação é pela razão entre a pressão atual e a de saturação, isto é, a Umidade Relativa (UR%),

$$UR\% = 100 * e_a/e_s$$

A capacidade da atmosfera em reter umidade aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura conforme apresenta a Figura 1.

FIGURA 1 - CURVA DE PRESSÃO DE SATURAÇÃO



Transpiração é a evaporação da água que foi utilizada nos diversos processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Essa evaporação se dá através dos estômatos que são estruturas de dimensões microscópicas ($<50 \mu\text{m}$) que ocorrem nas folhas (de 50 a 200 estômatos/ mm^2) e que permitem a comunicação entre a parte interna da planta e a atmosfera. Através dos estômatos fluem gás carbônico, oxigênio e vapor d'água. O estresse hídrico, que interfere na abertura estomática, ocorre em duas situações:

- quando o solo não contém água disponível às plantas;
- quando o solo contém água disponível mas a planta não é capaz de absorvê-la em velocidade e quantidade suficiente para atender à demanda atmosférica (*poder evaporante do ar*).

Quanto maior for Δe e a velocidade do vento, maior será a demanda atmosférica. Nesse caso, e_s é dada pela temperatura da folha e existe uma diferença de pressão parcial de vapor entre a folha e o ar circundante. A transpiração evita que as folhas sofram superaquecimento pela incidência direta da radiação solar, pois parte da energia absorvida é utilizada na evaporação. No caso de deficiência hídrica, essa energia não é dissipada havendo aumento da temperatura da folha

com conseqüente acréscimo em Δe ; daí a necessidade da planta controlar a perda d'água fechando os estômatos para evitar secamento e morte da folha. Isto determina menor atividade fotossintética e portanto, redução de produção de carboidratos e conseqüentemente do crescimento da planta.

Numa superfície vegetada ocorrem simultaneamente os processos de evaporação e de transpiração, e a este fenômeno, Thornthwaite na década de 40, chamou de *evapotranspiração*. Ela é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas. A disponibilidade de energia depende da época do ano, latitude, altitude e topografia do local. A demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar, ou seja, quanto mais seco estiver o ar, maior será a demanda atmosférica.

Medidas de evapotranspiração

A *Evapotranspiração Potencial (ETp)* é a quantidade de água evapotranspirada em uma superfície natural totalmente coberta por vegetação rasteira, em fase de crescimento ativo, cujo teor de umidade do solo esteja próximo da capacidade de campo. Por sua vez, a *Evapotranspiração Real (ETr)* é a quantidade de água evapotranspirada em uma superfície natural, sob condições normais, isto é, sem a obrigação da observância dos fatores essenciais para a ETp. Isso leva a conclusão que a ETr é menor, ou no máximo, igual À ETp.

Segundo Pereira *et al.* (1997), a medida direta de evaporação exige a utilização de um reservatório (tanque) onde o nível da água possa ser medido com precisão. A diferença das alturas dos níveis da água em dias consecutivos indica o total evaporado no período. Em virtude da facilidade de medida da evaporação em tanques, esta tem sido utilizada para estimar a evaporação de lagos e até mesmo de culturas, admitindo assim a existência de correlação positiva entre estas medidas. A medida direta da evapotranspiração é extremamente difícil e onerosa, pois exige instalações e equipamentos especiais de alto custo, justificando-se somente em condições experimentais. Porém, é desta forma que diversos métodos indiretos para determinação de medidas de evapotranspiração, são calibrados.

Estimativas da Evapotranspiração

Existem inúmeros métodos de estimativa da evapotranspiração, baseando-se em diferentes premissas conceituais e tipos de dados. Alguns métodos têm aceitação quase que unânime, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados. Evapotranspiração é um assunto simples do ponto de vista teórico porém, no lado prático das medições, torna-se bastante complexo. De acordo com os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, tais métodos podem ser agrupados em cinco categorias, segundo Pereira *et al.* (1997), ou seja: empíricos, aerodinâmicos, balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões.

Empirismo não é sinônimo de falta de qualidade. Muitos métodos desenvolvidos e calibrados localmente produzem melhores resultados do que aqueles mais genéricos e fisicamente mais reais. Métodos empíricos são resultantes de correlações entre a evapotranspiração medida em condições padronizadas e os elementos meteorológicos medidos em postos também padrões. Alguns desses métodos tem aplicação quase universal. Por exemplo, o método do Tanque Classe A, comumente usado em projetos de irrigação, foi desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Norte Americano e é constituído de um tanque cilíndrico de ferro galvanizado com 1,21 m de diâmetro e 0,255 m de profundidade, onde a evaporação ocorrida num determinado intervalo de tempo é medida e correlacionada à evapotranspiração da cultura de interesse.

Os métodos aerodinâmicos são considerados micrometeorológicos, com embasamento teórico da dinâmica dos fluídos e transporte turbulento. Isso porque o escoamento atmosférico acima de uma superfície natural rugosa é predominantemente turbulento, onde existe mistura contínua na camada de ar que interage com a superfície. Na prática são pouco usados.

Os métodos de balanço de energia consideram a interações dos diversos tipos de energia com a superfície. Em condições atmosféricas normais, o suprimento principal de energia para a superfície é dado pela radiação solar. Em função do comprimento das ondas dos raios solares, a radiação solar é denominada de *ondas curtas* (OC). O símbolo (OC↓) significa que a radiação solar incide sobre a superfície, representando entrada de energia. Parte da radiação incidente é refletida (OC↑), de acordo com o poder refletor (r) da superfície. Portanto, num dado instante

ou período, o saldo de radiação de ondas curtas (BOC - balanço de ondas curtas), é dado por:

$$\text{BOC} = \text{OC}\downarrow - \text{OC}\uparrow = \text{OC}\downarrow (1 - r)$$

Outra fonte de energia radiante para a superfície é a radiação emitida pela atmosfera, que em função de sua baixa temperatura, torna os comprimentos de onda, relativamente longos em relação à radiação solar e, por isso, denominada de ondas longas (OL↓). A superfície também emite radiação de ondas longas (OL↑) em função de sua temperatura. Logo, estabelece-se um balanço de radiação de ondas longas (BOL).

$$\text{BOL} = \text{OL}\downarrow - \text{OL}\uparrow$$

Portanto, o saldo total de radiação da superfície (**R_n** - do inglês *net radiation*) é dado por:

$$\text{R}_n = \text{OC}\downarrow (1 - r) + (\text{OL}\downarrow - \text{OL}\uparrow)$$

Cada termo dessa equação pode ser medido isoladamente com radiômetros e solarímetros. O mais comum é a medida integral de R_n com saldo-radiômetros. Para o presente estudo, dois métodos de cálculo da evapotranspiração foram utilizados para fornecer variáveis ambientais para modelagem posterior do crescimento florestal. O método empírico desenvolvido por Thornthwaite e o método de Penman, classificado como método combinado, os quais serão detalhados à seguir.

Estimativa da Evapotranspiração pelo método de Thornthwaite-Mather

O método de Thornthwaite foi desenvolvido inicialmente para estimativa da evapotranspiração potencial (ET_p) mensal de um gramado (posto meteorológico)

como um elemento climatológico, visando classificação climática. Neste contexto, ETp é tida como igual a "chuva ideal" para que uma região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano. Pereira *et al.* (1997) afirmam que o conjunto de equações desenvolvido por Thornthwaite foi baseado em balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração realizadas em lisímetros (aparelho para medição da umidade do solo) e utiliza apenas a temperatura do ar como variável independente. A evapotranspiração potencial média mensal padrão (ETPp, mm.mes⁻¹) para um mês de 30 dias, a cada 12 horas de fotoperíodo, foi representada pelo conjunto de equações:

$$\begin{aligned} \text{ETPp} &= 16 (10 T_i / I)^a & T_i > 0^\circ\text{C} \\ a &= 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} + 0,49239 \\ I &= \Sigma(0,2 T_i)^{1,514} & T_i > 0^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Em que T_i é a temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$), I é o índice de calor da região e o subscrito i representa o mês do ano ($i=1$, jan; $i=2$, fev, etc). Para estimar a evapotranspiração potencial mensal (ETp, mm.mês⁻¹) para um mês de ND dias e fotoperíodo médio mensal N , há necessidade de se ajustar ETPp multiplicando-a por fatores de correções, isto é:

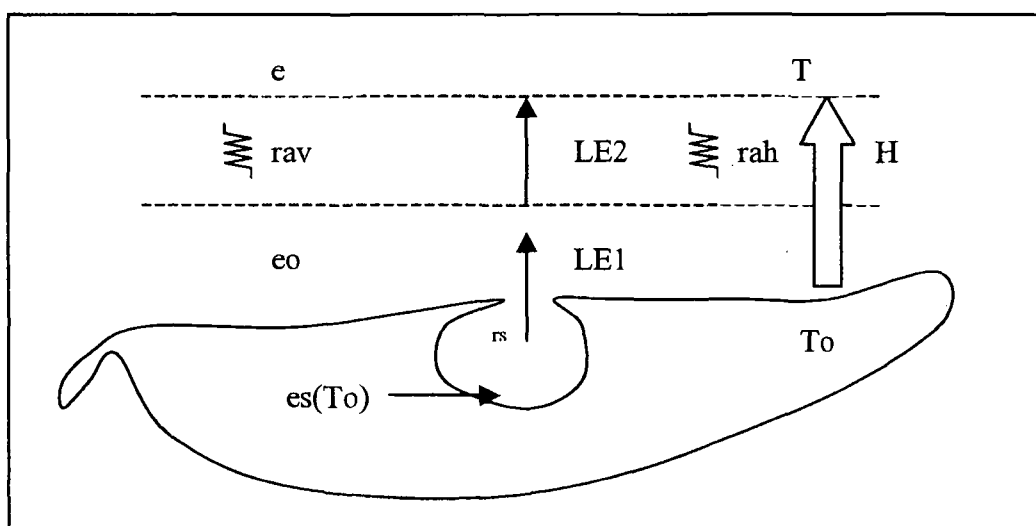
$$\text{ETP} = \text{ETPp} \cdot N/12 \cdot ND/30$$

Estimativa da Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith

Os métodos combinados levam em consideração os efeitos do balanço de energia com aqueles do poder evaporante do ar, ou seja, são baseados em princípios físicos corretos. O método de Penman foi o primeiro dessa categoria, sendo considerado por muitos como padrão. Os demais métodos combinados são aproximações e extensões desse método. Aliás, por inúmeras aproximações adotadas no seu desenvolvimento ele também se torna empírico. Segundo Pereira *et al.* (1997), esse método supõe que a vegetação (dossel) seja representada por uma enorme folha (teoria da "big leaf") e isso implica em assumir que todas as folhas estão expostas às mesmas condições ambientais, embora essa não seja a condição

real. Essa é a premissa necessária para se obter a "resistência do dossel" (r_c) à difusão do vapor d'água, ou seja, admite-se um valor médio efetivo que seja representativo do dossel, e que por sua vez, determina uma "transpiração média". Nessas condições, o dossel está a uma temperatura T_o , com pressão de vapor $e_s\{T_o\}$. Adjacente à folhona existe uma camada superficial de ar que está também com temperatura T_o , mas com pressão de vapor e_o , e isto induz uma transpiração. Imediatamente acima desta camada, o ar está com temperatura T e pressão de vapor e . Portanto existe uma resistência do ar ao transporte de vapor (r_{av}) que determina uma densidade de fluxo transpirativo. Pela diferença de temperatura entre o dossel e o ar há transporte de calor sensível (H) que também é governando pela resistência do ar (r_{ah}). A Figura 2 é uma representação esquemática dessa situação.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA TEORIA DA "BIG LEAF".



O conjunto de equações para cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman e que inclui os componentes aerodinâmicos e do balanço de energia, é apresentado abaixo.

$$LE = \frac{\Delta(R_n - S) + \rho_a C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}$$

Em que, LE é o fluxo de calor latente de evaporação ($\text{kJ m}^2 \text{s}^{-1}$); Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é a radiação líquida ($\text{kJ m}^2 \text{s}^{-1}$), S é o fluxo de calor no solo ($\text{kJ m}^2 \text{s}^{-1}$), que em valores médios diário foi considerado como zero; ρ_a é a densidade do ar (kg m^{-3}); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); C_p é o calor específico do ar ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor (kPa); r_a e r_c são as resistências aerodinâmicas e da cultura, respectivamente, dadas em (s m^{-1}).

Os dados meteorológicos, necessários aos cálculos do saldo de radiação, e_s , e_a , C_p , ρ_a e Δ , foram obtidos das estações meteorológicas automáticas listadas na Tabela 9, as quais obtêm dados horários com transmissão em tempo real. Para efetivação dos cálculos os dados horários foram agrupados em valores diários por soma ou média. Os dados de radiação diária obtidos nas estações automáticas, dizem respeito aos valores diurnos, quando a incidência dos raios solares é maior, conforme metodologia adotada na Aracruz Celulose SA.

Para obter a resistência aerodinâmica (r_a), foi utilizada equação descrita por Brutsant, citada por Sacramento Neto (2001):

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{0m}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{0h}}\right]}{k^2 U_z}$$

$$z_{0m} = 0.123hc$$

$$z_{0e} = 0.1z_{0m}$$

$$d = \frac{2}{3}hc$$

Em que, z_m é a altura em que será medida a velocidade do vento (m), d é o deslocamento do plano zero do perfil do vento (m), z_{0m} é o parâmetro de rugosidade para momentum (m), hc é a altura da cultura, k é a constante de von Karman (0,41), U_z é a velocidade do vento medida à altura z_m (s m^{-1}), z_h é a altura da medida da umidade do ar, z_{0e} é o parâmetro de rugosidade para calor sensível e vapor d'água (m).

A resistência da cultura é dada pelo inverso da condutância estomática (ao nível da folha) multiplicada pelo índice de área foliar (IAF) do povoamento. A condutância estomática (g_s), foi estimada pela equação dada por Mielke & Penchel (2000) desenvolvidas para os plantios clonais de eucalipto da mesma região do estudo, e com a seguinte formulação:

$$g_s = 687,8 \cdot e^{-0,74 \cdot (e_s - e_a)}$$

Em que:

g_s = condutância estomática (kPa)

$e_s - e_a$ = défict de pressão de vapor (kPa)

O índice de área foliar do povoamento indica a relação entre peso de folha por unidade de área (kg.m^{-2}). Para sua estimativa, duas equações foram necessárias. Primeiramente, utilizou-se uma função ajustada a dados de amostragem destrutiva de 767 árvores que tiveram sua massa foliar seca determinada e relacionada à parâmetros da árvore e do povoamento (Fonseca, 2002), dada por:

$$MS = (-4,577 - 1,2502 \cdot Id + 5,4094 \cdot Id^{0,5} + 0,41647 \cdot \frac{Ht}{Id}) \cdot N$$

Em que:

MS = massa seca foliar em Kg/ha

Id = idade do povoamento em anos

Ht = altura total média do povoamento em metros

N = número de árvores por hectare

R² = 22% e EPE = 1,15 kg.ha^{-1} ou 43,6%

Embora o ajuste tenha apresentado baixo coeficiente de determinação e grande dispersão dos dados estimados, todas as variáveis independentes apresentaram significância estatística ao nível de 95% de probabilidade e a análise de variância da regressão também atestou significância do modelo.

Modelo para Altura Média

Para os cálculos de evapotranspiração pelo método de Penman, a estimativa da altura da cultura é necessária para o cálculo da resistência aerodinâmica do ar. Assim, foi ajustado um modelo que estima a altura média das árvores em função de uma medição de altura num determinado momento da vida do povoamento, e dado por:

$$Hc_2 = Hc_1 \cdot \left(\frac{1 - e^{incl \cdot Id_2}}{1 - e^{incl \cdot Id_1}} \right)^{inf}$$

Em que:

Hc_1 = altura média na idade Id_1

Id_1 = idade de medição de Hc_1

Id_2 = idade em que se deseja estimar Hc_2

Hc_2 = altura média da cultura na idade Id_2

$incl$ = -0,3404

inf = 1,2359

Em complementação, utilizou-se uma função baseada também em dados de amostragem destrutiva de 63 árvores de plantios clonais de eucalipto na mesma região do estudo, a qual relaciona a área foliar ao seu peso em função da idade, e dada por:

$$CSE = 10,8994 + 2,1252 \cdot \ln\left(\frac{1}{Id}\right)$$

Em que:

CSE = coeficiente de superfície específica ($m^2 \cdot kg^{-1}$)

Id = idade do povoamento em anos

R^2 = 40,4% e EPE = 0,90 $m^2 \cdot kg^{-1}$ ou 10,7%

Finalmente, o índice de área foliar é obtido pela multiplicação MS x CSE e dividido por 10.000 para conversão de hectare para metro quadrado. A unidade resultante de IAF expressa a área de folha (em m²) por unidade de área de superfície (em m²).

Por fim, a resistência do dossel é dada por:

$$r_d = \frac{1}{\frac{C_e}{1000} \frac{IAF}{V_o \frac{T}{T_o} \frac{P_o}{P}}}$$

Em que:

r_d = resistência do dossel (s.m⁻¹)

IAF = índice de área foliar (m².m⁻²)

V_o = volume molar do ar para T_o e P_o (m³.mol⁻¹)

T = temperatura média do ar (K)

P_o = pressão atmosférica de referência = 1.000 kPa

P = pressão atmosférica local (kPa)

Os parâmetros da equação de Penman foram calculados através das seguintes expressões matemáticas:

Pressão de Vapor de Saturação (e_a), em kPa,

$$e_a = 0,6108 \exp \frac{17,27T}{T + 237,3}$$

Em que,

T = temperatura média diária, dada em °C.

Pressão Parcial de Vapor (e_d), em kPa,

$$e_d = \frac{e_a UR}{100}$$

Em que,

UR = umidade relativa média diária, dada em %.

Déficit de Pressão de Vapor (DPV), em kPa,

$$DPV = e_a - e_d$$

Declividade da Curva de Saturação (Δ), em kPa °C⁻¹,

$$\Delta = \frac{4098e_a}{(T + 237,3)^2}$$

Calor Latente de Evaporação (λ), em MJ kg⁻¹,

$$\lambda = 2,501(2,361 \times 10^{-3})T$$

Constante Psicrométrica (γ), em kPa °C⁻¹,

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda}$$

Em que,

P = pressão atmosférica dada, em kPa.

Calor Específico do Ar Úmido (C_p), em MJ kg K⁻¹,

$$C_p = \frac{1005}{10^6}$$

Temperatura Absoluta (T_k), em K,

$$T_k = 273,16 + T$$

Temperatura Virtual (T_{kv}), em K,

$$T_{kv} = T_k \left(1 - 0,378 \frac{e_d}{P} \right)^{-1}$$

Pressão atmosférica (P), em kPa,

$$P = P_o \left(\frac{T - r(z - z_o)}{T} \right)^{\frac{g}{rR}}$$

Em que:

P_o = Pressão atmosférica no nível do mar = 101,325 kPa

T = temperatura medida no topo da torre em K

r = razão adiabática para o ar saturado. = 0.0065

z = altitude do local em metros

z_o = altitude de medidas em metros

g = aceleração da gravidade = 9,8 m.s⁻²

R = constante específica do gas = 287 J kg⁻¹ K⁻¹

Densidade Absoluta do Ar (ρ_a), em kg m⁻³,

$$\rho_a = 3,486 \frac{P}{T_{kv}}$$

Saldo de Radiação de Ondas Curtas (B_{oc}), em MJ m⁻² d⁻¹,

$$B_{oc} = (1 - \alpha)R_i$$

Em que,

α = albedo, assumido como 0,23

R_i = radiação incidente na superfície dada, em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$,

Declinação Solar (δ), em graus

$$\delta = 23,45 \text{Sen} \left(\frac{360}{365} (284 + j) \right)$$

Em que,

j = dia juliano

Ângulo Horário (H), em radianos,

$$H = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

Em que,

ϕ = latitude dada, em graus.

Duração Total do Fotoperíodo (N), em horas,

$$N = \frac{2H}{15}$$

Distância Relativa Terra-Sol (D), que é adimensional,

$$\left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos X + 0.001280 \text{sen} X + 0.000719 \cos^2 X + 0.000077 \text{sen}^2 X$$

$$X = (nj - 1) \frac{360}{365}$$

Numero de horas de brilho solar, em horas:

$$n = \frac{\left(\frac{R_s}{R_a} - a \right) N}{b}$$

Em que:

R_a = radiação solar no topo da atmosfera, em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$,

R_s = radiação solar na superfície (estação), em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$,

$a = 0,29 \times \cos$ (latitude)

b = constante 0,52

N = duração do fotoperíodo

Radiação Solar Incidente no Topo da Atmosfera (R_a), $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$,

$$R_a = 37,586D(H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H)$$

Saldo de Radiação de Ondas Longas (Bol), em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$,

$$Bol = 4,8989 \times 10^9 T^4 (0,09 \sqrt{e_a} - 0,56) (0,1 + 0,9n/N)$$

Em que,

T = temperatura do ar dada, em K,

Saldo de Radiação (R_n), em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$,

$$R_n = Boc + Bol$$

Adotou-se que o valor da radiação fotossinteticamente ativa era de 50% da radiação líquida (R_n).

Por fim, a Evapotranspiração Real (E_{Tr}) é obtida por:

$$E_{Tr} = LE / \lambda$$

ANEXO II
CÁLCULOS DE BALANÇO HÍDRICO

MÉTODO EMPÍRICO DE THORNTHWAITE-MATHER

Estimativa da Evapotranspiração Potencial

O método de Thornthwaite-Mather para estimativa da evapotranspiração potencial leva em conta a precipitação mensal e a temperatura média mensal local, e a seguir, é apresentado um exemplo de como foi efetuada essa inferência. Selecionou-se, então, um talhão florestal localizado no Município de São Mateus, no Estado do Espírito Santo e próximo da estação meteorológica Queixada, com latitude 18°.23'35" Sul, sendo que para o ano de 1999 as precipitações mensais e temperaturas médias são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 - PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA MÉDIA MENSAIS PARA A ESTAÇÃO DE QUEIXADA NO ANO DE 1999

Mês	Precipitação (mm)	Temperatura Média (°C)
Janeiro	45	26,0
Fevereiro	11	26,1
Março	149	25,6
Abril	65	24,4
Mai	8	22,5
Junho	44	22,2
Julho	231	21,5
Setembro	41	20,5
Agosto	43	21,9
Outubro	65	21,8
Novembro	377	22,8
Dezembro	236	24,6

A partir das equações encontradas no ANEXO I, calculou-se o índice de calor (I), o valor de "a" e a evapotranspiração potencial do local, conforme sequência abaixo:

Cálculo do índice de calor (I):

$$I = \sum (0,2 T_i)^{1,514}$$

$$I = (0,2 \times 26,0)^{1,514} + (0,2 \times 26,1)^{1,514} + (0,2 \times 25,6)^{1,514} + \dots + (0,2 \times 24,6)^{1,514}$$

$$I = 123,8432$$

Cálculo de a:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times 123,8432^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times 123,8432^2 + 1,7912 \times 10^{-2} \times 123,8432 + 0,49239$$

$$a = 2,810272$$

Cálculo da Evapotranspiração:

$$ETP_p = 16 \times (10 T_i / I)^a$$

$$ETP_p \text{ jan} = 16 \times (10 \times 26,0 / 123,8432)^{2,810272} = 128,62 \text{ mm.mes}^{-1}$$

$$ETP_p \text{ fev} = 16 \times (10 \times 26,1 / 123,8432)^{2,810272} = 130,02 \text{ mm.mes}^{-1}$$

$$ETP_p \text{ mar} = 16 \times (10 \times 25,6 / 123,8432)^{2,810272} = 129,29 \text{ mm.mes}^{-1}$$

... e repete-se esse procedimento para todos os meses.

A evapotranspiração potencial mensal deve ser, então, corrigida em função da latitude do local e da época do ano, que se traduz em diferentes fotoperíodos e número de dias do mês considerado, conforme a Tabela 2 de fatores de correção para latitude 20° Sul.

TABELA 2 - FATORES DE CORREÇÃO DA ETP PARA AJUSTÁ-LA AO NÚMERO DE DIAS E AO FOTOPERÍODO PARA AS LATITUDES PRÓXIMAS A 20° SUL

Mês	Correção Tabelar (1)	Número de dias (2)	Fator de Correção (1) x (2)
Janeiro	1,14	31	35,34
Fevereiro	1,00	29	29,00
Março	1,05	31	32,55
Abril	0,97	30	29,10
Mai	0,96	31	29,76
Junho	0,91	30	27,30
Julho	0,95	31	29,45
Agosto	0,99	31	30,69
Setembro	1,00	30	30,00
Outubro	1,08	31	33,48
Novembro	1,09	30	32,70
Dezembro	1,15	31	35,65

Fonte: Pereira et al (1997) - pág 173

E finalmente, a evapotranspiração potencial mensal corrigida (ETp) é dada pela multiplicação da evapotranspiração potencial não corrigida pelo Fator de Correção da Tabela 2, dividido pelo número de dias de cada mês.

Cálculo da ETp mensal corrigida:

$$ETp \text{ jan} = 128,62 \times 35,34 / 31 = 146,63 \text{ mm.mes}^{-1} \text{ ou } 4,73 \text{ mm.dia}^{-1}$$

$$ETp \text{ fev} = 130,02 \times 29,00 / 29 = 130,02 \text{ mm.mes}^{-1} \text{ ou } 4,48 \text{ mm.dia}^{-1}$$

$$ETp \text{ mar} = 129,29 \times 29,00 / 29 = 129,29 \text{ mm.mes}^{-1} \text{ ou } 4,17 \text{ mm.dia}^{-1}$$

... e assim por diante para os demais meses.

Calculo do Balanço Hídrico

Para se calcular o balanço hídrico de um determinado período é necessário que a data de início da contabilização entre precipitação e evapotranspiração se inicie num período anterior, suficiente para que em algum momento a quantidade de chuva tenha sido superior ao valor da capacidade de água disponível no solo. Dessa forma se confere uma segurança aos valores obtidos nos cálculos. Para o presente

estudo, o balanço hídrico foi iniciado 6 meses antes do plantio, quando se produziu valores para análise do índice de sítio e, na data do plantio, para a análise do incremento em altura dominante. No primeiro caso, o período anterior foi de 182 dias e no segundo de no mínimo 365 dias antes da do intervalo de tempo de interesse.

Como exemplo, a Tabela 3 apresenta uma seqüência fictícia de precipitação pluviométrica diária para os primeiros 10 dias do mês, a qual permite a apresentação dos cálculos do balanço hídrico pelo método empírico de Thornthwaite.

TABELA 3 - PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DIÁRIA NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA QUEIXADA EM MARÇO DE 1999

Dia	Precipitação Pluviométrica (mm) *
1	60
2	30
3	2
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0

* dados fictícios usados somente para exemplificação da metodologia

Supondo que exista um povoamento de eucalipto de 1 ano de idade e cuja profundidade de raiz, estimada pela eq (1) seja de 70 cm, e para as condições físicas de solo do local, resulte numa estimativa de uma capacidade de água disponível (CAD) de 56 mm. Nessas condições, os cálculos do balanço hídrico diário seguem a seguinte seqüência:

a) Cálculo da diferença diária entre precipitação e evapotranspiração potencial (P-ET_p)

$$\text{Dia 1} = 60 - 4,17 = + 55,83 \text{ mm}$$

$$\text{Dia 2} = 30 - 4,17 = + 25,83 \text{ mm}$$

$$\text{Dia 3} = 2 - 4,17 = - 2,17 \text{ mm}$$

$$\text{Dia 4} = 0 - 4,17 = - 4,17 \text{ mm}$$

$$\text{Dia 5} = 0 - 4,17 = - 4,17 \text{ mm}$$

... e assim por diante.

b) Cálculo simultâneo da água armazenada no solo (ARM) e do negativo acumulado (NEG ACUM)

O negativo acumulado somente deve ter os cálculos iniciados no primeiro dia após um período de valores positivos de P-ETP, cuja soma seja maior ou igual a CAD. Nesse dia, o valor do NEG ACUM será igual ao valor negativo de P-ETP. Com esse valor, calcula-se o valor da coluna ARM, através da equação:

$$ARM = CAD \cdot e^{\frac{NEG \ ACUM}{CAD}}$$

Se o próximo dia também estiver com P-ETP positivo, procede-se da seguinte maneira:

b1) soma-se o valor positivo de P-ETP ao ARM do dia anterior obtendo-se o ARM do dia em questão;

b2) com esse valor de ARM obtém-se o valor correspondente de NEG ACUM através do inverso da equação acima, ou seja:

$$NEG \ ACUM = CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right)$$

* o valor de ARM não pode ser maior que CAD

Dia 1:

$$NEG \ ACUM = 0 \text{ mm}$$

$$ARM = 56 \cdot e^{\frac{0}{56}} = 56 \text{ mm}$$

Dia 2:

$$\text{NEG ACUM} = 0 \text{ mm}$$

$$\text{ARM} = 56 \cdot e^{\frac{0}{56}} = 56 \text{ mm}$$

Dia 3:

$$\text{NEG ACUM} = -2,17 \text{ mm}$$

$$\text{ARM} = 56 \cdot e^{\frac{-2,17}{56}} = 53,87 \text{ mm}$$

Dia 4:

$$\text{NEG ACUM} = -4,17 + (-2,17) = -6,34 \text{ mm}$$

$$\text{ARM} = 56 \cdot e^{\frac{-6,34}{56}} = 50,01 \text{ mm}$$

... e assim por diante.

c) Cálculo da alteração (ALT) no armazenamento de água no solo (ARM), que é a diferença entre o ARM do dia em questão e o ARM do dia anterior.

DIA 1: (depende do dia anterior. mas para efeito didático assumir que ARM=56)

$$\text{ALT} = 56 - 56 = 0 \text{ mm}$$

Dia 2:

$$\text{ALT} = 56 - 56 = 0 \text{ mm}$$

Dia 3:

$$\text{ALT} = 53,87 - 56 = -2,13 \text{ mm}$$

Dia 4:

$$\text{ALT} = 50,01 - 53,87 = -3,87 \text{ mm}$$

.... e assim por diante.

d) Cálculo da evapotranspiração (ETr) real.

Quando $P - ET_p > 0$ então $ETr = ET_p$. Do contrário, $ETr = P + |ALT|$

Dia 1:

$$ETr = 4,17 \text{ mm (pois } P-ETp > 0)$$

Dia 2:

$$ETr = 4,17 \text{ mm (pois } P-ETp > 0)$$

Dia 3:

$$ETr = 2 + |-2,13| = 4,13 \text{ mm}$$

Dia 4:

$$ETr = 0 + |-3,87| = 3,87 \text{ mm}$$

... e assim por diante.

e) Cálculo do défict hídrico (DEF) e do excedente hídrico (EXC)

O défict é a diferença entre ETp e ETr . O excesso, por sua vez, é igual a zero, quando $ARM < CAD$ e igual a $(P-ETp) - ALT$, quando $ARM = CAD$.

Dia 1:

$$DEF = 4,17 - 4,17 = 0 \text{ mm}$$

$$EXC = 55,83 - 0 = 55,83 \text{ mm}$$

Dia 2:

$$DEF = 4,17 - 4,17 = 0 \text{ mm}$$

$$EXC = 25,83 - 0 = 25,83 \text{ mm}$$

Dia 3:

$$DEF = 4,17 - 4,13 = 0,04 \text{ mm}$$

$$EXC = 0 \text{ mm (pois } ARM < CAD)$$

Procedendo dessa forma, cada medição de parcela de inventário teve o seu balanço hídrico calculado e os valores das variáveis foram computados mensalmente, por soma ou média, conforme já apresentado na Tabela 8.

MÉTODO COMBINADO DE PENMAN-MONTEITH

Estimativa da Evapotranspiração Real

A metodologia de Penman-Monteith considera o balanço de energia solar no sistema, bem como aspectos da resistência às trocas gasosas com o meio, configurando-se como um método conceitualmente mais robusto para estimativa da evapotranspiração. No entanto, a necessidade de sub-modelos para estimativa de eventos ao nível da planta, como por exemplo, para estimar a condutância dos estômatos das folhas e, também, para inferir sobre o índice de área foliar do povoamento, nivelam o método de Penman às capacidades preditivas de cada um desses sub modelos. Via de regra necessita-se, por exemplo, de intensa coleta de dados ecofisiológicos o que, além do alto custo dos aparelhos envolvidos, exige conhecimento específico em fisiologia de plantas e modelagem. Ao se utilizar a metodologia de Penman para cálculo da evapotranspiração real (E_{Tr}) não se produziu valores coerentes, traduzidos por valores de $E_{Tr} > E_{Tp}$. Uma solução alternativa foi a de se estimar a evapotranspiração potencial, assumindo um déficit pressão de vapor nulo o que anula a resistência da cultura e, através da metodologia empírica de Thornthwaite, obteve-se a estimativa da evapotranspiração real.

A seguir é dado um exemplo de aplicação da metodologia de Penman para cálculo da evapotranspiração potencial. Uma vantagem desse método é o de poder estimar a E_{Tr} ou E_{Tp} para intervalo de semanas, dias ou mesmo horas, dependendo da base de dados meteorológicos disponíveis.

Assumindo como exemplo a mesma estação meteorológica usada no item anterior (Thornthwaite) para um povoamento clonal de eucalipto que quando foi mensurado pela última vez contava com 2 anos de idade, altura média mensurada de 12 m com 1.005 árvores por hectare as informações necessárias para os cálculos da evapotranspiração pelo método de Penman encontram-se abaixo. Como exemplo, será apresentado o cálculo da evapotranspiração real, embora no estudo tenha sido calculada a evapotranspiração potencial.

- Latitude = 18° 23' 35"

- Dia = 1 de março
- Dia juliano = 60
- Umidade Relativa do Ar = 93,3%
- Temperatura média = 24,0 °C
- Temperatura máxima = 29,5 °C
- Temperatura mínima = 22,2 °C
- Radiação Solar na superfície (estação) = 12,3 MJ m⁻² d⁻¹
- Velocidade do Vento na altura do sensor = 2,9 m.s⁻¹
- Altitude do local = 38 metros
- Altura dos sensores da estação = 45 metros
- α = 0,23 (albedo ou reflexão de floresta)
- idade atual do povoamento = 3 anos

A seguir é exemplificado o cálculo da evapotranspiração potencial para o dia 1º de março de 1999.

a) Pressão de Vapor de Saturação (e_a)

$$e_a = 0,6108 * \exp (17,27 * 24 / (24+237,3))$$

$$e_a = 2,9839 \text{ kPa}$$

b) Pressão Parcial de Vapor (e_d)

$$e_d = 2,9839 * 93,3 / 100$$

$$e_d = 2,7839 \text{ kPa}$$

c) Déficit de Pressão de Vapor (DPV)

$$\text{DPV} = 2,9839 - 2,7839$$

$$\text{DPV} = 0,1999 \text{ kPa}$$

d) Declividade da Curva de Saturação (Δ)

$$\Delta = 4098 * 3,5653 / (24 * 237,3)^2$$

$$\Delta = 0,000377 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

e) Calor Latente de Evaporação (λ)

$$\lambda = 2,501 (2,361 \times 10^{-3}) \times 24$$

$$\lambda = 2,443 \text{ MJ kg}^{-1}$$

f) Pressão atmosférica (P)

$$P = 101,325 * (((24 \times 237,3) - 0,0065(-45))/(24+237,3))^{(9,8/(0,0065 \times 287))}$$

$$P = 101,9223 \text{ kPa}$$

g) Constante Psicométrica (γ)

$$\gamma = 0,0016286 \times 101,9223 / 2,443$$

$$\gamma = 0,0679 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

h) Temperatura Absoluta (T_k)

$$T_k = 273,16 + 24$$

$$T_k = 297,16 \text{ K}$$

i) Temperatura Virtual (T_{kv})

$$T_{kv} = 297,16 (1 - 0,378 \times 3,3265/101,9223)^{-1}$$

$$T_{kv} = 300,8718 \text{ K}$$

j) Densidade Absoluta do Ar (ρ_a)

$$\rho_a = 3,486 \times 101,9223 / 300,8718$$

$$\rho_a = 1,1809 \text{ Kg.m}^{-3}$$

l) Saldo de Radiação de Ondas Curtas (BOC)

$$\text{BOC} = (1 - 0,23) \times 12,3$$

$$\text{BOC} = 9,471 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$$

m) Declinação Solar (δ)

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} (180/\pi \times 360/365(284+60))$$

$$\delta = -8,2937 \text{ graus}$$

n) Ângulo Horário (H)

$$H = \arccos(-\tan(-18.3833 * \pi/180) * \tan(-8,2937 * \pi/180)) * 180/\pi$$

$$H = 92,77 \text{ graus}$$

o) Duração Total do Fotoperíodo (N)

$$N = 2 * 92,77 / 15$$

$$N = 12,37 \text{ horas}$$

p) Distância Relativa Terra-Sol (D)

$$D = 1,0341 \text{ (adimensional)}$$

q) Radiação Solar Incidente no Topo da Atmosfera (R_a)

$$R_a = 37,6 * 1,0341 * (92,77 * \pi/180 * \text{SEN}(-18.3833 * \pi/180) * \text{SEN}(8,3927 * \pi/180) + \text{COS}(-18.3833 * \pi/180) * \text{COS}(8,2937 * \pi/180) * \text{SEN}(92,77 * \pi/180))$$

$$R_a = 39,33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

r) Número de horas de Brilho Solar,

$$n = (12,3/39,33 - 0,29 * \cos(-18.3833 * \pi/180)) * 12,37 / 0,52$$

$$n = 0,91 \text{ horas}$$

s) Balanço de Radiação de Ondas Longas (BOL)

$$\text{BOL} = - (0,9 * 0,9106 / 12,37 + 0,1) * (0,34 - 0,14 * 2,7839^{0,5}) * 4,903 * 10^{-9} * (29,5^4 + 22,2^4) / 2$$

$$\text{BOL} = -0,000043 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

t) Balanço de Radiação de Ondas Curtas (BOC)

$$\text{BOC} = (1 - 0,23) * 12,3$$

$$\text{BOC} = 9,471 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

u) Saldo de Radiação Líquida (R_n)

$$R_n = 9,471 - 0,000043$$

$$R_n = 9,471 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

v) Altura da Cultura (h_c)

$$H_c = 12 * (((1 - \text{EXP}(-0,34204 * 3)) / (1 - \text{EXP}(-0,34204 * 2))))^{1,2359}$$

$$H_c = 16,5 \text{ m}$$

x) Comprimento de Rugosidade da Cultura para Transporte de Momentum

$$Z_{om} = 0,123 * 16,5$$

$$Z_{om} = 2,0316 \text{ metro}$$

z) Comprimento de Rugosidade para o Transporte de Vapor e Calor Sensível (Z_{oh})

$$Z_{oh} = 0,1 * 2,0316$$

$$Z_{oh} = 0,20316 \text{ metros}$$

aa) Deslocamento do Plano Zero (d)

$$d = 2/3 * 16,5$$

$$d = 11,0 \text{ metros}$$

ab) Resistência Aerodinâmica (r_a)

$$r_a = (\text{LN}((45-11)/2,0295) * \text{LN}((45-11)/0,2030)) / (0,41^2 * 2,9)$$

$$r_a = 29,60 \text{ s m}^{-1}$$

ac) Condutância estomática (g_s)

$$g_s = 687,8 * \exp(-0,74 * 0) / 1000$$

$$g_s = 0,6878 \text{ m s}^{-1}$$

*** considerou-se DPV= 0 para cálculo da ETp

ad) Número de árvores na idade Id2 (N_2)

$$N_2 = 1005 * \text{EXP}(-((3-2)/0,15896))^{0,001204}$$

$$N_2 = 997 \text{ arvores.ha}^{-1}$$

ae) Coeficiente de Superfície Específica (CSE)

$$\text{CSE} = 10,994 + 2,1252 * \text{LN}(1/3)$$

$$\text{CSE} = 8,55 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$$

af) Matéria Seca de Folhas (MS)

$$MS = (-4,577 - 1,2502 \cdot 3 + 5,4094 \cdot 3^{0,5}) + 0,41647 \cdot (16,5/3) \cdot 997$$

$$MS = 3323 \text{ kg.ha}^{-1}$$

ag) Índice de Área Foliar (IAF)

$$IAF = 8,55 \times 3323 / 10000$$

$$IAF = 2,84 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$$

ah) Resistência do dossel da Cultura (r_c)

$$r_c = 1/0,6878 \cdot 2,84$$

$$r_c = 0,5119 \text{ m.s}^{-1}$$

ai) Calor Latente de Evaporação (LE)

$$LE = (0,0045 \cdot 9,471 + 86400 \cdot 1,1809 \cdot 0,001005 \cdot 0,2389/29,6) / (0,0045 + 0,0679 \cdot (1 + 0,5119/29,6))$$

$$LE = 11,82 \text{ kJ m}^2.\text{d}^{-1}$$

aj) Evapotranspiração ET

$$ET = 11,82/2,4443$$

$$ET = 4,84 \text{ mm}$$