

DANY ROBERTA MARQUES CALDEIRA

**AVALIAÇÃO MULTIREGIONAL DO MODELO 3-PG E SIMULAÇÃO DE
PRODUTIVIDADE DE EUCALIPTO PARA O ESTADO DE RONDÔNIA**

Botucatu

2019

DANY ROBERTA MARQUES CALDEIRA

**AVALIAÇÃO MULTIREGIONAL DO MODELO 3-PG E SIMULAÇÃO DE
PRODUTIVIDADE DE EUCALIPTO PARA O ESTADO DE RONDÔNIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutora em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Stape

Coorientadores: Dr. Clayton Alcarde
Alvares e Prof. Dr. Iraê Amaral Guerrini

Botucatu

2019

C146a

Caldeira, Dany Roberta Marques

Avaliação multiregional do modelo 3-PG e simulação de produtividade de eucalipto para o estado de Rondônia / Dany Roberta Marques Caldeira. -- Botucatu, 2019

97 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: José Luiz Stape

Coorientador: Clayton Alcarde Alvares; Iraê Amaral Guerrini

1. Modelo baseado em processos. 2. Produtividade florestal. 3. Gradiente ambiental. 4. Ecofisiologia. 5. Modelo 3-PG. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte”



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: AVALIAÇÃO MULTIRREGIONAL DO MODELO 3-PG E SIMULAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE EUCALIPTO PARA O ESTADO DE RONDÔNIA

AUTORA: DANY ROBERTA MARQUES CALDEIRA
ORIENTADOR: JOSE LUIZ STAPE
COORIENTADOR: IRAÊ AMARAL GUERRINI
COORIENTADOR: CLAYTON ALCARDE ALVARES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:

Pesquisador Dr. CLAYTON ALCARDE ALVARES
Tecnologia Florestal / Suzano Papel e Celulose

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS ARTHUR JÚNIOR
Instituto de Florestas / Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof.ª Dr.ª MAGALI RIBEIRO DA SILVA
Ciência Florestal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE
Ciências Florestais / Universidade Federal de Lavras

Pesquisador Dr. JOANNÈS GUILLEMOT
Ciências Florestais / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 13 de dezembro de 2019.

Aos meus amados pais,

Gaucir e Célia,

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e força para enfrentar os desafios diários.

A minha família, por serem minha base de afeto e de coragem.

Ao professor José Luiz Stape pela orientação, por ter me apresentado a ecofisiologia e a modelagem florestal, por ter me apresentado a pessoas e aberto portas pelas quais sem ele eu não teria entrado.

Ao professor Iraê Guerrini pela orientação, incentivo, paciência e amizade.

Um agradecimento especial ao Clayton Alcarde Alvares pela orientação, motivação, direcionamento dos estudos e acolhimento em cada visita à Limeira.

Ao Otávio Campoe, Rodrigo Hakamada e Ítalo Cegatta pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus queridos amigos de Botucatu Gabriela Villamagua, Kaíque, Mariana, Lívia e Rafael, pelo apoio e amizade. Vocês tornaram a caminhada mais leve.

Aos meus amigos de Colorado do Oeste Glauber e Ana, Jéssica e Leandro, Willian Mota, Stella, Fabiano, Ernando, Patrícia, Carol, Flávio e Rafael, pela parceria de sempre.

Ao Centro Francês de Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento – CIRAD pela oportunidade de estágio de doutorado no exterior, na pessoa do Professor Jean-Paul Laclau. Ao professor Jean-Paul e Patrícia, agradeço pela humildade, generosidade, profissionalismo e carinho, não só comigo, mas com minha família.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF por ter possibilitado o estudo e pela oportunidade de participação nas reuniões do projeto TECHS.

À Fundação de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa pela bolsa concedida pelo Edital nº 10/2016.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal pela oportunidade de cursar o doutorado.

À Seção Técnica de Pós-Graduação (STPG) da FCA pela paciência nos trâmites do curso de doutorado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia pela oportunidade de afastamento para continuar a minha formação.

RESUMO

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de celulose, papel e painéis de madeira. Este sucesso se deve a diversos fatores, tais como: às condições edafoclimáticas favoráveis ao desenvolvimento de espécies de alto rendimento; aos investimentos nos setores de pesquisa e inovação; ao estabelecimento de parcerias entre empresas e instituições de pesquisa e ensino. Desde a chegada das primeiras árvores de eucalipto, no início do século XX, a produtividade da espécie e a quantidade de área plantada cresceram no país, por outro lado, a busca por melhorias deve ser constante. O uso de modelos baseados em processos tem sido direcionado à compreensão da influência de fatores edafoclimáticos em parâmetros da espécie. Desta forma, é possível simular ambientes em situações adversas e prever possíveis impactos das mudanças climáticas na produtividade da espécie, assim como selecionar áreas aptas à cultura, além de determinar fatores que limitam o crescimento. Os objetivos deste trabalho foram parametrizar e validar o modelo 3-PG para o clone de eucalipto de maior plasticidade fenotípica para diferentes regiões do Brasil; e estimar a produtividade deste mesmo clone para diferentes ciclos climáticos em uma região onde a setor de florestas plantadas ainda não está estabelecido, como o estado de Rondônia. A parametrização do modelo foi eficiente quanto a predição de produção de biomassa de lenho ($R^2 = 0,93$), diâmetro a altura do peito ($R^2 = 0,94$) e área basal ($R^2 = 0,93$), o mesmo não aconteceu para o índice de área foliar ($R^2 = 0,26$). O modelo precisa ser melhorado com a inserção de um submodelo que seja sensível às alterações da qualidade ambiental. A sugestão é que exista uma maior fração de produtividade primária bruta convertida em produtividade primária líquida para sítios com melhores qualidades ambientais (menor déficit de pressão de vapor, por exemplo). A produtividade média atingível aos 7 anos de idade para o estado de Rondônia foi de $69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}$. A aplicação do modelo para um clone de alta adaptabilidade ambiental para o estado de Rondônia foi importante pois pode auxiliar os investidores a selecionar e dimensionar as áreas para produção.

Palavras-chave: *Eucalyptus*. Modelos baseados em processos. Variabilidade climática. Planta-ambiente.

ABSTRACT

Brazil is one of the world leaders in the production of pulp, paper and wood panels. This success is due to several factors, such as: the edaphoclimatic conditions favorable to the development of high yield species; the investments in research and innovation sectors; the establishment of partnerships between companies, research and education institutions. Since the arrival of the first *Eucalyptus* trees at the beginning of the 20th century, the productivity of the species and the amount of planted area have grown in the country, in addition, the search for improvement must be constant. Technologies related to remote sensing, genetic sequencing, genetically modified organisms, ecophysiology and modeling of forest systems enable the filling of previously unknown gaps. The use of process-based models has been directed at understanding the influence of edafoclimatic factors on species parameters. In this way, it is possible to simulate environments in adverse situations and predict possible impacts of climate change on the productivity of the species, as well as to select areas suitable for cultivation, and to determine factors that limit growth. The objectives of this study were to parameterize and validate the 3-PG model for the *Eucalyptus* clone of higher phenotypic plasticity for different regions of Brazil; and to estimate the productivity of this same clone for different climatic cycles in a region where the planted forest sector is not yet established, state of Rondônia. The model was efficient in predicting wood biomass production ($R^2 = 0.93$), diameter and breast height ($R^2 = 0.94$) and basal area ($R^2 = 0.93$), the same did not occur for the leaf area index ($R^2 = 0.26$). The model needs to be improved with the insertion of a sub-model that is sensitive to changes in environmental quality. The suggestion is that there is a larger fraction of gross primary productivity converted into net primary productivity for sites with better environmental qualities (less steam pressure deficit, for example). The average achievable productivity at 7 years of age for the state of Rondônia was $69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. The application of the model for a high environmental adaptability clone for the state of Rondônia was important as it can help investors to select and size areas for acquisition.

Keywords: *Eucalyptus*. Process based models. Plant-environment.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.1 - Localização dos sítios utilizados para o processo de calibração (pontos destacados na cor amarela) e validação (pontos destacados na cor branca) do modelo 3-PG e sua respectiva classificação climática de Köppen no Brasil (mapa adaptado de Alvares et al., 2013)..... 30
- Figura 1.2 - Relação alométrica entre a biomassa do lenho e o diâmetro à altura do peito em todos os sítios que tiveram a realização das amostragens destrutivas 42
- Figura 1.3 - Relação entre os valores estimados e observados da área basal (a), diâmetro à altura do peito (b), índice de área foliar (c) e biomassa de lenho (d). O primeiro conjunto de dados representa o conjunto de calibração (a.1, b.1, c.1 e d.1) e o segundo conjunto de dados representa o conjunto de validação (a.2, b.2, c.2 e d.2). As cores indicam os diferentes locais. R^2 = coeficiente de determinação; EMA = Erro Absoluto Médio; EQM = Erro Quadrático Médio 48
- Figura 1.4 - Comparação entre o índice de área foliar observado e estimado durante a rotação. As figuras TECHS 20, 22, 29 e 30 representam os sítios utilizados na calibração do modelo e as figuras TECHS 4, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15 e 24 representam os sítios utilizados na validação dos dados. As linhas representam os valores estimados pelo modelo e os pontos representam os valores observados 50
- Figura 1.5 - Comparação entre a biomassa de lenho observada e estimada durante a rotação. As figuras TECHS 20, 22, 29 e 30 representam os sítios utilizados na calibração do modelo e as figuras TECHS 4, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15 e 24 representam os sítios utilizados na validação dos dados. As linhas representam os valores estimados pelo modelo e os pontos representam os valores observados..... 52
- Figura 1.6 - Relação entre os valores estimados e observados da produtividade primária bruta (a) e da produtividade primária líquida acima do solo (b). As cores indicam diferentes anos de avaliação. R^2 = coeficiente de determinação 53

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Localização e representação da elevação da área de estudo	70
Figura 2.2 - Temperatura média mensal (a) e precipitação mensal (b), valores médios para 37 anos de monitoramento.....	70
Figura 2.3 - Representação das bases utilizadas para determinação dos parâmetros edáficos. Grids (a), pontos de solos analisados pelo ZSEE (b), união de informações do grid e ZSEE (c), dados Radambrasil em escala 1:1.000.000 (d) e a interseção das informações anteriores (e) .	73
Figura 2.4 - Textura dos solos (a), água disponível no solo em mm (b) e índice de fertilidade dos solos (c)	75
Figura 2.5 - Representação espacial da precipitação anual (a) e da temperatura média anual (b).....	80
Figura 2.6 - Simulações de mapas de produtividade (volume aos 7 anos) para o estado de Rondônia	81
Figura 2.7 - Distribuição da produtividade (volume de lenho para as 317 células quadradas para o estado de Rondônia) para a probabilidade de 10% e 90% aos 7 anos para os diferentes ciclos climáticos	83
Figura 2.8 - Representação espacial do volume médio aos 7 anos (considerando os valores médios dos 31 ciclos climáticos). As linhas tracejadas representam as áreas protegidas do estado (unidades de conservação e áreas indígenas)	86
Figura 2.9 - Correlação entre a produtividade nos diferentes ciclos climáticos e as variáveis climáticas. Temperatura máxima (a), temperatura mínima (b), temperatura média (c), e déficit de pressão de vapor (f). Cada ponto representa um ciclo climático.....	87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 - Sítios TECHS utilizados no estudo.....	31
Tabela 1.2 - Descrição climática dos sítios do TECHS monitorados durante o período de estudo (80 meses).....	33
Tabela 1.3 - Localização dos sítios do TECHS utilizados neste trabalho e características do solo (0-40 cm de profundidade). Fonte: adaptado de Binkley et al. (2017).....	34
Tabela 1.4 - Estatísticas descritivas dos inventários finais de cada sítio TECHS .	35
Tabela 1.5 - Modelos de biomassa (B) para cada compartimento da planta. Onde: B = biomassa do compartimento ($\text{kg } \text{árv}^{-1}$); AF = área foliar (m^2) D = diâmetro à altura do peito da árvore (cm); H = altura total (m)	39
Tabela 1.6 - Descrições dos símbolos, unidades, parâmetros utilizados no modelo 3-PG e forma de obtenção do valor	45

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Parâmetros de solos utilizados no modelo 3-PG. Classificação dos solos mais representativos dos grids, profundidade e textura	76
Tabela 2.2 - Valores médios de temperatura máxima, mínima e média, de radiação global e de precipitação para cada quadro climático.....	78
Tabela 2.3 - Valores médios de 37 anos para a temperatura máxima, mínima e média, para a precipitação e seus respectivos desvios-padrão	79
Tabela 2.4 - Valores máximo, mínimo e mediana de produtividade (volume, área basal e DAP) aos sete anos por ciclo	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3-PG - *Physiological Principles in Prediction Growth*

A - Área

AB - Área basal

AF – Área foliar total

AFE - Área foliar específica

ANA - Agência Nacional de Águas

APPL - Produtividade primária líquida acima do solo

Bc - Biomassa de casca

BF - Biomassa foliar

BFS - Biomassa foliar senescente

BG - Biomassa de galho

BL - Biomassa de lenho

BR - Biomassa de raiz

CAD - Capacidade de água disponível

CAP - Circunferência à altura do peito

DAP - Diâmetro à altura do peito

DPV - Déficit de pressão de vapor

EMA – Erro médio absoluto

EQM – Erro quadrático médio

F - Quantidade de folheto depositada

Fbb - Fração casca galho

HT - Altura total

IAF - Índice de área foliar

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais

MBP – Modelos baseados em processos

MSF - Massa seca foliar

nR_x - Fração de raiz

pFS - Partição folha e lenho

PPB - Produtividade primária bruta

PPT - precipitação

R² – Coeficiente de determinação

RAD - Radiação solar global

RFA - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida

Sedam - Secretaria de Estado de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia

TECHS - Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico

T_{máx} - temperatura máxima do ar

T_{mín} - temperatura mínima do ar

UR - Umidade relativa do ar

ZSEE - Zoneamento Socioeconômico Ecológico do estado de Rondônia

v_f - Taxa de queda de folheto

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	21
	CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO MULTIREGIONAL DO MODELO 3-PG PARA O CLONE DE EUCALIPTO DE MAIOR PLASTICIDADE FENOTÍPICA DO BRASIL	24
1.1	INTRODUÇÃO	27
1.2	MATERIAL E MÉTODOS	29
1.2.2	Dados requeridos pelo modelo	31
1.2.3	Informações meteorológicas.....	32
1.2.4	Dados edáficos.....	33
1.2.4.1	Capacidade de água disponível no solo	33
1.2.4.2	Fertilização dos solos	34
1.2.5	Inventários.....	35
1.2.6	Índice de área foliar	36
1.2.7	Parametrização do modelo.....	37
1.2.7.1	Fator nutricional.....	37
1.2.7.2	Análises de biomassa e alometria	38
1.2.7.3	Densidade básica da madeira	41
1.2.7.4	Área foliar específica	41
1.2.7.5	Massa lenhosa e máxima biomassa de fuste	41
1.2.7.6	Deposição de folheto.....	42
1.2.7.7	Taxa de queda de folheto	43
1.2.7.8	Condutância estomática máxima.....	43
1.2.8	Calibração do modelo.....	46
1.2.9	Validação do modelo	46
1.3	RESULTADOS	47
1.4	DISCUSSÃO	53
1.5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE A - Resumo dos resultados obtidos para as variáveis utilizadas na parametrização do modelo e na elaboração das equações ajustadas.....	63

APÊNDICE B - Modelos de biomassa (B) para cada compartimento da planta.....	64
---	----

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DE CICLOS CLIMÁTICOS NA PRODUTIVIDADE DE UM CLONE DE <i>Eucalyptus urophylla</i> PARA O ESTADO DE RONDÔNIA.....	65
---	-----------

2.1	INTRODUÇÃO	67
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	69
2.2.1	Local de estudo	69
2.2.2	3-PG Espacializado	71
2.2.2.1	Dados de entrada	71
2.2.2.1.1	Informações locais.....	71
2.2.2.1.2	Informações meteorológicas.....	72
2.2.2.1.3	Dados edáficos.....	72
2.3	RESULTADOS	77
2.4	DISCUSSÃO	87
2.5	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	91
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	95

INTRODUÇÃO GERAL

O gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. As primeiras mudas de eucalipto foram implantadas no Brasil em 1824, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro e foram cultivadas como espécie ornamental (MARCHIORI, 2014). No início do século XX o engenheiro agrônomo Edmundo Navarro de Andrade, servidor da Companhia Paulista de Estradas de Ferro, foi o responsável por introduzir comercialmente o uso de eucalipto para fonte de lenha para locomotivas e madeira sólida para dormentes e postes (FLORES, et al., 2016).

O interesse pelo estudo de espécies do gênero se deu pela fácil adaptação às diferentes condições ambientais presentes no Brasil, latitude semelhante à da Austrália e às propriedades que conferem distintas possibilidades de uso da madeira (CASTRO et al., 2016). O *Eucalyptus* possui múltiplas possibilidades de uso, tais como a produção de carvão vegetal, estacas, mourões, dormentes, movelaria, chapas de fibra, celulose e papel, entre outros. A produção florestal é um importante uso da terra no Brasil, com área de 7,83 milhões de hectares de reflorestamento. Mais de 70 % é representado por plantações de eucalipto que se localizam principalmente nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul com (16%). O principal uso é pela indústria de celulose (79%), mas 16% é utilizado como combustível na fabricação de ferro-gusa e aço. O setor de florestal é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,2% do PIB industrial. Também é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2019).

Os povoamentos florestais podem ter benefícios ambientais como a proteção à erosão do solo, o melhoramento da qualidade da água, habitat para a biodiversidade em ecossistemas agrícolas e também o armazenamento de carbono (FEIKEMA et al., 2010). No entanto, o desenvolvimento da cultura é limitado por alguns fatores (LITTON; RAICH; RYAN, 2007), tais como: material genético (espécie, procedência e clone); clima (radiação, ventos, temperaturas, precipitação, umidade relativa e balanço hídrico); fisiografia (relevo e drenagem); solo (características físico-químicas, biológicas e de fertilidade); manejo florestal (cultura anterior, limpeza do solo, preparo e conservação do solo, espaçamento de plantio, fertilização, mato-competição, desrama, desbaste, corte e condução da brotação); e proteção (pragas, doenças e

fogo) (LEMOS, 2012). Portanto, características que afetam a captura e o uso destes recursos pelas árvores influenciam diretamente no crescimento das plantas (ACKERLY et al., 2000).

São inúmeras as variáveis e mecanismos que possibilitam monitorar as causas e os efeitos que comprometem a produtividade florestal em diferentes condições ambientais, tais como: os padrões de fluxo e balanço de carbono; a eficiência no uso da água; o comportamento de plasticidade fenotípica; o monitoramento da ocorrência de pragas; assim como a aplicação de modelos de crescimento florestal.

Os modelos de crescimento florestal são divididos basicamente em três grupos: os empíricos, os modelos baseados em processos e os híbridos (BORGES, 2009; PASSIOURA, 1996; XIE; WANG; LEI, 2017). Os modelos empíricos são derivados de grandes quantidades de dados de campo, e descrevem a taxa de crescimento como uma função de regressão de variáveis como índice de sítio, idade, densidade de árvores e área basal. A maior força da abordagem empírica é que ela descreve a melhor relação entre os dados medidos e as variáveis determinantes de crescimento usando uma função matemática ou curva específica. Os modelos empíricos requerem apenas entradas simples e podem ser facilmente construídos (PENG et al., 2002). Modelos baseados em processos, por sua vez, são mais complexos por empregarem princípios físicos e fisiológicos junto às condições edáficas para projetar o desenvolvimento e a produtividade florestal sob um clima em mudança (BATTAGLIA et al., 2004; LANDSBERG; WARING, 1997; SEELY; WELHAM; KIM, 2015). Os modelos híbridos são a combinação dos modelos empíricos e processuais e buscam combinar as melhores características de cada um.

Os modelos baseados em processos têm sido utilizados para simular os impactos das mudanças climáticas e das práticas silviculturais no crescimento e na produtividade nos níveis local e regional (ALMEIDA et al., 2010; AUGUSTYNICZIK et al., 2017; FORRESTER; TANG, 2015). Entre os modelos baseados em processos, o 3-PG é um dos modelos mais amplamente utilizados no mundo como ferramenta de gerenciamento para plantios monoespecíficos, que abrangem diferentes espécies florestais (XIE; WANG; LEI, 2017). O modelo foi parametrizado para plantações de eucalipto em diferentes regiões do Brasil, Austrália e Portugal (*E. grandis*, *E. globulus*, *E. grandis* x *E. urophylla*) (ALMEIDA et al., 2004, 2009; AMARAL et al., 2001; BORGES et al., 2012; LEMOS et al., 2018; SANDS; LANDSBERG, 2002b; STAPE; RYAN; BINKLEY, 2004); para plantações de pinus na África do Sul, Estados Unidos

e Uruguai (*P. patula*, *P. elliotti*, *P. taeda*) (DYE, 2001; GONZALEZ-BENECKE et al., 2014, 2016; RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al., 2010); *Larix olgensis* na China (XIE; WANG; LEI, 2017); *Betula platyphylla* no Japão (POTITHEP; YASUOKA, 2011); *Tectona grandis* no Brasil (PONTES, 2011). O modelo também foi parametrizado para plantios mistos na China (FORRESTER; TANG, 2015).

O modelo foi parametrizado para muitas espécies e locais, porém ainda há lacunas a serem preenchidas, como no caso de parametrização de espécies ou clones de importância comercial ou ainda na predição de produtividade para locais ainda não explorados para plantações florestais. Neste sentido, as hipóteses testadas pelo trabalho foram: a) a parametrização do modelo a partir do conjunto de dados dos sítios contrastantes é capaz de gerar estimativas satisfatórias de produtividade para diferentes regiões brasileiras; b) esta parametrização pode ser utilizada para indicar locais favoráveis para plantações de *Eucalyptus* em uma região que ainda não é utilizada para esse fim no Brasil. Os objetivos deste trabalho foram: 1) parametrizar e validar o modelo 3-PG para o eucalipto de maior plasticidade fenotípica do Brasil para diferentes regiões brasileiras, e; 2) estimar a produtividade do mesmo clone para o estado de Rondônia em diferentes ciclos temporais.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO MULTIREGIONAL DO MODELO 3-PG PARA O CLONE DE EUCALIPTO DE MAIOR PLASTICIDADE FENOTÍPICA DO BRASIL

RESUMO

Diferentes modelos ecofisiológicos são utilizados para prever a produtividade de plantações florestais em todo o mundo. O modelo 3-PG (*Physiological Principles in Prediction Growth*) tem sido utilizado com sucesso para este fim desde 1997. O modelo 3-PG foi parametrizado e validado para prever a produtividade do eucalipto clonal mais plantado do Brasil (*Eucalyptus urophylla*) em diferentes regiões do país. O trabalho faz parte do Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico (TECHS - www.ipef.br/techs), que foi conduzido em 36 sítios distribuídos em um gradiente ambiental de 3500 km. Por meio de coletas de dados realizadas entre os anos de 2012 e 2018, foi possível parametrizar o modelo 3-PG com dados que representam parte da diversidade edafoclimática de cultivos florestais do Brasil. Foram determinadas a biomassa inicial dos compartimentos (lenho, folha e raiz); a relação entre a produtividade líquida e bruta; a densidade média da madeira; a máxima biomassa de fuste para 1000 plantas ha⁻¹; a condutância estomática máxima; as frações casca e galho para a idade inicial e madura; a área foliar específica para a idade inicial e madura; e parâmetros alométricos em diferentes idades. Considerando o período de inicialização do modelo, a idade inicial foi definida em 12 meses após o plantio e a idade final foi considerada aos 80 meses. A calibração do modelo foi realizada em quatro sítios experimentais (sítios de calibração), os quais correspondem às diversidades ambientais do projeto, e a validação do modelo foi realizada aplicando o ajuste do modelo em 10 outros sítios (sítios de validação) da mesma rede experimental. Em média, as estimativas de diâmetro à altura do peito foram 4,91 % superiores às medições de campo. Para a biomassa de lenho as estimativas foram 16,44 % superiores; e para o índice de área foliar as diferenças foram de 26,22 %, sendo que até os três primeiros anos as estimativas foram superestimadas e nos últimos anos foram subestimadas. Embora o modelo tenha sido eficiente em capturar as diferenças edafoclimáticas para a predição de produtividade de biomassa de fuste, o mesmo não aconteceu para o índice de área foliar. A inicialização do modelo com dados de biomassa observados em idade

próxima ao fechamento do dossel pode justificar o sucesso do modelo, pois este é o período de maior importância do parâmetro foliar para o modelo. Após o fechamento do dossel quem direcionará o sucesso do modelo para a produção de biomassa, são os parâmetros relacionados à alocação de carbono.

Palavras-chave: Ecofisiologia. Gradiente ambiental. Modelagem. Modelo baseado em processos.

MULTISITE EVALUATION OF THE 3-PG MODEL FOR THE HIGHEST PHENOTYPIC PLASTICITY EUCALYPTUS CLONE IN BRAZIL

ABSTRACT

Different ecophysiological models are used to predict the productivity of forest plantations worldwide. The Physiological Principles in Prediction Growth (3-PG) model has been successfully used for this purpose since 1997. In this study, the 3-PG model was parameterized and validated to predict the productivity of the most planted clonal eucalypts in Brazil (*Eucalyptus urophylla*) in different regions of the country and assess the attainable productivity of this same clone for a region little exploited for this plantations in the country. Through data collection carried out between 2012 and 2018, conducted in 36 sites distributed across an environmental gradient that spans over 3500 km in Brazil, it was possible to parameterize the 3-PG model using data that represent a portion of the soil and climate diversity of forest plantations in Brazil. We determined the initial biomass of the compartments (stem, leaf, and root), relationship between net and gross productivity, average wood density, maximum stem biomass for 1000 trees ha⁻¹, maximum stomatal conductance, bark and branch fractions for the initial and mature age, specific leaf area for the initial and mature age, and allometric parameters at different ages. Considering the model initialization period, the initial age was defined at 12 months after planting and the final age was considered at 80 months. Model calibration was performed in four experimental sites (special sites for the calibration set), which correspond to the environmental diversities of the project, and model validation was performed by applying the setup of the model obtained in 10 other sites (regular sites for validation set) of the same experimental network. In all sites tested, estimates of basal area, diameter at breast height, leaf area index, and stem biomass agreed with the measured values. On average, the estimates of diameter and breast height were 4.91% higher than the observed measures, whereas the stem biomass estimates were 16.44% lower and the leaf area index was 26.22% lower; moreover, the estimates were overestimated for the first three years and underestimated in recent years. Although the model has been efficient in capturing soil and climate differences for the prediction of stem biomass productivity, the same was not true for the leaf area index. The initialization of the model with biomass data observed at an age near at the canopy closure may justify the success of the model,

as this is the most important period of the leaf parameter for the model. After the canopy closure who will direct the success of the model to biomass production are the parameters related to carbon allocation.

Keywords: Ecophysiology. Environmental gradient. Modeling. Process-based model.

1.1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro vive uma fase de forte expansão nas chamadas novas fronteiras da silvicultura. Tanto o sucesso da compra quanto a produtividade destas novas terras é baseado em métodos empíricos de determinação da qualidade de sítio (KLIPPEL, 2015). Desta forma, são necessárias aplicações de modelos baseados em processos para avaliar a produtividade e as restrições ecológicas das plantações florestais em diferentes escalas espaciais e temporais (STAPE, 2002). Modelos de crescimento florestal são importantes para estimar o rendimento potencial dos produtos madeireiros e também para investigar os efeitos das plantações nos valores ambientais (PAUL et al., 2007) como a mitigação das mudanças climáticas (GUPTA; SHARMA, 2019).

Estes modelos são divididos em três grupos básicos: empíricos (“modelos de engenharia”), mecanísticos (“modelos científicos”, baseados em processos, MBP) e híbridos (BORGES, 2009; PASSIOURA, 1996). Os modelos empíricos são baseados em “correlações” entre variáveis de um sistema sem que, necessariamente, exista uma relação de causa-efeito entre elas. São representados por equações, cujos coeficientes das variáveis não possuem necessariamente interpretação física ou biológica, sendo válidos apenas para as condições específicas em que foram estabelecidos. Os MBP se baseiam em processos físicos e biológicos que governam o sistema em questão, o que lhes confere maior capacidade de extrapolação, embora muitas vezes com menor acurácia. Os modelos híbridos, representam a combinação dos dois tipos anteriores.

Os modelos baseados em processos (MBP) são representações matemáticas de sistemas biológicos que incorporam nossa compreensão dos mecanismos fisiológicos e ecológicos e suas interações entre si e com o ambiente do sistema em algoritmos preditivos (JOHNSEN et al., 2001; LANDSBERG; SANDS, 2011) e, portanto, são

transferíveis para diferentes ambientes (CUDDINGTON et al., 2013). O modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) incorpora as características físicas básicas de muitas espécies, permitindo prever o crescimento e incrementos de diâmetro de lenho, assim como o curso temporal do índice de área foliar com precisão aceitável (LANDSBERG, 2003). Ele é amplamente utilizado e bem validado em florestas naturais e plantadas em diversas regiões do mundo (LANDSBERG; SANDS, 2011; POTITHEP; YASUOKA, 2011; ZHAO et al., 2009), entretanto é necessária a parametrização para as espécies de forma individualizada (LANDSBERG; WARING; COOPS, 2003).

Tickle, Coops e Hafner (2001) utilizaram o modelo 3-PG associado a ferramentas de espacialização de dados para predizer a produtividade de uma ampla área de floresta nativa de eucalipto na Austrália. O modelo também foi parametrizado para plantações de *Eucalyptus globulus* localizados na Tasmânia e Austrália Ocidental (SANDS; LANDSBERG, 2002a). A parametrização foi feita ajustando os resultados do 3-PG aos dados observados de biomassa total acima do solo e o índice de área foliar. Os ajustes dos dados foram feitos tornando a área foliar específica e a fração casca e galho dependentes da idade, assim como incluíram os efeitos da temperatura na eficiência quântica do dossel. No Brasil, Stape, Ryan e Binkley (2004) calibraram e avaliaram a capacidade do modelo em simular a produtividade em função das mudanças na fertilidade do solo e na quantidade de água para plantios de *E. grandis* x *E. urophylla*. Eles concluíram que o modelo representou os efeitos do déficit hídrico e da fertilidade do solo no ganho e alocação de carbono de maneira eficaz. Ainda no Brasil, o modelo foi parametrizado e validado para plantações de *Eucalyptus grandis* (ALMEIDA et al., 2004; ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004). Os autores destacaram a importância do modelo para testar hipóteses sobre as respostas das árvores às mudanças ambientais. Na Austrália, o modelo foi calibrado para plantações de *Eucalyptus cladocalyx* e *Corymbia maculata* para regiões de média e baixa pluviosidade (PAUL et al., 2007). Hung et al. (2016) utilizaram o modelo para descrever a produtividade potencial das plantações de acácia em uma ampla variedade de clima e solos no Vietnã. Para outras espécies, os valores dos parâmetros foram regulados para ajustar os dados de saída com base em medições *in situ* (GONZALEZ-BENECKE et al., 2014, 2016; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2016; ZHAO et al., 2009). Forrester e Tang, (2015) utilizaram o modelo 3-PG para analisar o efeito temporal e espacial das interações de espécies mistas e mostraram que o modelo

possui potencial para este fim e para desenvolver regimes silviculturais para estas plantações.

A precisão e a acuracidade de qualquer modelo dependem da estimativa de valores realistas e representativos dos parâmetros (DYE, 2001). Existe ainda a necessidade do desenvolvimento de valores para parâmetros de espécies ou de clones específicos, e que estes parâmetros tenham a amplitude climática e edáfica representadas da forma mais abrangente possível (POTITHEP; YASUOKA, 2011). Compreender o comportamento de parâmetros importantes ao desenvolvimento da cultura em diferentes regiões é uma importante ferramenta de manejo aos silvicultores, além de possibilitar maior acurácia na predição de crescimento da cultura. O objetivo deste trabalho foi parametrizar e validar o modelo 3-PG para plantações clonais de *Eucalyptus urophylla* em diferentes regiões brasileiras usando dados de uma rotação completa - 80 meses.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Desenho experimental e área de estudo

O Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico (TECHS), coordenado pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) instalou 36 experimentos entre 2012 e 2018 ao longo de um gradiente de mais de 3.500 km, abrangendo localidades no Brasil e no Uruguai (BINKLEY et al., 2017), com contrastantes tipologias climáticas (ALVARES et al., 2013) e edáficas para uma rotação de seis anos. Os povoamentos foram conduzidos entre 2012 e 2018 e em cada local foram analisados 18 clones, sendo que cada clone foi plantado em uma única parcela, com 8 linhas x 30 árvores (24 x 90 m), com o arranjo de 3 x 3 m (1.111 árvores ha⁻¹). Havia ainda uma parcela para análises destrutivas de oito linhas com cinco plantas por linhas. O material genético utilizado para a determinação dos parâmetros avaliados neste trabalho foi um clone de *Eucalyptus urophylla*, (clone A1 – lista TECHS). A escolha deste material se deveu ao desempenho satisfatório em todos os sítios monitorados, o que demonstrou a elevada capacidade do clone em realizar adaptações morfológicas e fisiológicas e, portanto, a melhor combinação gênica entre os clones avaliados (ARAUJO et al., 2019).

Dos 36 sítios experimentais do TECHS, 14 sítios foram selecionados pela diversidade ambiental, sendo divididos em dois grandes grupos: i) conjunto de calibração, constituído pelos sítios 20, 22, 29 e 30, os quais representam os extremos ambientais do trabalho, e ii) conjunto de validação, que é composto pelos sítios 4, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15, 24 e 33 (Figura 1.1 Tabela 1.1).

Figura 1.1 - Localização dos sítios utilizados para o processo de calibração (pontos destacados na cor amarela) e validação (pontos destacados na cor branca) do modelo 3-PG e sua respectiva classificação climática de Köppen no Brasil (mapa adaptado de Alvares et al., 2013)

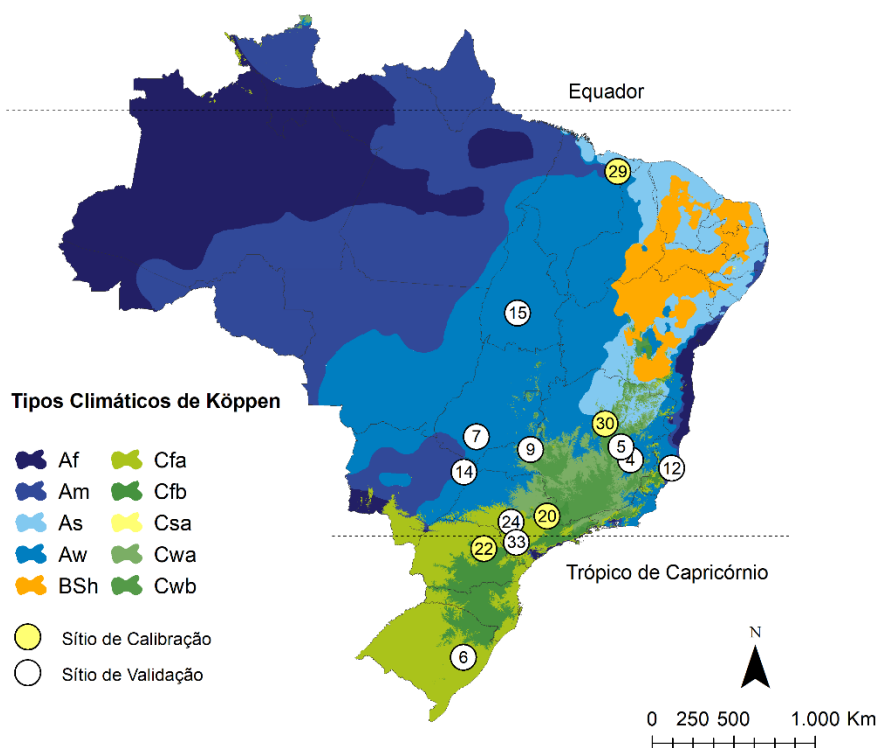


Tabela 1 - Sítios TECHS utilizados no estudo

Sítio TECHS	Município	Estado	Clima ¹	Data de Plantio	Classe do Solo ²	Textura ³	Conjunto
4	Belo Oriente	MG	Aw	20/12/2011	Latossolo	Argilosa	Validação
5	Guanhães	MG	Cwb	03/01/2012	Latossolo	Argilosa	Validação
6	Eldorado do Sul	RS	Cfa	10/04/2012	Nitossolo	Média	Validação
7	Rio Verde	GO	Aw	26/02/2012	Neossolo	Arenosa	Validação
9	Estrela do Sul	MG	Cwb	09/12/2011	Latossolo	Muito Argilosa	Validação
12	Aracruz	ES	Am	21/06/2012	Latossolo	Média	Validação
14	Inocência	MS	Aw	03/03/2012	Neossolo	Arenosa	Validação
15	Brejinho do Nazaré	TO	Aw	06/12/2012	Neossolo	Arenosa	Validação
20	Mogi Guaçu	SP	Cwa	16/02/2012	Latossolo	Argilosa	Calibração
22	Telêmaco Borba	PR	Cfb	29/02/2012	Latossolo	Argilosa	Calibração
24	Borebi	SP	Cfa	11/01/2012	Neossolo	Arenosa	Validação
29	Urbano Santos	MA	As	01/03/2012	Neossolo	Arenosa	Calibração
30	Bocaiúva	MG	Cwa	21/12/2011	Latossolo	Muito Argilosa	Calibração
33	Buri	SP	Cfa	30/12/2011	Latossolo	Argilosa	Validação

¹Classificação Climática de Köppen (Alvares et al., 2013); ²Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS; ³Embrapa (2006).

1.2.2 Dados requeridos pelo modelo

O modelo 3-PG desenvolvido por Landsberg e Waring (1997) utiliza como entrada dados climáticos que são apresentados em passos mensais, sendo eles: a temperatura máxima e mínima média do ar (°C), a média da radiação solar líquida diária ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$), a umidade do ar (%), a precipitação acumulada mensal (mm), o déficit de pressão de vapor diário (kPa) e o número de dias com ocorrência de geada. Também são necessárias informações das características locais, tais como a localização geográfica, a capacidade de água disponível no solo, a classe (para determinar a potência do déficit de razão de umidade (n_0) e o déficit de razão de umidade para $f_0 = 0,5$ (c_0)) e a fertilidade do solo, e o estoque inicial de biomassa nos compartimentos da planta em unidade de árvores (raiz, caule, folhas e galhos) (LANDSBERG et al., 2005; SANDS; LANDSBERG, 2002b).

1.2.3 Informações meteorológicas

As informações meteorológicas diárias de temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), radiação solar líquida ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), umidade do ar (%) e velocidade do vento (m s^{-1}) foram obtidas entre o período de 01/01/2012 a 31/07/2018, sendo que as bases utilizadas foram de estações *in situ* e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Tabela 1.2). Para o preenchimento das falhas, foram utilizados dados em GRID interpolados por XAVIER; KING; SCANLON, (2016), com precisão de 25 km; dados de precipitação da ANA (Agência Nacional de Águas) ou do CHIRPS (estimativas de precipitação a partir de pluviômetros e observações de satélite) desenvolvido por Funk et al., (2015). Nos casos de dados ainda faltantes, a base utilizada para os demais parâmetros foi a NASA POWER, descrito por Stackhouse et al., (2015) .

É relevante ressaltar que a diferença da pressão de vapor entre o interior das folhas e o ar é uma importante variável e depende da pressão de vapor e da temperatura da folha (LANDSBERG; SANDS, 2011). Assumindo que o ar nas cavidades subestomatais está saturado com vapor de água, então:

$$\text{DPV} = e_s(T) - e_a,$$

onde DPV é a pressão de vapor atmosférico (kPa), e_s é a pressão de saturação de vapor à temperatura do ambiente (kPa), e e_a é a pressão parcial de vapor.

A pressão parcial do vapor de água no ar saturado a uma determinada temperatura (T) é chamada de pressão de vapor de água de saturação $e_s(T)$ e depende apenas da temperatura.

Pressão de saturação de vapor d'água:

$$e_s(T) = 0,611078 e^{(17,27 T / T + 273,3)},$$

onde e_s é a pressão de saturação de vapor d'água (kPa), e T é a temperatura atual do ar ($^{\circ}\text{C}$).

A pressão parcial de vapor:

$$e_a = UR \ e_s / 100,$$

onde UR é a umidade relativa do ar (%) e e_a é a pressão parcial de vapor d'água (kPa).

Tabela 1.1 - Descrição climática dos sítios do TECHS monitorados durante o período de estudo (80 meses)

TECHS	Long (GD)	Lat	Alt (m)	Tmed (°C)	Tmax	Tmin	UR (%)	Vv (m s ⁻¹)	RAD (MJ m ⁻² d ⁻¹)	P (mm ano ⁻¹)	DPV (kPa)	CAD (L m ⁻²)
4	-42,4	-19,3	243,0	22,7	29,3	18,0	75,9	1,7	16,2	1110	0,79	179
5	-42,9	-18,5	873,0	20,7	27,3	16,1	74,5	1,7	17,7	965	0,73	160
6	-51,6	-30,2	150,0	18,5	23,6	14,4	79,0	1,5	16,1	1221,6	0,53	145
7	-50,9	-18,0	681,0	22,8	30,0	17,3	67,7	1,6	18,2	1477,5	1,04	59
9	-47,9	-18,7	969,0	23,4	29,2	18,8	60,7	1,8	19,2	1392,7	1,26	215
12	-40,1	-19,8	36,0	24,4	30,0	20,8	75,9	2,9	18,1	1023,6	0,83	130
14	-51,6	-20,0	480,0	24,6	31,4	18,9	67,1	1,8	18,9	1172,1	1,16	79
15	-48,6	-11,2	255,0	26,2	33,7	20,5	68,5	1,2	20,1	1402,7	1,25	77
20	-47,0	-22,4	633,0	21,8	29,1	16,3	68,1	1,0	17,5	1285	0,97	165
22	-50,5	-24,2	888,0	18,4	23,5	14,5	76,7	3,5	17,2	1666,8	0,58	214
24	-49,0	-22,7	656,0	21,6	28,4	16,8	72,4	1,5	15,7	1266,7	0,84	54
29	-43,1	-3,4	81,0	27,5	34,3	23,1	70,8	1,9	17,4	1310,3	1,23	64
30	-43,8	-17,3	848,0	24,2	31,0	18,3	57,5	1,8	20,4	720,8	1,44	225
33	-48,7	-23,9	695,0	20,1	26,1	15,8	76,4	2,2	17,1	1412,3	0,65	196

Long = longitude em graus decimais, Lat = latitude em graus decimais, Alt = altitude em metros, Tmed = temperatura média anual do ar, Tmax = temperatura média máxima do ar, Tmin = temperatura média mínima do ar, UR = umidade relativa média do ar, Vv = velocidade média do vento, RAD = radiação média global, P = precipitação total, VPD = média do déficit de pressão de vapor durante 24 horas, CAD = capacidade de água disponível.

1.2.4 Dados edáficos

1.2.4.1 Capacidade de água disponível no solo

A fonte de informação para a capacidade de água disponível (CAD) no solo (0-2 m de profundidade) foi o primeiro trabalho publicado pela rede de estudos TECHS (BINKLEY et al., 2017). Os autores utilizaram a equação desenvolvida por Stape (2002), a qual estima a CAD em função da quantidade de areia e argila no solo:

$CAD = 0,1503 - 0,137 \cdot \text{Areia} - 0,057 \cdot \text{Argila} \cdot ds \cdot p$

onde CAD = capacidade de água disponível no solo (mm), areia e argila são as frações das partículas ($g\ g^{-1}$), ds é a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e p é a profundidade do solo (m).

1.2.4.2 Fertilização dos solos

Foram realizadas análises de solo (Tabela 1.3) nas quais, a fim de evitar limitações nutricionais, todas as parcelas foram fertilizadas de forma intensiva no ano de plantio, com aplicação de $70\ kg\ N\ ha^{-1}$, $45\ kg\ P\ ha^{-1}$, $85\ kg\ K\ ha^{-1}$, $500\ kg\ Ca\ ha^{-1}$, $90\ kg\ Mg\ ha^{-1}$, $40\ kg\ S\ ha^{-1}$, $3\ kg\ B\ ha^{-1}$, $1\ kg\ Cu\ ha^{-1}$ e $1\ kg\ Zn\ ha^{-1}$ (BINKLEY et al., 2017).

Tabela 1.2 - Localização dos sítios do TECHS utilizados neste trabalho e características do solo (0-40 cm de profundidade). Fonte: adaptado de Binkley et al. (2017)

TECHS	Cidade	Estado	Região	Argila	Silte	Areia	Matéria orgânica	pH	P	K	Ca	Mg	CTC	CAD
				%	%	%	$g\ L^{-1}$		$mg\ L^{-1}\ solo$			$mmolc\ L^{-3}$		(2m) mm
4	Belo Oriente	MG	T	59,0	10,0	31,0	31,3	4,0	1,5	1,2	4,8	1,3	71,7	183,0
5	Guanhães	MG	T	44,0	13,0	43,0	35,0	3,9	0,5	0,9	1,3	1,0	91,1	183,0
6	Eldorado do Sul	RS	ST	27,0	19,0	54,0	25,0	3,7	0,5	1,0	1,0	1,0	128,0	150,0
7	Rio Verde	GO	T	6,0	5,0	89,0	19,0	4,5	2,5	0,3	9,5	1,0	35,8	73,0
9	Estrela do Sul	MG	T	80,0	9,0	11,0	43,0	3,9	1,0	0,8	2,0	1,0	88,8	247,0
12	Aracruz	ES	T	30,0	12,0	58,0	18,0	4,0	1,5	0,7	2,5	1,0	40,7	140,0
14	Inocência	MS	T	10,0	8,0	82,0	10,5	4,1	1,0	6,8	28,5	5,0	64,8	80,0
15	Brejinho de Nazaré	TO	T	10,0	8,0	82,0	7,5	4,2	-	4,1	35,5	5,0	64,6	84,3
20	Mogi Guaçu	SP	T	41,0	16,0	42,0	34,0	4,1	4,5	1,2	8,0	1,5	97,2	172,0
22	Telêmaco Borba	PR	T	56,0	23,0	21,0	52,0	4,0	3,5	3,8	37,5	11,0	183,8	225,0
24	Borebi	SP	T	8,0	3,0	89,0	12,0	4,6	2,0	5,5	73,0	10,0	104,5	72,0
29	Urbano Santos	MA	T	9,0	5,0	87,0	16,0	4,1	-	1,4	36,5	15,5	91,4	103,0
30	Bocaiúva	MG	T	76,0	14,0	10,0	47,5	3,9	2,0	1,6	48,5	26,5	209,1	251,0
33	Buri	SP	ST	52,0	20,0	28,0	51,0	4,3	10,5	1,0	11,0	14,5	135,5	212,0

Região T = tropical, ST = subtropical; pH = potencial hidrogeniônico; P = fósforo, K = sódio, Ca = cálcio, Mg = magnésio, CTC = capacidade de troca catiônica e CAD = capacidade de água disponível.

1.2.5 Inventários

Foram realizados inventários florestais contínuos, sendo que as parcelas eram retangulares com oito linhas e cada linha possuía 10 plantas. Havia ainda uma outra parcela destinada às análises destrutivas, as quais consistiam em oito linhas com cinco plantas por linhas. Os inventários foram realizados a cada seis meses, com início por volta dos 15 meses de idade e finalizados aos 74 meses, dependendo do sítio, pois houve uma pequena diferença nas datas de execução dos plantios entre os sítios (Tabela 1.4).

O monitoramento da altura total (H_T – m) e do diâmetro à altura do peito (DAP – cm) é importante, pois a partir dele juntamente às análises destrutivas é possível gerar equações para determinar o crescimento do povoamento em diferentes idades, parametrizar o modelo e, posteriormente, comparar os dados estimados com os dados observados.

Tabela 1.3 – Estatísticas descritivas dos inventários finais de cada sítio TECHS

TECHS	Idade (meses)	Área (m ²)	Hdom	H	DAP	N	AB	Sobrev.
				(m)	(cm)	(arv ha ⁻¹)	(m ² ha ⁻¹)	(%)
4	69	720	28,5	25,7 ± 3,4	15,7 ± 2,2	1083	21,4	98
5	69	720	28,8	27,0 ± 1,5	16,8 ± 1,5	1111	24,7	100
6	67	720	27,2	26,2 ± 2,1	18,0 ± 2,0	1111	28,7	100
7	69	720	28,9	27,1 ± 1,9	16,7 ± 2,0	1111	24,6	100
9	70	720	29,1	28,4 ± 1,2	17,0 ± 1,4	1014	23,1	91
12	63	720	22,3	20,1 ± 1,2	15,3 ± 1,9	1097	20,4	99
14	69	720	30,0	25,8 ± 6,0	16,8 ± 3,6	1069	24,9	96
15	50	720	21,3	19,3 ± 1,4	14,0 ± 1,8	1028	16,1	93
20	74	720	30,5	27,7 ± 3,2	17,5 ± 2,5	958	23,5	86
22	68	720	32,0	30,4 ± 1,9	18,2 ± 2,0	1069	28,1	96
24	69	720	28,5	25,9 ± 4,0	16,7 ± 3,2	1069	24,2	96
29	70	720	21,7	15,2 ± 6,0	14,1 ± 2,2	1000	15,9	90
30	70	720	22,6	21,9 ± 0,9	14,9 ± 1,4	1111	19,5	100
33	70	720	32,6	30,0 ± 2,6	19,0 ± 2,6	1097	31,6	99
Mínimo	50,0	720,0	21,3	15,2	14,0	958,2	15,9	86,3
Média	67,6	720,0	27,4	25,1	16,5	1066,4	23,3	96,0
Máximo	74,0	720,0	32,6	30,4	19,0	1111,0	31,6	100,0
CV (%)	8,3	0,0	14,1	17,4	9,1	4,5	19,2	4,5

TECHS = código do sítio monitorado; Idade = idade do plantio no período de medição; Área = área da parcela, Hdom = média das alturas dominantes, H = média da altura total, DAP = média do diâmetro à altura do peito, N = número de plantas por hectare, AB = área basal e Sobrev = sobrevivência das parcelas

Análises adicionais foram realizadas, entretanto, devido ao elevado custo e às grandes distâncias entre um experimento e outro, apenas parte dos sítios receberam os estudos em suas totalidades, sendo estes denominados “especiais”, sendo também os sítios de calibração. As análises adicionais foram: quantificação da biomassa por compartimento aéreo (casca, galhos, folhas e tronco em $\text{kg } \text{árv}^{-1}$), determinação da densidade da madeira, determinação do índice de área foliar (IAF $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), quantificação da deposição de folheto (Mg ha^{-1}), área foliar específica (AFE $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) e taxa de queda de folheto. Também foram obtidos dados referentes à produtividade primária bruta (PPB), produtividade primária líquida (PPL) e ao balanço total de carbono abaixo do solo (TBCF) dos sítios especiais (monitoramento realizado entre outubro de 2013 e setembro de 2014, e entre outubro de 2014 e setembro de 2015¹).

1.2.6 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) ou índice de cobertura vegetal (ICV) é um parâmetro biofísico que pode ser determinado de diferentes maneiras, sendo elas destrutivas ou não. Neste trabalho foi utilizado o método não destrutivo com o uso do ceptômetro AccuPAR LP-80. Este método baseia-se na extinção de radiação pelo dossel e foi realizado em 22 sítios com diferentes frequências de obtenção de dados. Dos 14 sítios utilizados neste trabalho, 13 tiveram o monitoramento do IAF em sua área. A frequência de monitoramento variou entre uma e 11 vezes (sítios 29 e 15 com uma avaliação e sítio 20 com 11) e foi influenciada pela facilidade ou dificuldade de acesso ao sítio. A radiação fotossinteticamente ativa foi medida abaixo da copa das árvores (RFAb) em seis pontos, formando uma diagonal ao longo da parcela útil. Quatro medidas foram gravadas em cada direção cardinal, a um metro acima do solo, num total de 24 valores de radiação coletados por parcela. O valor de cada medição é uma média de 80 sensores quânticos de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, 400 a 700 nm). As medidas simultâneas da radiação acima do dossel PAR (PARa) foram obtidas em intervalos menores que 15 minutos, nas estradas e clareiras e, quando possível, pela colocação de um segundo AccuPAR intercalibrado que registrou os

¹ Informação obtida em comunicação pessoal com Campoe, O.C., que adotou a metodologia proposta por Campoe et al., (2012)

dados a cada minuto - para maior detalhamento consultar Mattos (2015).

1.2.7 Parametrização do modelo

O modelo 3-PG é um modelo aberto e diferentes versões foram desenvolvidas, como a versão para Microsoft Excel desenvolvida pelo Dr. Peter Sands e a versão espacial, desenvolvida pelo CSIRO (Austrália) e podem ser encontrados em <https://3pg.forestry.ubc.ca/software/>. A versão utilizada neste trabalho, também em Microsoft Excel, foi adaptada de Stape (2002), e possui uma interface de usuário a qual facilita a entrada dos dados e a interpretação dos resultados. A parametrização é o método para delinear o valor de parâmetros específicos da espécie e pode ser atribuída usando relações alométricas e ajustando os modificadores de crescimento (GUPTA; SHARMA, 2019). A parametrização foi feita utilizando dados de uma série temporal de medições intensivas ao longo de 80 meses pela rede TECHS e em revisões bibliográficas. O modelo, que é executado em passos mensais, foi configurado para iniciar a partir do ano de 2013, quando os plantios estavam com 12 meses de idade e tiveram as primeiras avaliações de inventário e biomassa destrutiva realizadas.

1.2.7.1 Fator nutricional

O fator nutricional do modelo varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1, maior é considerada a nutrição deste solo. Para esta parametrização, como todos os sítios foram intensamente fertilizados, o valor considerado para todos os sítios foi de 0,8. O valor não foi considerado 1, pois mesmo sem qualquer limitação nutricional, outros fatores ambientais como a falta de água podem limitar a assimilação de nutrientes pelas plantas. Esta decisão foi baseada em trabalho publicado por Stape et al. (2010) que manipulou o fornecimento de água e nutrientes para plantações de eucaliptos clonais em um gradiente de mais de 1000 km. Concluiu-se que a fertilização adicional à comercial não aumentou a produtividade das parcelas, e em nosso estudo a fertilização foi feita de forma a superar a fertilização comercial para que não fossem criadas lacunas nutricionais.

1.2.7.2 Análises de biomassa e alometria

Foram realizadas duas temporadas de análises de biomassa, sendo que a primeira foi feita aos 30 meses e a segunda aos 80 meses. Na primeira temporada, as análises foram desenvolvidas nos sítios especiais e, na segunda, além dos sítios especiais, outros sítios também fizeram parte desta avaliação (o resumo destas informações pode ser visto no Apêndice A). Antes do abate, as plantas tiveram a circunferência à altura do peito determinada (CAP) e posteriormente a H_T . Para a determinação da biomassa, as plantas tiveram os galhos e as folhas removidos e pesados, o fuste foi dividido em cinco partes iguais até que o diâmetro chegasse a cinco cm e, desta forma, obteve-se o peso fresco de cada compartimento. Amostras de cada compartimento foram acondicionadas e levadas para o laboratório e tiveram o peso seco determinado (com a utilização de estufa de circulação forçada a 65° até a obtenção de massa constante); os valores foram extrapolados para o restante da planta. Como resultado, foram determinadas a H_T (m); o DAP (cm); a massa fresca e seca de galhos, folhas, lenho e casca (BG, BF, BL, BC - kg); e a área foliar total (AF – m²) (Tabela 1.5). A partir dos dados obtidos, equações alométricas foram elaboradas para explicar o crescimento do lenho das plantas e, desta forma, determinar a constante e a potência de massa lenhosa. A biomassa de raízes foi determinada para os sítios 22 e 30 aos 30 meses de idade.

Tabela 1.4 - Modelos de biomassa (B) para cada compartimento da planta. Onde: B = biomassa do compartimento (kg árv⁻¹); AF = área foliar (m²) D = diâmetro à altura do peito da árvore (cm); H = altura total (m)²

Idade (meses)	Ano	TECHS	Componente	Modelo	N	R ²	Valor p
30	2014	20	Casca	$B = 2,788 + 1,001 (D^2H)$	6	0,99	<0,001
	2014	22		$B = 2,614 + 0,868 (D^2H)$	6	0,98	<0,001
	2014	29		$B = 2,593 + 1,028 (D^2H)$	6	0,97	<0,001
	2014	30		$B = 2,701 + 0,857 (D^2H)$	6	0,99	<0,001
	2014	Global		$B = 2,925 + 1,111(D^2H)$	24	0,97	<0,001
	2014	20	Galhos	$B = 3,033 + 0,819 (D^2H)$	6	0,69	0,003
	2014	22		$B = 3,650 + 0,609 (D^2H)$	6	0,61	0,003
	2014	29		$B = 3,380 + 1,200 (D^2H)$	6	0,95	<0,001
	2014	30		$B = 4,733 + 2,010 (D^2H)$	6	0,98	0,004
	2014	Global		$B = 4,025 + 1,411(D^2H)$	24	0,85	<0,001
	2014	20	Folhas	$B = 2,711 + 1,309 (D^2H)$	6	0,98	<0,001
	2014	22		$B = 3,488 + 1,408 (D^2H)$	6	0,91	0,002
	2014	29		$B = 2,581 + 1,209 (D^2H)$	6	0,94	<0,001
	2014	30		$B = 3,459 + 1,261 (D^2H)$	6	0,90	<0,001
	2014	Global		$B = 3,256 + 1,420 (D^2H)$	24	0,89	<0,001
	2014	20	Área Foliar	$AF = 4,728 + 1,062 (D^2H)$	6	0,85	0,025
	2014	22		$AF = 6,196 + 1,716 (D^2H)$	6	0,89	0,04
	2014	29		$AF = 5,015 + 1,255 (D^2H)$	6	0,89	<0,001
	2014	30		$AF = 5,279 + 1,183 (D^2H)$	6	0,97	<0,001
	2014	Global		$AF = 5,390 + 1,361 (D^2H)$	24	0,93	<0,001
	2014	20	Lenho	$B = 4,936 + 0,987 (D^2H)$	6	0,99	<0,001
	2014	22		$B = 4,821 + 0,869 (D^2H)$	6	0,98	<0,001
	2014	29		$B = 4,800 + 1,028 (D^2H)$	6	0,97	<0,001
	2014	30		$B = 4,612 + 0,841 (D^2H)$	6	0,98	<0,001
	2014	Global		$B = 4,997 + 1,075 (D^2H)$	24	0,98	<0,001
80	2014	22	Raiz	$B = 4,177 + 1,463 (D^2H)$	6	0,96	0,0003
	2014	30		$B = 3,560 + 0,985 (D^2H)$	6	0,84	0,005
	2014	Global		$B = 3,709 + 1,106 (D^2H)$	12	0,89	<0,001
	2018	20	Casca	$B = 2,659 + 0,830 (D^2H)$	9	0,92	<0,001
	2018	22		$B = 2,112 + 1,108 (D^2H)$	9	0,94	<0,001
	2018	29		$B = 2,611 + 1,003 (D^2H)$	7	0,99	<0,001
	2018	30		$B = 2,631 + 0,684 (D^2H)$	9	0,8	<0,001
	2018	Global		$B = 2,553 + 0,797 (D^2H)$	34	0,72	<0,001
	2018	20	Galhos	$B = 0,863 + 1,761 (D^2H)$	9	0,71	<0,001
	2018	22		$B = 1,676 + 1,206 (D^2H)$	9	0,78	<0,001
	2018	29		$B = 1,814 + 1,103 (D^2H)$	7	0,93	<0,001
	2018	30		$B = 2,024 + 0,629 (D^2H)$	9	0,47	<0,001
	2018	Global		$B = 1,535 + 0,860 (D^2H)$	34	0,34	<0,001
	2018	20	Folhas	$B = 0,828 + 2,094 (D^2H)$	9	0,97	<0,001
	2018	22		$B = 0,706 + 2,033 (D^2H)$	9	0,95	<0,001
	2018	29		$B = 1,860 + 1,909 (D^2H)$	7	0,96	<0,001
	2018	30		$B = 1,766 + 1,107 (D^2H)$	9	0,63	0,011
	2018	Global		$B = 1,140 + 1,298 (D^2H)$	34	0,56	<0,001
	2018	20	Área Foliar	$AF = 3,107 + 2,006 (D^2H)$	9	0,97	0,004
	2018	22		$AF = 2,954 + 1,660 (D^2H)$	9	0,96	0,002
	2018	29		$AF = 3,897 + 1,708 (D^2H)$	7	0,94	<0,001
	2018	30		$AF = 3,800 + 1,056 (D^2H)$	9	0,58	<0,001
	2018	Global		$AF = 3,320 + 1,228 (D^2H)$	34	0,63	<0,001
	2018	20	Lenho	$B = 5,047 + 1,053 (D^2H)$	9	0,99	<0,001
	2018	22		$B = 5,132 + 1,168 (D^2H)$	9	0,99	<0,001
	2018	29		$B = 5,092 + 1,005 (D^2H)$	7	0,99	<0,001
	2018	30		$B = 5,166 + 1,046 (D^2H)$	9	0,97	0,001
	2018	Global		$B = 5,107 + 1,027 (D^2H)$	34	0,99	<0,001

² Continua como o Apêndice B para os demais sítios analisados aos 80 meses.

Com as equações de biomassa seca foi possível gerar parâmetros para o modelo, tais como a área foliar específica para a idade inicial e madura (AFE_i e AFE_m), a fração casca galho para a idade inicial e madura (F_{bb0} e F_{bbm}), a biomassa foliar (B_F) e sua derivação, a taxa de queda de folheto (item 1.2.7.7) e a partição folha e lenho para a idade inicial e madura (pFS_i e pFS_m). Além disso, foram gerados os valores iniciais de biomassa seca para os compartimentos aéreos.

A fração casca e galho foi determinada a partir da razão da quantidade de biomassa de casca e galho pela quantidade de biomassa de lenho, casca e galho (ALVARES, 2011). A idade inicial foi considerada aos 12 meses e a idade madura aos 80 meses após o plantio. A primeira análise de biomassa foi realizada aos 30 meses após o plantio e com o uso de seus dados foi possível desenvolver equações para estimar os valores iniciais necessários para a execução do modelo para quando as árvores estivessem com 12 meses.

$$Fbb_i = (B_C + B_G) / (B_L + B_C + B_G)$$

Fbb_i = fração casca e galho (na idade i); B_C = biomassa de casca (kg árvore^{-1}); B_G = biomassa de galho (kg árvore^{-1}); B_L = biomassa de lenho (kg árvore^{-1}).

A fração casca e galho média para a idade inicial e idade madura foram estabelecidas em, respectivamente, $F_{bb0} = 0,35$ e $F_{bbm} = 0,12$, e a partição entre folha e lenho $pFS_2 = 0,50$ e $pFS_{20} = 0,15$.

A biomassa alocada para raiz foi determinada com a aplicação da equação global de Spurr para todos os sítios. A fração de biomassa alocada para a raiz foi determinada a partir da razão da quantidade de biomassa de raiz pela quantidade de biomassa de lenho, casca, galho e raiz.

$$nRX_i = (B_R) / (B_L + B_C + B_G + B_R)$$

nRX_i = fração de raiz (na idade i); B_R = biomassa de raiz (kg árvore^{-1}); B_L = biomassa de lenho (kg árvore^{-1}); B_C = biomassa de casca (kg árvore^{-1}); B_G = biomassa de galho (kg árvore^{-1}).

O valor máximo observado para nRX foi 0,23 e o mínimo 0,06.

1.2.7.3 Densidade básica da madeira

Com o uso das informações constantes em inventários, foram selecionadas três árvores de DAP médio por sítio, das quais foram amostrados discos a 1,30 m a partir do solo, além da retirada posterior de uma cunha para a determinação da densidade básica, com e sem casca, seguindo as recomendações da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR 11941) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2003) (ROCHA, 2018). Considerou-se o valor médio global para a entrada no modelo, $\rho = 440 \text{ kg m}^{-3}$.

1.2.7.4 Área foliar específica

A área foliar específica (AFE, $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$), que expressa a relação entre área superficial das folhas (m^2) e o peso da massa seca das folhas (kg) foi determinada junto às análises destrutivas realizadas aos 30 e 80 meses de idade.

$$\text{AFE}_i = \text{AF}_i / \text{MSF}_i$$

AFE = área foliar específica em $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$; i = idade no período de observação; AF = área foliar em m^2 ; MSF = massa seca foliar em kg.

1.2.7.5 Massa lenhosa e máxima biomassa de fuste

A equação utilizada para a determinação da máxima biomassa de fuste no sítio foi potencial:

$$y = ax^b$$

em que y = máxima biomassa do fuste (kg árvore^{-1}), x = DAP (cm); a e b são coeficientes do modelo.

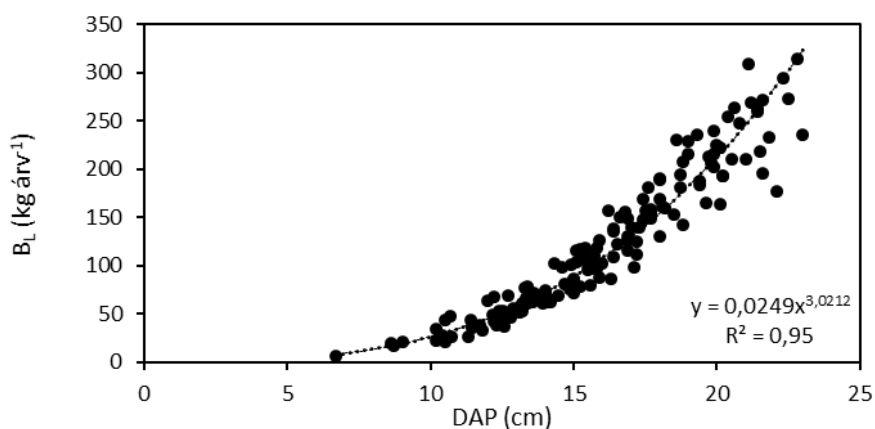
A massa lenhosa é utilizada em parâmetros alométricos do modelo, e a partir dela são determinados a potência de massa lenhosa e o coeficiente de massa lenhosa. Estes parâmetros são obtidos da relação da biomassa de lenho e o DAP.

$$B_L = ax^b,$$

em que B_L = biomassa do lenho (lenho + casca + galho), x = DAP (cm); a = coeficiente de massa lenhosa; b = potência de massa lenhosa.

A Figura 1.2 representa a relação alométrica entre a biomassa de lenho e o diâmetro à altura do peito, a partir da qual é possível determinar os parâmetros potência e massa lenhosa e a máxima biomassa de fuste.

Figura 1.2 - Relação alométrica entre a biomassa do lenho e o diâmetro à altura do peito em todos os sítios que tiveram a realização das amostragens destrutivas



A constante de massa lenhosa (a_s) foi estabelecida como $a_s = 0,0249$, a potência de massa lenhosa (n_s) foi determinada como $n_s = 3,021$, e a biomassa máxima de lenho (B_{Lx}) teve o valor $B_{Lx} = 300 \text{ kg árv}^{-1}$.

1.2.7.6 Deposição de folheto

A deposição de folheto foi medida mensalmente nos sítios especiais com o uso de 9 coletores de 50 cm x 50 cm instalados entre quatro árvores por parcela. A coleta de dados ocorreu entre outubro de 2013 e fevereiro de 2018. Após a coleta e pesagem

do material depositado nos coletores, foi determinada a matéria seca de cada amostra e estimada a deposição média mensal de folheto por hectare.

$$F = MSF/A$$

F = quantidade de folheto depositada em kg m^{-2} ; MSF = massa seca de folheto em kg; A = área do coletor em m^2 .

1.2.7.7 Taxa de queda de folheto

O 3-PG calcula a queda mensal de folheto ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$) como a taxa de queda de folheto (γ_f) que representa a relação da biomassa foliar senescente (B_{FS}) e a biomassa foliar na copa no período (B_F) (SANDS; LANDSBERG, 2002a).

$$\gamma_f = B_{FS} / B_F$$

γ_f = taxa de queda de folheto, B_{FS} = biomassa foliar senescente (Mg ha^{-1}) e B_F = biomassa foliar na copa no período (Mg ha^{-1}).

Em resposta às condições locais, houve grande variação de deposição entre os sítios e os meses observados. A média mensal global de deposição de folheto foi $0,45 \text{ Mg ha}^{-1}$. Os maiores valores de deposição de folheto ocorreram em sítios que apresentam melhores condições ambientais, como menores valores médios de déficit de pressão de vapor ou déficit hídrico. A maior quantidade de deposição de folheto se deve à maior quantidade de biomassa foliar produzida pela árvore. Quanto maior a idade do plantio, menor a biomassa foliar e, conseqüentemente, maior é a taxa de queda de folheto. Como não existe um submodelo que inclui as condições locais, assumiu-se para a taxa máxima de queda de folheto (γ_{Fx}) o valor médio global de 0,13 e para a taxa de queda de folheto para a idade inicial, $\gamma_{F0} = 0,062$.

1.2.7.8 Condutância estomática máxima

O equipamento LI-6400 (Li-Cor, Lincoln, NE, USA) foi utilizado para avaliar as variáveis relacionadas às trocas gasosas. Estas medições são difíceis e onerosas

para serem realizadas. As folhas são coletadas (para medição posterior) ou medidas diretamente a mais de 20 m de altura e poucas empresas possuem o equipamento para o desenvolvimento da atividade. Desta forma, optou-se em realizá-las no sítio 33, por ter uma localização estratégica (situado próximo a cidade de Piracicaba - cidade sede do IPEF - o que facilitava a logística para a realização das medições) e pela possibilidade de não existir restrições ambientais para as trocas gasosas no momento das aferições. As medições foram realizadas após 10-15 minutos de estabilização do equipamento, com a saturação de luz de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, umidade do ambiente acima de 50% e a concentração de CO_2 de 400 ppm. As variações entre a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor (DPV) foram tomadas na manhã, entre as 8 e 12h e à tarde, entre as 14 e 17h. Foram realizadas 12 medições em cada árvore em folhas completamente expandidas localizadas na porção central da copa. Foi utilizado o valor médio observado, de $0,0072 \text{ m s}^{-1}$.

Tabela 1.5 - Descrições dos símbolos, unidades, parâmetros utilizados no modelo 3-PG e forma de obtenção do valor

Símbolo	Unidades	Descrição	Valor utilizado	Obtenção
B _F	t ha ⁻¹	Biomassa inicial de folhas	2,07	O
B _L	t ha ⁻¹	Biomassa inicial de lenho	5,47	O
B _R	t ha ⁻¹	Biomassa inicial de raiz	1,09	O
PN/PG	-	Relação PPL/PPB	0,50	O
W _D	kg m ⁻³	Densidade básica da madeira	440	O
B _{Lx1000}	kg arv ⁻¹	Máx. biomassa de fuste para 1000 fustes ha ⁻¹	300	O
φ	molC mol PAR ⁻¹	Eficiência quântica do dossel	0,068	L2 ⁴
g _{Cx}	m s ⁻¹	Condutância estomática máxima ³	0,0182	O
g _{Sx}	m s ⁻¹	Condutância máxima do dossel	0,0072	O
K _g	kPa ⁻¹	Coeficiente de resposta do estômato ao DPV	0,05	L3 ⁴
g _B	m s ⁻¹	Camada delimitação da condutância do dossel	0,2	L3 ⁴
F _{bb0}	-	Fração casca galho para idade inicial	0,35	O
F _{bbm}	-	Fração casca galho para idade madura	0,15	O
f _{bb_med_age}	ano	Idade em que a fração casca galho tem valor intermediário	2	O
A _{FE0}	m ² kg ⁻¹	Área foliar específica idade inicial	9,4	O
A _{FE_m}	m ² kg ⁻¹	Área foliar específica idade madura	8,4	O
t _{A_{FE}}	ano	Idade em que a área foliar específica tem valor intermediário	2	L4 ⁴
k	-	Coeficiente de extinção de luz	0,5	L3 ⁴
t _{fullCan}	ano	Idade de fechamento do dossel	0	L3 ⁴
c _{pir}	-	Proporção chuva interceptada e evaporada	0,26	L1 ⁴
α	-	Albedo do dossel	0,2	L1
γ _{Fx}	mês ⁻¹	Taxa máxima do folheto	0,13	O
γ _{F0}	mês ⁻¹	Taxa de folheto para a idade inicial	0,06	O
t _{γF}	mês ⁻¹	Idade intermediária taxa de folheto	4	L
γ _R	mês ⁻¹	Taxa de renovação radicular mensal	0,015	L3 ⁴
n _{Rx}	-	Fração máxima de PPL para raízes	0,23	O
n _{Rn}	-	Fração mínima de PPL para raízes	0,06	O
p _{FS2}	-	Partição folhas e fustes DAP=2	0,5	O
p _{FS20}	-	Partição folhas e fustes DAP=20	0,15	O
a _s	-	Coeficiente massa lenhosa	0,025	O
n _s	-	Potência massa lenhosa	3,02	O
s _{xaw}	mm	Capacidade de água disponível	-	S
s _{k1w}	mm	Texture Coefficient for Soil Water Modifier	-	L3 ⁴
s _{k2w}	mm	Power Coefficient for Soil Water Modifier	-	L3 ⁴
f _θ	-	Déficit de razão de umidade para f _θ =0,5	0	L3 ⁴
n _θ	-	Potência do déficit de razão de umidade	1	L3 ⁴
T _{max}	°C	Máxima temperatura para crescimento	28,65	O ⁵
T _{min}	°C	Ótima temperatura para crescimento	7,25	O ⁵
T _{opt}	°C	Mínima temperatura para crescimento	23,95	O ⁵

Forma de obtenção do dado: O = observado em campo; L = obtido em literatura; S = sítio específico

³ Comunicação pessoal, dado não publicado Campoe, O.C.

⁴ L1 = Stape (2002), L2 = Almeida et al. (2004); L3 = Sands e Landsberg (2002); L4 = Stape et al. (2004).

1.2.8 Calibração do modelo

Uma parte dos dados analisados que representa 30% do total (sítios especiais) foi destinada a calibração do modelo e estes dados, foram escolhidos por representarem os extremos climáticos do projeto e por compreendermos que estes dados possuiriam os intervalos de dados dos outros sítios. Os outros 70% dos dados foram utilizados para a validação do modelo. A calibração do modelo foi desenvolvida manualmente com a comparação das estimativas para o diâmetro à altura do peito, para a biomassa de lenho e para o índice de área foliar com os dados obtidos em campo nos sítios especiais. As simulações apresentaram boa relação com os dados observados em campo. A calibração foi direcionada a ajustes de pequenos desvios, tais como o particionamento folha/tronco, a máxima eficiência quântica do dossel e a constante e potência de massa lenhosa. A calibração foi realizada com base em valores citados pela literatura ou no caso da constante e da potência de massa lenhosa, a calibração foi feita com base nos dados observados, testando os conjuntos de dados de análises completas ou restringindo aos sítios especiais. O melhor ajuste foi feito com a utilização do conjunto de dados de análises completas.

1.2.9 Validação do modelo

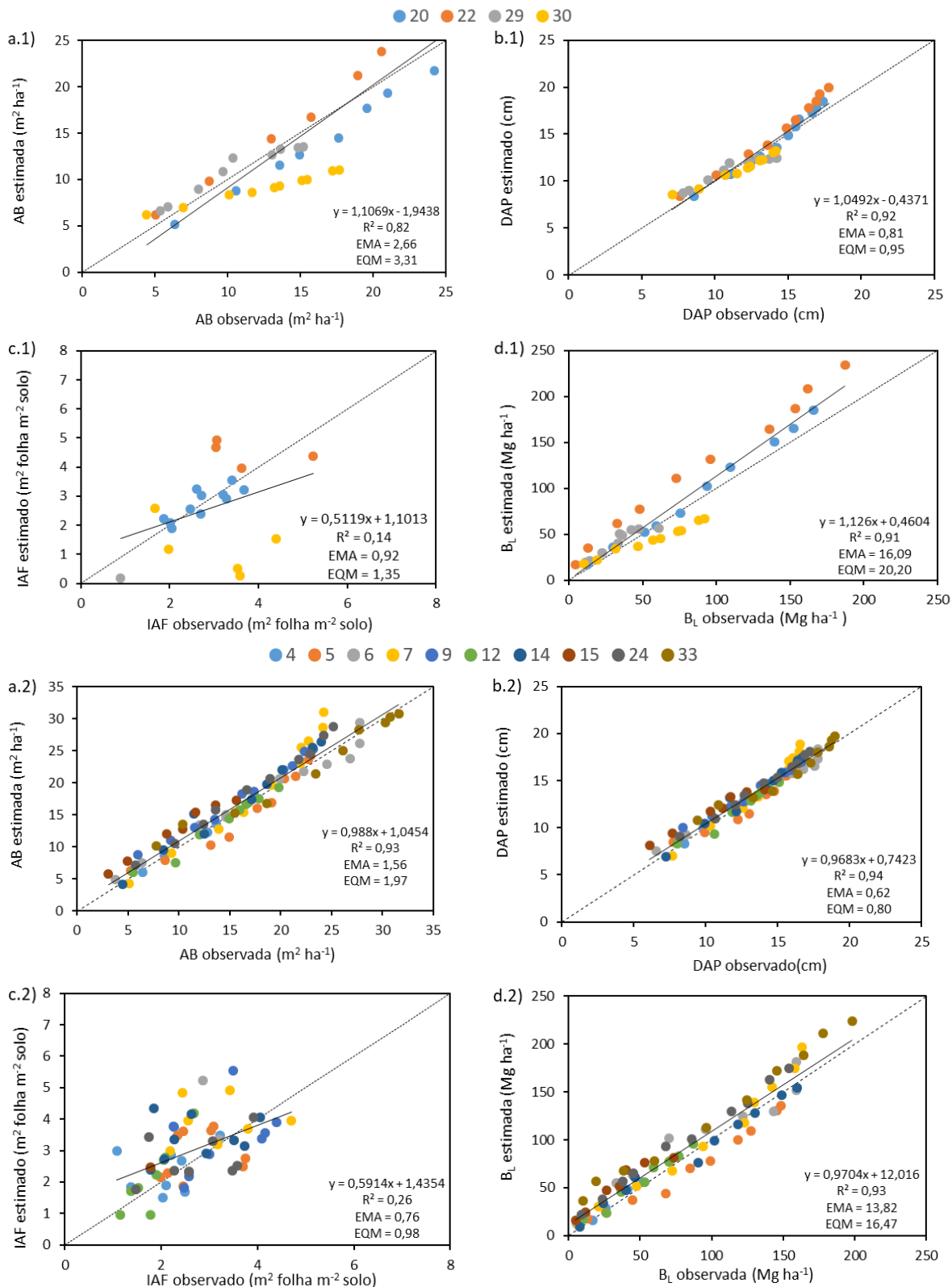
Após o modelo ter sido executado, foi realizada a comparação entre os dados gerados pelo modelo e os dados observados em campo, de forma a avaliar a confiabilidade e a capacidade de sua extrapolação. A seleção dos sítios validados se deu pela presença de avaliações de IAF, menor número de acontecimentos adversos em campo como o ataque de pragas e doenças, mortalidade e maior representatividade geográfica.

Foram utilizados o coeficiente de correlação de Pearson, o erro médio absoluto e a raiz do erro médio quadrático para validar o desempenho do modelo em simular a produção de biomassa do lenho (Mg ha^{-1}), a área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), o DAP (cm) e o IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

1.3 RESULTADOS

A Figura 1.3 representa a execução do modelo nos sítios de calibração (a.1 a d.1) e a validação dos dados estimados pelo modelo de forma a compará-los com os dados observados em campo para o clone de *Eucalyptus urophylla* cultivado em 10 sítios distribuídos ao longo do país (sítios de validação, figuras a.2 a d.2). As linhas nas figuras são linhas 1:1, que facilitam a impressão visual da correspondência entre valores simulados e observados. Para o conjunto de sítios de calibração, a área basal, o diâmetro à altura do peito e a biomassa de lenho apresentaram alta correlação com os dados observados, com valores de R^2 de 0,82; 0,92 e 0,93, respectivamente. O mesmo não aconteceu para o índice de área foliar, que apresentou $R^2 = 0,14$. Os valores de R^2 para os sítios de validação foram 0,93, 0,94, 0,94 e 0,26 para a área basal, o diâmetro a altura do peito, a biomassa de lenho e para o índice de área foliar, respectivamente. As simulações foram calculadas utilizando os valores dos parâmetros contidos na Tabela 1.6.

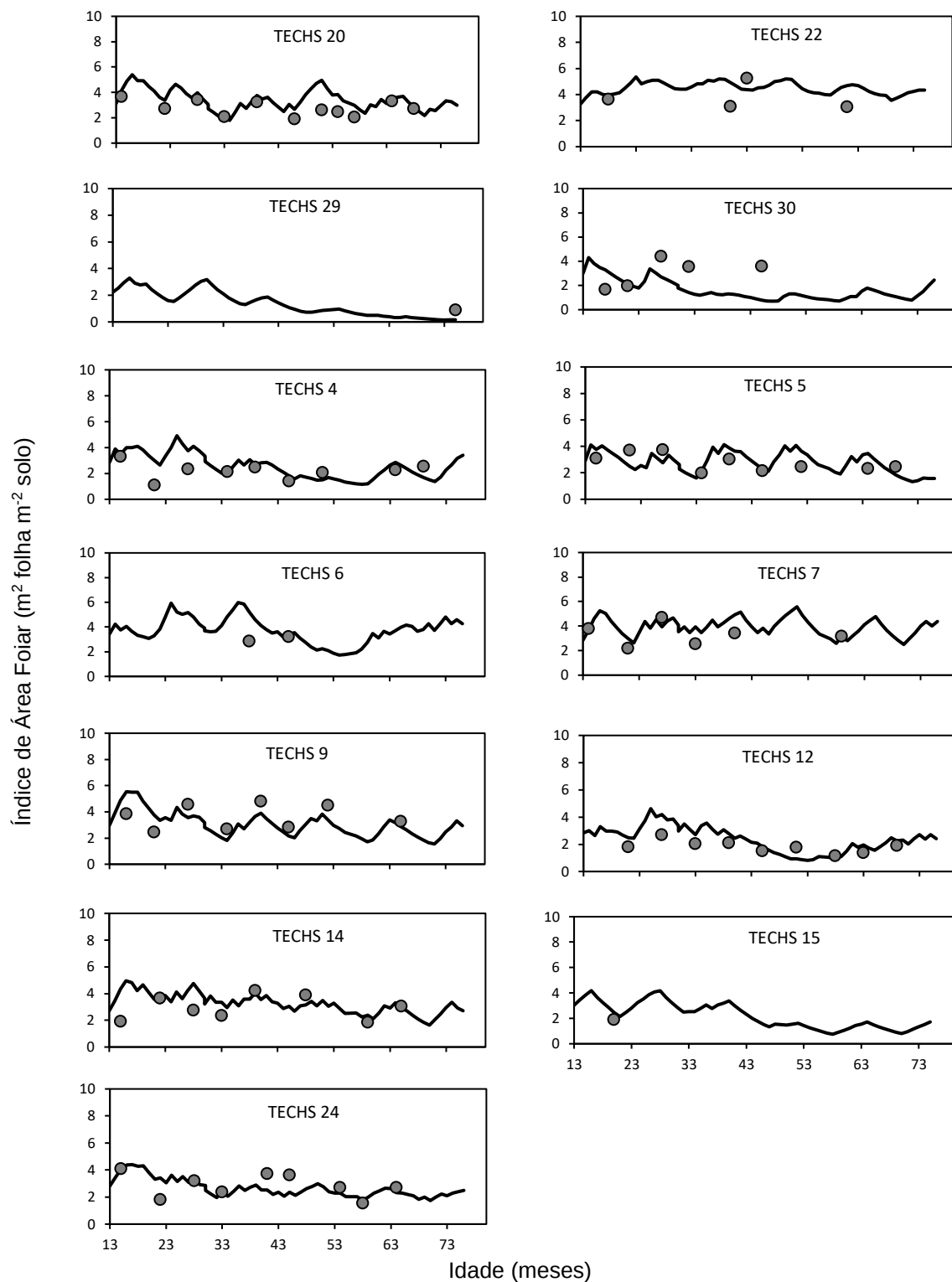
Figura 1.3 - Relação entre os valores estimados e observados da área basal (a), diâmetro à altura do peito (b), índice de área foliar (c) e biomassa de lenho (d). O primeiro conjunto de dados representa o conjunto de calibração (a.1, b.1, c.1 e d.1) e o segundo conjunto de dados representa o conjunto de validação (a.2, b.2, c.2 e d.2). As cores indicam os diferentes locais. R^2 = coeficiente de determinação; EMA = Erro Absoluto Médio; EQM = Erro Quadrático Médio



O DAP foi a variável que apresentou maiores valores para os coeficientes de determinação e menores valores para o erro absoluto médio (EMA) e para o erro quadrático médio (EQM), e o IAF foi a variável que apresentou os menores valores para os coeficientes de determinação e maiores valores para EMA e EQM.

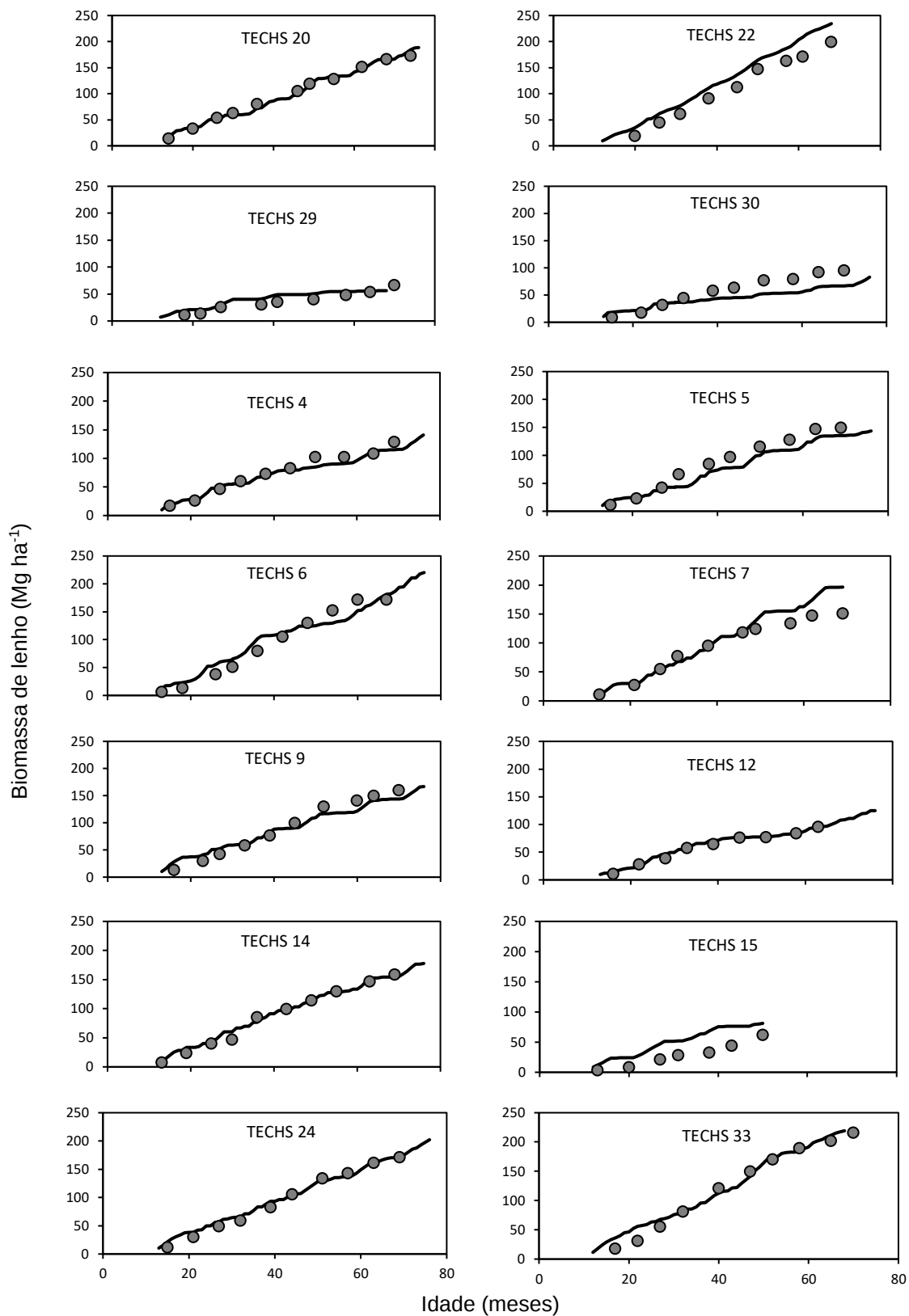
As diferenças para o índice de área foliar foram grandes. Os sítios que apresentaram os valores médios máximos e mínimos foram os sítios especiais 22 e 29 com 4,57 e 0,94 m² m⁻², respectivamente. O IAF teve valor máximo entre os 15 e 40 meses e valor mínimo no final da rotação aos 75 meses. A Figura 1.4 mostra a evolução do IAF estimada e observada ao longo dos 75 meses de observação.

Figura 1.4 - Comparação entre o índice de área foliar observado e estimado durante a rotação.
As figuras TECHS 20, 22, 29 e 30 representam os sítios utilizados na calibração do modelo e
as figuras TECHS 4, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15 e 24 representam os sítios utilizados na validação
dos dados. As linhas representam os valores estimados pelo modelo e os pontos
representam os valores observados



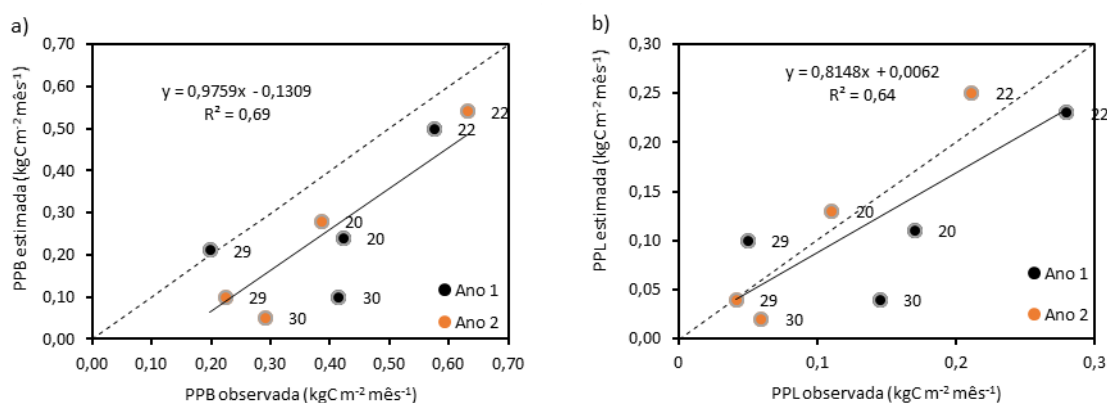
A Figura 1.5 compara a biomassa de lenho (lenho, casca e galhos) observada e estimada pelo modelo. As diferenças de produtividade foram representadas pelo modelo, que captou as interferências ambientais na produção de biomassa de lenho.

Figura 1.5 - Comparação entre a biomassa de lenho observada e estimada durante a rotação.
As figuras TECHS 20, 22, 29 e 30 representam os sítios utilizados na calibração do modelo e
as figuras TECHS 4, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15 e 24 representam os sítios utilizados na validação
dos dados. As linhas representam os valores estimados pelo modelo e os pontos
representam os valores observados



As figuras 1.6 a e 1.6 b representam a estimativa da produtividade primária bruta (PPB) e da produtividade primária líquida acima do solo (PPL) para os sítios especiais entre outubro de 2013 e outubro de 2014 (ano 1) e outubro de 2014 e outubro de 2015 (ano 2), períodos em que os sítios especiais passaram por análises de balanço de carbono. Os resultados mostraram uma boa correlação em termos de regressão linear (1:1), com coeficiente de determinação (R^2) de 0,60 e 0,53 para a PPB e a PPL, respectivamente. A PPB média dos quatro sítios aos dois anos foi $0,41 \text{ kg C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ e a PPL $0,12 \text{ kg C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. A relação PPL:PPB variou entre 0,50 e 0,15, sendo que os maiores valores foram encontrados em sítios de menores restrições ambientais.

Figura 1.6 - Relação entre os valores estimados e observados da produtividade primária bruta (a) e da produtividade primária líquida acima do solo (b). As cores indicam diferentes anos de avaliação. R^2 = coeficiente de determinação



1.4 DISCUSSÃO

O modelo 3-PG foi parametrizado e validado em diferentes regiões brasileiras usando 80 meses de dados de produtividade e foram obtidas estimativas de AB, DAP, B_L e IAF, no entanto, o modelo não estimou de maneira adequada os parâmetros relacionados à folha. Os parâmetros relacionados à folha são complexos de serem avaliados, uma vez que as folhas são os tecidos mais efêmeros da planta e são altamente influenciados por fatores exógenos. A frequência de avaliação do IAF pode estar relacionada a eficiência do modelo, pois um monitoramento maior possibilitaria um maior número de dados para a calibração do modelo. Para áreas maiores e homogêneas quanto ao uso de clones e/ou espécies este problema poderia ser

resolvido com a utilização de imagens de satélite de alta resolução (SINHA et al., 2015).

As simulações em escala de parcela mostraram que o modelo é capaz de estimar o crescimento em uma ampla variedade de locais, entretanto as melhores previsões foram para sites de produtividade média, mesmo resultado encontrado por GONZÁLEZ-GARCÍA et al. (2016). O conjunto de dados utilizados na validação do modelo mostrou maiores correlações com os dados observados do que o conjunto de calibração, o que pode ser justificado pelo uso dos extremos climáticos no processo de calibração. Os sítios que representaram os extremos climáticos como o 22 e o 30 apresentaram os menores e os maiores valores médios de DPV e de déficit hídrico e também apresentaram as menores correlações entre os dados observados e estimados, resultando em super e subestimativa da produtividade, respectivamente. Este fato pode estar relacionado a necessidade de ajustes nos modificadores fisiológico e da temperatura de forma que não influenciem tão negativa ou positivamente a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, a eficiência quântica e a condutância da copa. Elli et al. (2019) observaram que locais que possuem temperaturas mais baixas apresentaram superestimação de produtividade e indicaram que este resultado pode estar relacionado à incapacidade do modelo de penalizar o crescimento por temperaturas mínimas extremas e ocorrência de geada, pois o modelo assume que não há fotossíntese (os estômatos permanecerão fechados) nos dias de geada, mas a mortalidade das árvores não é simulada.

O uso de equações do sítio e de idades específicas para determinar a biomassa dos compartimentos, a área foliar e suas variáveis correlatas para parametrizar o modelo possibilitou uma maior proximidade com os dados reais, uma vez que o erro global é normalmente maior que o erro de modelos específicos e podem ignorar os efeitos ambientais nas estimativas de biomassa (CAMPOE et al., 2012).

Os valores dos parâmetros encontrados neste trabalho correspondem a 80 meses de monitoramento de plantios clonais de *Eucalyptus urophylla* em diferentes regiões brasileiras. Os valores originais dos parâmetros foram propostos para plantações florestais de *Eucalyptus* na Austrália (SANDS; LANDSBERG, 2002b). Os valores dos parâmetros obtidos são comparáveis aos encontrados e empregados em outros estudos, como a fração casca-galho na idade inicial e madura, a máxima biomassa de fuste para 1000 árvores ha⁻¹, a relação PN/PG, a área foliar específica na idade inicial e madura (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004; SANDS; LANDSBERG,

2002a; STAPE; RYAN; BINKLEY, 2004), entretanto as pequenas diferenças encontradas representam o aperfeiçoamento da parametrização para um clone de tanta importância comercial.

O detalhamento do crescimento disponibilizado neste trabalho pôde ser usado para analisar os padrões de crescimento do clone. O particionamento de biomassa se mostrou distinto de outros materiais genéticos do gênero relatados anteriormente. A fração de biomassa alocada para as raízes varia entre duas a três vezes menos que a normalmente encontrada (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004; SANDS; LANDSBERG, 2002b; STAPE; RYAN; BINKLEY, 2004); por outro lado, a relação entre o fluxo de carbono abaixo do solo e a PPB foi maior, o que implica em menores taxas de PPB para sítios que apresentam menores valores de precipitação e temperatura média anual elevada.

O parâmetro alométrico de potência de massa lenhosa (*ns*) foi maior que os valores relatados por (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004; SANDS; LANDSBERG, 2002b; STAPE, 2002). Esta diferença é importante, pois implica em mudanças na quantidade de biomassa alocada em cada compartimento e consequentemente no IAF, o que demonstra a importância da determinação deste parâmetro de forma específica. A quantidade de biomassa alocada no lenho cresce de forma linear e sofre menores variações ao longo do tempo do que a biomassa alocada nas folhas, esta é a variável mais importante a ser estimada pelo modelo para cultivos focados em bioenergia e apresentou as correlações mais altas do modelo com R^2 de 0,91 e 0,94 para os sítios de calibração e validação, respectivamente. Em nosso trabalho uma única parametrização foi feita para diferentes locais e funcionou bem, com exceção da determinação do IAF, que poderia ser melhor ajustado, quando possível, com o parâmetro de potência de massa lenhosa desenvolvido para o sítio específico.

A partição entre folhas e lenho observada também foi menor que o que é normalmente relatado em outros trabalhos. Em nosso caso, os valores para a idade inicial foram de 0,5 e para a idade final de 0,15. Nos estudos de Stape (2002), Almeida et al. (2004) e Sands e Landsberg (2002b), os pares de valores foram 0,96 e 0,034; 0,7 e 0,1; e 1 e 0,15, respectivamente. Este fato pode ser justificado pelo comportamento diferenciado do clone em alocar maior quantidade de biomassa para lenho. Ainda que o sítio apresente características ambientais adversas como elevado

déficit hídrico, o clone tende a alocar maior proporção de biomassa para o lenho e folhas⁵.

Sítios que possuem maior oferta de recursos como nutrientes e água proporcionam um melhor desenvolvimento de copa, maior IAF, interceptação de radiação solar e, conseqüentemente, maior PPB e PPL. O modelo foi sensível às variações ambientais. Locais que apresentam maior déficit hídrico, variável que expressa a relação entre a temperatura, a capacidade de água disponível e a precipitação, apresentaram menor PPB que locais que possuem menor déficit hídrico, sítios 29 e 30 e sítios 20 e 22, respectivamente. Binkley et al. (2017) estudaram as interações do clima e do espaçamento em diferentes clones plantados entre o Brasil e o Uruguai e relataram que o aumento em 1°C da temperatura representa uma redução de 2,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, assim como o aumento de 100 mm ano⁻¹ de precipitação implica em um aumento de 1,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

O sítio 29 representa o extremo máximo de temperatura média e o sítio 30 a mínima precipitação, além de serem os sítios que apresentaram os maiores valores para o déficit hídrico. Estes sítios também foram os que apresentaram menores valores para a PPB e a PPL, concordando com o proposto pelo modelo, em que condições ambientais mais críticas penalizam a eficiência quântica do dossel, assim como a alocação de biomassa acima do solo. No modelo a relação PPL:PPB é fixa, porém o que observamos em campo foi que a flutuação desta relação é alta e influenciada pelas condições ambientais, os sítios que apresentaram menor estresse ambiental proporcionaram maior aproveitamento da PPB, resultando em maior relação PPL:PPB. O modelo poderia ser aprimorado de forma que o modificador fisiológico penalizasse a relação PPL:PPB conforme as condições ambientais, concordando com o trabalho de Collalti e Prentice (2019), que afirmaram haver razões suficientes para rejeitar a razão universal PPL:PPB, justificando que essa relação é influenciada pela idade do povoamento, por fatores ambientais e pela gestão da floresta, uma vez que o fornecimento adequado de recursos como adubos e controle da densidade do plantio podem favorecer a produção de biomassa acima do solo.

A deposição média mensal de folheto variou entre 0,33 e 0,55 Mg ha⁻¹, sendo representada pelo sítio menos produtivo e pelo sítio mais produtivo, respectivamente. A tendência geral de maiores quantidades de folheto em parcelas mais produtivas do

⁵ Comunicação pessoal com Campoe, O.C

que nas parcelas menos produtivas observadas em nosso estudo também foi relatada por Giardina et al., (2003) para plantações de *E. saligna* no Havaí.

A taxa de queda de folheto foi coincidente com os valores encontrados por Almeida (2003) e Lemos (2012), e entre duas a quatro vezes maior que a relatada por Sands; Landsberg (2002b) e Stape (2002). As taxas médias de queda de folheto aumentaram com o envelhecimento do plantio. Os maiores valores foram observados no sítio 29 (0,66) e os menores no sítio 22 (0,16). A taxa de queda de folheto implica na razão entre a quantidade de folheto depositada e a quantidade de biomassa foliar na copa, a maior taxa de queda de folheto observada no sítio 29 é influenciada pelo elevado déficit hídrico do sítio e representa a estratégia de sobrevivência da planta em períodos secos.

O ajuste do modelo 3-PG foi eficiente, uma vez que os dados de saída tiveram um R^2 maior que 0,93 (volume, biomassa de lenho, DAP e AB) e $R^2 = 0,16$ para IAF, indicando que as estimativas de produtividade obtidas pelo modelo 3-PG apresentaram correlação significativa com os dados observados nas medições de campo.

1.5 CONCLUSÃO

A variabilidade espacial dos sítios possibilitou uma ampla representatividade edafoclimática e, conseqüentemente, a diversidade da produtividade ao longo deste gradiente.

O conjunto de parâmetros determinados permitiu que o 3-PG reproduzisse padrões de crescimento em diferentes regiões de forma fiel aos dados observados em campo para o DAP, para a AB e para a biomassa de lenho.

As principais limitações no desenvolvimento do trabalho foram relacionadas as análises de folhas e raízes, que devido ao custo e dificuldade de execução possuem um número reduzido de medições em campo. Estas limitações afetam a comparação do IAF estimado com o observado e os parâmetros relacionados a alocação de carbono. As medições do IAF podem ser feitas com o uso de imagens de satélite de alta resolução e quanto às raízes mais estudos precisam ser desenvolvidos para compreender os diferentes padrões de alocação de carbono para diferentes clones e espécies.

Em estudos futuros o modelo pode ser modificado com aprimoramentos:

- a) Na penalização do crescimento por temperaturas extremas máximas ou mínimas, ponto onde observamos super e subestimativa da produtividade;
- b) Na relação NPP:GPP de forma que ela sofra penalização pelo modificador fisiológico conforme as condições ambientais;
- c) Na alocação de carbono para raízes, mas para isso novos estudos com ênfase neste compartimento precisam ser desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C. **Application of a process-based model for predicting and explaining growth in Eucalyptus**. [s.l.] The Australian National University School, 2003.
- ALMEIDA, A. C. et al. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 167–177, 2004.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 179–195, 2004.
- ALVARES, C. A. Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do estado de São Paulo. 2011.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAUJO, M. J. et al. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 454, n. June, p. 117631, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica** Abnt. Rio de Janeiro: [s.n.].
- BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. September, p. 271–283, 2017.
- BORGES, J. S. **PARAMETRIZAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA EUCALIPTO NA REGIÃO DO CERRADO DE MINAS GERAIS**. [s.l.: s.n.].
- CAMPOE, O. C. et al. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a Eucalyptus grandis plantation across a gradient of productivity, in São Paulo State, Brazil. **Tree Physiology**, v. 32, n. 6, p. 696–706, jun. 2012.
- COLLALTI, A.; PRENTICE, I. C. Is NPP proportional to GPP? Waring's hypothesis twenty years on. **Tree Physiology**, v. 39, n. 8, p. 1437–1483, 2019.
- CUDDINGTON, K. et al. Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world. **Ecosphere**, v. 4, n. 2, p. 18, 2013.
- DYE, P. J. Modelling growth and water use in four pinus patula stands with the 3-pg model. **Southern African Forestry Journal**, v. 191, n. 1, p. 53–63, 2001.
- FORRESTER, D. I.; TANG, X. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. **Ecological Modelling**, v. 319, p. 233–254, 16 maio 2015.
- FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new

environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1–21, 2015.

GIARDINA, C. P. et al. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. **Global Change Biology**, v. 9, n. 10, p. 1438–1450, 1 out. 2003.

GONZALEZ-BENECKE, C. A. et al. Forest Ecology and Management Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 55–75, 2014.

GONZALEZ-BENECKE, C. A. et al. Forest Ecology and Management Regional validation and improved parameterization of the 3-PG model for *Pinus taeda* stands. **Forest Ecology and Management**, v. 361, p. 237–256, 2016.

GONZÁLEZ-GARCÍA, M. et al. Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 1, p. 194–210, 2016.

GUPTA, R.; SHARMA, L. K. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: A review. **Ecological Modelling**, v. 397, n. December 2018, p. 55–73, 2019.

HUNG, T. T. et al. Predicting productivity of *Acacia* hybrid plantations for a range of climates and soils in Vietnam. **Forest Ecology and Management**, v. 367, n. 2016, p. 97–111, 2016.

JOHNSEN, K. et al. Process models as tools in forestry research and management. **Forest Science**, v. 47, n. 1, p. 2–8, 2001.

KLIPPEL, V. H. **MODELAGEM ECOFISIOLÓGICA DE CULTIVOS DE EUCALIPTO EM REGIÕES SUBTROPICAIS DO BRASIL**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2015.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. **FBMIS**, v. 1, p. 49–63, 2003.

LANDSBERG, J. et al. Analysis of biomass accumulation and stem size distributions over long periods in managed stands of *Pinus sylvestris* in Finland using the 3-PG model. **Tree Physiology**, v. 25, n. 7, p. 781–792, 2005.

LANDSBERG, J. .; WARING, R. .; COOPS, N. . Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v. 172, n. 2–3, p. 199–214, 20 jan. 2003.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. **Physiological Ecology of forest production Princípios, Process and Models**. 1. ed. [s.l.: s.n.].

LEMOS, C. C. Z. DE. **Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo**. [s.l.] Universidade

de São Paulo, 2012.

MATTOS, E. M. **Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero Eucalyptus**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.

PASSIOURA, J. B. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? n. 1985, p. 690–694, 1996.

PAUL, K. I. et al. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, n. 2–3, p. 237–247, 2007.

POTITHEP, S.; YASUOKA, Y. Application of the 3-PG model for gross primary productivity estimation in deciduous broadleaf forests: A study area in Japan. **Forests**, v. 2, n. 2, p. 590–609, 2011.

ROCHA, S. M. G. **Basic density of Eucalyptus wood in climatic gradient in Brazil (in portuguese)**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1–3, p. 273–292, 2002a.

SANDS, P.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1–3, p. 273–292, 28 jun. 2002b.

SINHA, S. et al. A review of radar remote sensing for biomass estimation. **Int. J. Environ. Sci. Technol**, v. 12, p. 1779–1792, 2015.

STACKHOUSE, P.W., JR., DAVID WESTBERG, JAMES M. HOELL, WILLIAM S. CHANDLER, AND T. Z. Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) Agroclimatology Methodology: 10 x 10 Spatial Data. 2015.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in Northeastern Brazil**. [s.l.] Colorado State University, 2002.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of Eucalyptus grandis x urophylla with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 219–234, 2004.

TICKLE, P. K.; COOPS, N. C.; HAFNER, S. D. Comparison of a forest process model (3-PG) with growth and yield models to predict productivity at Bago State Forest, NSW. **Australian Forestry**, v. 64, n. 2, p. 111–122, 2001.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

ZHAO, M. et al. Simulating age-related changes in carbon storage and allocation in a Chinese fir plantation growing in southern China using the 3-PG model. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 6, p. 1520–1531, 2009.

APÊNDICE A - Resumo dos resultados obtidos para as variáveis utilizadas na parametrização do modelo e na elaboração das equações ajustadas.

Idade	TECHS	DAP (cm)	H (m)	B _G (kg árv ⁻¹)	B _C (kg árv ⁻¹)	B _L (kg árv ⁻¹)	B _F (kg árv ⁻¹)	AF (m ²)
30	20	12,2 ± 2,4	17,1 ± 1,2	7,1 ± 2,4	4,3 ± 1,8	38,3 ± 15,6	2,8 ± 1,4	28,5 ± 12,3
	22	13 ± 1,6	15,8 ± 0,6	16,7 ± 2,9	4,3 ± 1	39,2 ± 8,7	5 ± 1,5	51,4 ± 18,1
	29	10,1 ± 2,1	13,7 ± 1,9	3,1 ± 1,7	1,9 ± 0,9	17,3 ± 7,8	1,4 ± 0,8	14,5 ± 8,3
	30	11,8 ± 1,6	16,4 ± 1	6,7 ± 3,1	4,3 ± 1,1	29,8 ± 7,9	5,3 ± 2,1	36,3 ± 14,2
80	2*	18,5 ± 3,2	29,8 ± 3,6	3,2 ± 2,6	13,4 ± 6,2	173,2 ± 81,5	1,3 ± 0,8	-
	4*	16,2 ± 3,3	24,2 ± 4,4	6,5 ± 3,1	14,4 ± 6,6	96,6 ± 58,9	2,3 ± 1,4	8,4 ± 5,0
	5*	15,8 ± 4,1	26,4 ± 3,7	10,5 ± 3,0	12,1 ± 6,8	113,1 ± 68,0	2,5 ± 1,9	7,6 ± 5,7
	7*	18,0 ± 2,2	28,8 ± 1,4	13,5 ± 8,2	15,2 ± 6,0	166,6 ± 56,6	7,9 ± 3,8	68,8 ± 27,4
	8*	13,9 ± 2,4	19,2 ± 1,8	4,9 ± 1,6	15,2 ± 5,9	45,7 ± 18,8	2,0 ± 1,2	16,4 ± 8,7
	9*	17,1 ± 1,6	28,8 ± 0,7	7,9 ± 2,3	7,0 ± 2,3	119,5 ± 30,4	4,5 ± 1,7	36,7 ± 11,9
	10*	17,2 ± 3,2	26,6 ± 2,5	5,9 ± 2,7	6,2 ± 2,6	135,9 ± 62,7	1,1 ± 0,5	6,6 ± 2,1
	13*	17,8 ± 3,3	26,6 ± 2,7	3,4 ± 2,0	12,7 ± 5,2	141,6 ± 66,4	2,2 ± 1,6	18,9 ± 13
	14*	16,3 ± 3,7	27,1 ± 4,0	6,1 ± 3,2	9,7 ± 4,9	137,0 ± 76,7	3,6 ± 2,3	28,3 ± 11,9
	19*	15,2 ± 1,4	18,6 ± 0,9	6,6 ± 1,8	8,0 ± 1,7	66,6 ± 16,3	2,5 ± 0,9	17,3 ± 5,5
	20	18,1 ± 3,3	26,7 ± 3,1	2,5 ± 2,0	13,4 ± 5,6	144,7 ± 66,2	2,3 ± 1,8	22,5 ± 16,5
	22	18,0 ± 2,7	30,0 ± 3,2	5,6 ± 2,3	8,5 ± 3,5	173,7 ± 67,2	2,3 ± 1,2	20,6 ± 9,9
	23*	15,9 ± 3,6	22,6 ± 2,5	3,4 ± 3,4	21,1 ± 14,6	83,4 ± 48,5	1,5 ± 1,1	14,7 ± 10,2
	24*	17,1 ± 3,3	27,2 ± 5,1	2,1 ± 1,2	10,9 ± 5,1	140,3 ± 73,4	1,2 ± 0,8	10,3 ± 5,9
	29	16,2 ± 4,3	18,5 ± 4,0	3,4 ± 2,8	7,6 ± 4,9	90,1 ± 54,0	2,6 ± 2,2	21,8 ± 17,4
	30	14,8 ± 1,6	23,6 ± 0,8	5,1 ± 1,1	8,9 ± 1,6	89,7 ± 22,4	2,9 ± 0,9	23,1 ± 6,9
	31*	16,3 ± 2,6	25,7 ± 3,0	4,4 ± 1,1	10,8 ± 4,3	103,9 ± 44,2	1,7 ± 1,0	20,2 ± 11,2
	33*	19,0 ± 2,6	31,2 ± 2,1	6,3 ± 3,6	7,9 ± 2,6	174,5 ± 64,4	2,9 ± 1,5	25,0 ± 13,0

DAP = diâmetro à altura do peito, H = altura total, B_G = biomassa dos galhos, B_C = biomassa da casca, B_L = biomassa do lenho e AF = área foliar.

* As informações utilizadas nesses sites são restritas à elaboração da equação alométrica da relação entre a biomassa da madeira e o DAP para determinar a máxima biomassa para 1000 árvores por hectare, a constante e a potência da biomassa. Para obter informações detalhadas sobre esses locais, consultar Binkley et al. (2017). Não há informações sobre a área foliar do sítio 2.

APÊNDICE B - Modelos de biomassa (B) para cada compartimento da planta.

Ano	TECHS	Componente	Modelo	N	R ²	Valor-p
2018	9	Casca	$B = 2,171+1,58(D^2H)$	7	0,85	<0,001
2018	7		$B = 2,767+1,34(D^2H)$	7	0,98	<0,001
2018	5		$B = 2,822+1,017(D^2H)$	4	0,98	0,001
2018	4		$B = 2,961+0,782(D^2H)$	7	0,93	<0,001
2018	33		$B = 1,894+1,108(D^2H)$	6	0,94	<0,001
2018	24		$B = 2,519+0,849(D^2H)$	6	0,98	<0,001
2018	14		$B = 2,541+0,949(D^2H)$	13	0,98	<0,001
2018	Global		$B = 2,523+0,659(D^2H)$	126	0,41	<0,001
2018	9	Galhos	$B = 2,211+1,056(D^2H)$	7	0,52	<0,001
2018	7		$B = 2,607+1,815(D^2H)$	7	0,89	<0,001
2018	5		$B = 2,521+0,42(D^2H)$	4	0,98	<0,001
2018	4		$B = 1,997+0,467(D^2H)$	7	0,32	<0,001
2018	33		$B = 1,407+2,234(D^2H)$	6	0,87	0,001
2018	24		$B = 0,769+0,659(D^2H)$	6	0,54	0,015
2018	14		$B = 1,912+1,027(D^2H)$	13	0,82	<0,001
2018	Global		$B = 1,698+0,704(D^2H)$	126	0,21	<0,001
2018	9	Folha total	$B = 1,753+1,785(D^2H)$	7	0,77	<0,001
2018	7		$B = 2,101+1,742(D^2H)$	7	0,96	<0,001
2018	5		$B = 1,237+1,276(D^2H)$	4	0,96	0,015
2018	4		$B = 1,14+1,009(D^2H)$	7	0,75	0,002
2018	33		$B = 0,712+1,903(D^2H)$	6	0,96	<0,001
2018	24		$B = 0,16+0,458(D^2H)$	6	0,24	0,556
2018	14		$B = 1,662+1,612(D^2H)$	13	0,88	<0,001
2018	Global		$B = 1,046+1,077(D^2H)$	126	0,43	<0,001
2018	9	Área foliar total	$AF = 3,816+1,517(D^2H)$	7	0,77	<0,001
2018	7		$AF = 4,268+1,369(D^2H)$	7	0,88	<0,001
2018	5		$AF = 2,359+1,204(D^2H)$	4	0,95	0,004
2018	4		$AF = 2,442+0,972(D^2H)$	7	0,72	<0,001
2018	33		$AF = 2,865+1,903(D^2H)$	6	0,97	<0,001
2018	24		$AF = 2,285+0,318(D^2H)$	6	0,12	0,001
2018	14		$AF = 3,713+1,403(D^2H)$	13	0,84	<0,001
2018	Global		$AF = 3,185+1,05(D^2H)$	119	0,42	<0,001
2018	9	Lenho	$B = 4,971+1,255(D^2H)$	7	0,94	<0,001
2018	7		$B = 5,161+1,172(D^2H)$	7	0,99	<0,001
2018	5		$B = 5,06+1,04(D^2H)$	4	1	<0,001
2018	4		$B = 4,941+1,082(D^2H)$	7	0,99	<0,001
2018	33		$B = 4,978+1,166(D^2H)$	6	0,97	<0,001
2018	24		$B = 5,097+1,108(D^2H)$	6	1	<0,001
2018	14		$B = 5,13+1,021(D^2H)$	13	0,99	<0,001
2018	Global		$B = 5,061+1,1(D^2H)$	126	0,96	<0,001

B = biomassa do compartimento (kg árv⁻¹); D = diâmetro à altura do peito da árvore (cm); H = altura total (m).

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DE CICLOS CLIMÁTICOS NA PRODUTIVIDADE DE UM CLONE DE *Eucalyptus urophylla* PARA O ESTADO DE RONDÔNIA

RESUMO

O Brasil é um país continental que possui áreas consolidadas na produção florestal, entretanto ainda há áreas que o desenvolvimento se encontra em fase inicial, como é o caso do estado de Rondônia. Preparar estrategicamente uma região para a demanda por produtos florestais é fundamental para auxiliar na tomada de decisões e a estimativa da produtividade a partir de modelos baseados em processos é uma ferramenta para este fim. O modelo 3-PG, associado a Sistemas de Informações Geográficas, foi utilizado para determinar a produtividade de um clone de *Eucalyptus urophylla* no estado de Rondônia em 31 ciclos climáticos reais que compreendem o período de 1980 a 2016 em intervalos (rotações) de sete anos. A parametrização do modelo foi feita a partir de dados obtidos pela rede experimental do Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico (TECHS - <https://www.ipef.br/techs/>). Para a base climática, foram utilizados os mapas de temperatura máxima e mínima, de precipitação, de radiação global e de umidade relativa do ar com $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de resolução. As informações relacionadas aos solos, tais como a capacidade de água disponível para as plantas, a fertilidade do sítio e a granulometria foram obtidas do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado e do mapa de solos RadamBrasil, escala 1:1.000.000. O modelo foi sensível às diferenças ambientais e, desta forma, foi capaz de identificar áreas propensas à maior e menor produtividade para a cultura. As regiões sudeste e centro-nordeste foram as regiões que apresentaram os maiores valores médios de produtividade, enquanto a região sul foi a que apresentou os menores valores. O valor médio da produtividade atingível aos 7 anos de idade foi de $487 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. A produtividade foi fortemente influenciada pela temperatura média máxima anual, $R^2 = 0,75$. Este trabalho poderá servir como ferramenta para investidores na região, que poderão avaliar o risco de produzir florestas em qualquer local do estado em diferentes cenários e com níveis de probabilidade de produtividade variáveis. O empreendedor florestal poderá utilizar este trabalho como referência para o planejamento de seu negócio, incluindo

investimentos em aquisição de áreas, extensão do plantio e tecnologias no processo de produção.

Palavras-chave: Planejamento. Variabilidade climática. *Eucalyptus urophylla*. Modelo 3-PG.

ABSTRACT

Brazil is a continental country that has consolidated areas in forest production, while some others are in the initial phase, as is the case of the state of Rondônia. Strategically preparing a region for the demand for forest products is fundamental to assist in decision making and the estimation of productivity from process-based models is a tool for this purpose. The 3-PG model, associated with Geographic Information Systems, was used to determine the productivity of a *Eucalyptus urophylla* clone (clone A1, TECHS list) in the state of Rondônia in 31 real climate scenarios that include the period from 1980 to 2016 in seven-year intervals (rotations). The parameterization of the model was carried out from data obtained by the experimental network of the Tolerance of *Eucalyptus* Clones to Hydric, Thermal, and Biotic Stress (TECHS - <https://www.ipef.br/techs/>). For the climatic base, we used the maps of maximum and minimum temperature, precipitation, global radiation and relative air humidity with 0.25° x 0.25° resolution. The information related to the soils, such as the water holding capacity for the plants, the fertility of the site and the granulometry were obtained from the Ecological Economic Zoning of the State and from the Radambrasil soil map, scale 1:1.000.000. The model was able to capture the environmental differences and thus identify areas prone to higher and lower productivity for the crop. The southeastern and mid-northeastern regions presented the highest average productivity values, while the southern region presented the lowest values. The average value of productivity attainable at 7 years of age was 487 m³ ha⁻¹. Productivity was strongly influenced by the maximum mean annual temperature, $R^2 = 0.75$. This work can serve as a tool for investors in the region, who can evaluate the risk of producing forests anywhere in the state in different scenarios and with varying levels of productivity probability. As an example, the forest entrepreneur may use this work as a reference for the planning of his business, including investments in acquisition of areas, extension of planting and technologies in the production process.

Keywords: 3-PG model. Planning. Estimation. *Eucalyptus urophylla*.

2.1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos mais abundantes e vitais recursos existentes no mundo,

representando uma fonte renovável de energia, fibra e material para construções civis (ZHANG et al., 2014). Plantações comerciais de *Eucalyptus* têm se expandido em todo o mundo e o mesmo acontece no Brasil. Nos últimos setes anos o crescimento médio da área de eucalipto foi de 1,1 % ao ano e o Mato Grosso do Sul vem liderando esta expansão, com uma taxa média de 7,4% ao ano (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2019). A alta produtividade de madeira é sensível à disponibilidade de recursos naturais como luz, água e nutrientes (LITTON; RAICH; RYAN, 2007) e, portanto, características que afetam a captura e o uso destes recursos pelas árvores influenciam diretamente no crescimento das plantas (ACKERLY et al., 2000). Neste sentido, inúmeras pesquisas têm sido dedicadas à modelagem do crescimento do eucalipto em diferentes solos e climas em resposta às estratégias de gestão (MARSDEN et al., 2013).

A modelagem ecofisiológica é capaz de identificar os fatores ambientais que limitam o crescimento e o uso do recurso, possibilitando a gestão das informações acerca da biologia da espécie e a proposição de práticas de manejo que aumentem e estimulem a produtividade florestal. Os modelos baseados em processos possibilitam avaliar a produtividade e as restrições ecológicas das plantações florestais em diferentes escalas espaciais e temporais (STAPE, 2002). Para quantificar com precisão a produtividade destas espécies em áreas extensas, assim como seus riscos, incluindo as consequências de longo prazo das mudanças climáticas, são necessários modelos adequados que sejam mecanisticamente robustos (ALMEIDA et al., 2010).

A ferramenta mais adequada para avaliar os impactos de novas condições climáticas nos ecossistemas florestais são os modelos florestais baseados em processos (AUGUSTYNICZIK et al., 2017). O modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) tem sido utilizado em diversos locais do mundo para estimar a produtividade florestal em áreas extensas e em diferentes ciclos temporais. Coops e Waring (2001) estimaram a produtividade de coníferas no sudoeste do Oregon com o uso do modelo 3-PG e sistemas de informações geográficas. Almeida et al. (2010) mapearam o efeito da variação espacial e temporal no estoque de plantações de eucalipto nos estados do Espírito Santo e da Bahia. Na China, Forrester e Tang (2015) realizaram um estudo semelhante para plantios mistos. Baesso et al. (2010) e Augustynczyk et al. (2017) avaliaram o impacto das mudanças climáticas em produções de *Eucalyptus* e de *Fagus sylvatica*. Lemos et al. (2018) zonearam e analisaram a sensibilidade da produtividade de *Eucalyptus* no Noroeste do estado de São Paulo com o uso do

modelo 3-PG.

Há uma previsão de que as mudanças climáticas afetem importantes processos florestais, como a assimilação de carbono, o balanço hídrico, a ciclagem de nutrientes e a distribuição de espécies (AUGUSTYNCZIK et al., 2017; DAVIS et al., 2017). Compreender as condições que produzem ambientes adequados para a produção florestal satisfatória e como estas condições podem ser alteradas com as mudanças climáticas é fundamental para uma melhor compreensão de onde seja provável que a produtividade florestal reduza ou aumente.

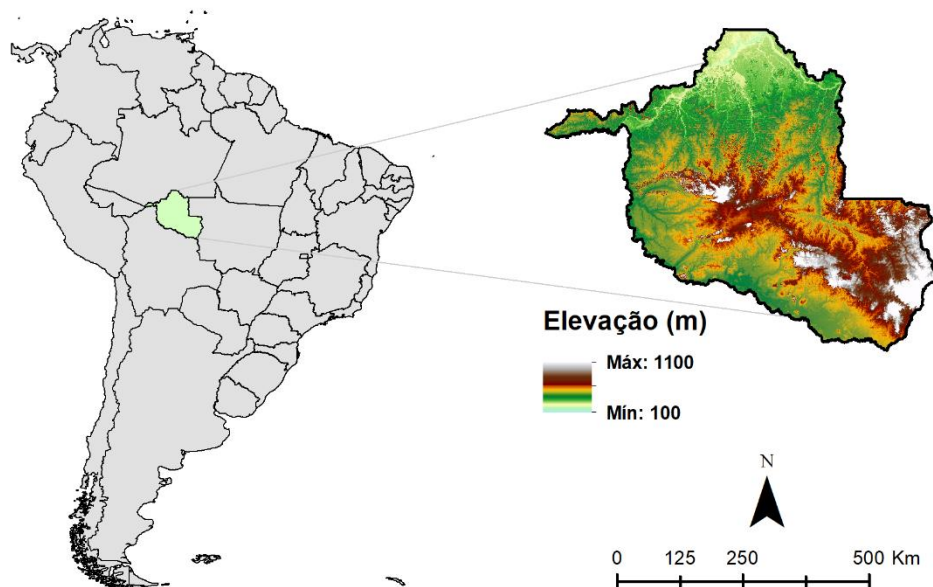
O setor de florestas plantadas no Brasil teve início nas regiões Sul e Sudeste há aproximadamente 100 anos e se expandiu para outras regiões, como Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul), Norte (Tocantins e Pará) (ALVARES et al., 2017) e Nordeste (sul da Bahia e Maranhão). Embora muitas regiões tenham suas áreas consolidadas, ainda há muitas outras que estão iniciando as atividades na área, como no caso do estado de Rondônia. Rondônia é um dos estados pertencentes à região norte do país, com área total de 237.765,293 km² (IBGE, 2018) e teve seu histórico marcado pela forte exploração de florestas naturais. O extrativismo e a industrialização da madeira formaram a base da economia da região por muitos anos. O setor de florestas plantadas está se estabelecendo na região e tem como objetivo suprir as demandas local e regional. Os estudos de ciclos climáticos são fundamentais para compreender a resposta das espécies em diferentes perspectivas e desta forma auxiliar as políticas públicas e as empresas na gestão florestal. O objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade atingível do clone de eucalipto de maior plasticidade fenotípica do Brasil (ARAUJO et al., 2019) para o estado de Rondônia em diferentes ciclos climáticos e, desta forma, analisar como o clima influencia a produtividade da cultura.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Local de estudo

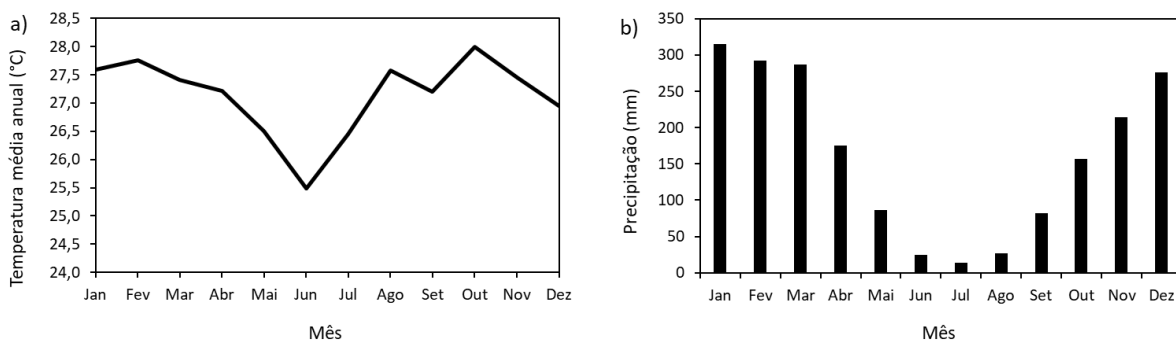
A área de estudo é compreendida pelo estado de Rondônia, situado ao Norte do Brasil, com altitudes que variam entre 100 e 1100 m (Figura 2.1). O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, tropical quente e úmido e com duas estações hídricas bem definidas (ALVARES et al., 2013).

Figura 2.1 - Localização e representação da elevação da área de estudo



A temperatura média anual é de 27, 1 °C e a precipitação anual é de 1951 mm (valores médios de 37 anos - Figura 2.2). A maior parte dos solos de Rondônia são Latossolos, que ocupam aproximadamente 58% da área, 26% são Latossolos Vermelho-Amarelos, 16% Latossolos Vermelhos e 16% Latossolos Amarelos. Os Cambissolos, Gleissolos e outras classes ocupam respectivamente 10%, 9% e 1% (SCHLINDWEIN et al., 2012).

Figura 2.2 - Temperatura média mensal (a) e precipitação mensal (b), valores médios para 37 anos de monitoramento



2.2.2 3-PG Espacializado

O modelo de predição de crescimento florestal utilizado neste trabalho é o 3-PG (*Physiological Principles in Prediction Growth*), descrito na linguagem Visual Basic for Applications do Microsoft Excel (STAPE, 2002) e associado ao sistema de informações geográficas. O modelo foi parametrizado para o clone de maior plasticidade fenotípica do Brasil (*Eucalyptus urophylla* – código do registro nacional de sementes e mudas nº 21874) (ARAUJO et al., 2019).

Com o foco em reduzir falhas causadas pela incerteza dos valores da parametrização do modelo (MÄKELÄ et al., 2000; REYER et al., 2016), utilizou-se a parametrização desenvolvida a partir de dados obtidos pela rede experimental do Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico (TECHS - <https://www.ipef.br/techs/>, (BINKLEY et al., 2017)). O conjunto de dados utilizado representou a diversidade edafoclimática do Brasil em um gradiente de 3.500 km, o que possibilitou uma parametrização com acuracidade satisfatória para diferentes tipologias climáticas (CALDEIRA et al., 2020).

2.2.2.1 Dados de entrada

Para que o modelo pudesse ser executado, exigiu-se a entrada de informações locais, meteorológicas, dados referentes às características dos solos e do clone.

2.2.2.1.1 Informações locais

Para trabalhar com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) integrado ao modelo 3-PG, foi necessário selecionar células quadradas (grids) para que todos os dados utilizados na execução do modelo se concentrassem em um ponto de cada grid (centroide). O mapa do estado foi dividido em 317 células quadradas e cada célula foi associada a um ponto localizado no centro do polígono. Os pontos foram ligados às coordenadas do sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e aos dados de entrada e de saída do modelo.

Os pares de coordenadas foram obtidos de cada centroide e os valores referentes à altitude foram retirados do modelo digital de elevação.

2.2.2.1.2 Informações meteorológicas

As informações meteorológicas mensais requeridas foram: temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) e umidade relativa do ar (%), as quais foram coletadas da base de dados de acesso aberto e confiável desenvolvida por Xavier, King e Scanlon (2016). Estes autores desenvolveram um trabalho de alta resolução com granularidade de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ em passos diários para as cinco variáveis utilizadas para estimar a evapotranspiração do Brasil. As simulações de produtividade foram desenvolvidas entre 1980 e 2016, período de registro dos dados meteorológicos. Foram realizadas 31 simulações com intervalos de sete anos, sendo a primeira realizada entre 1980 e 1986 e a última entre 2010 e 2016.

Os dados que foram obtidos em passos diários foram convertidos para passos mensais.

A partir da temperatura máxima e mínima foi obtida a temperatura média, e com o uso das informações de temperatura máxima, mínima e da umidade relativa do ar, foi calculado o déficit de pressão de vapor (DPV - kPa).

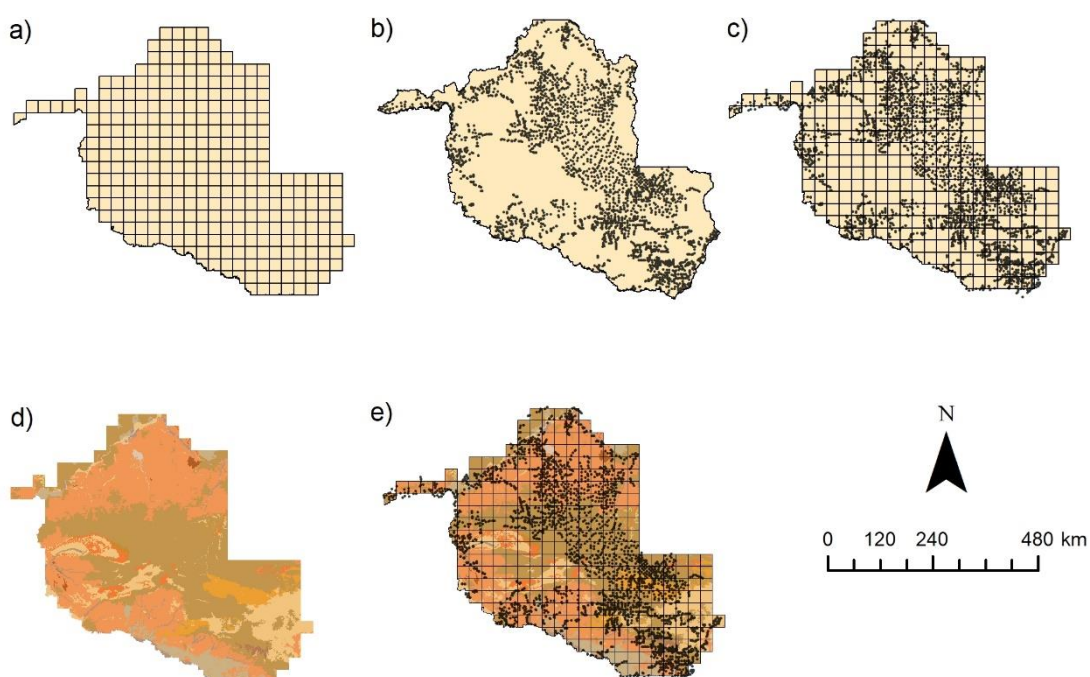
2.2.2.1.3 Dados edáficos

A base de dados edáficos foi obtida do Zoneamento Socioeconômico Ecológico do estado de Rondônia (ZSEE) - Decreto Estadual nº 3.782/1988 e foi cedida pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia (Sedam). Foram analisadas aproximadamente 11.000 amostras de solos que estavam divididas em três ou quatro profundidades (2.915 pontos). Desta base foram obtidos os valores de classes de profundidade, da taxa de fertilidade, da retenção máxima de água e dos parâmetros modificadores da quantidade de água no solo, o déficit de razão de umidade (c_{θ}) e a potência do déficit de razão de umidade (n_{θ}).

A base de dados ZSEE é bastante detalhada, entretanto há locais que não ocorreram análises (58 grids); desta forma, foi necessário buscar o preenchimento destas falhas em outra base confiável. A base selecionada foi a Radambrasil (1974), escala 1:1.000.000, e como os dados observados são qualitativos, foi preciso convertê-los em quantitativos. Foram seguidos alguns passos:

1. Interseção dos arquivos Xavier; King; Scanlon (2016) com a base Radambrasil e com os dados do ZSEE (Figura 2.3).
2. Uma tabela de atributos com dados coincidentes para cada centroide. Foram analisadas a classificação do solo para cada centroide (dado qualitativo) e as características físico-químicas deste local.
3. A coerência dos dados foi conferida pela comparação entre a análise qualitativa e a quantitativa de um mesmo ponto.
4. Em um grid, poderia existir de 1 até 35 análises de solo (ZSEE). Com uma tabela dinâmica contendo os dados do ZSEE, foram gerados valores médios para cada grid.
5. Havia 28 tipos de solos classificados em quatro níveis: ordem, subordem e grande grupo nos 58 grids que não possuíam informações quantitativas. Os tipos de solos foram analisados individualmente e, com o auxílio da classificação brasileira de solos, foram estipulados valores para cada atributo (SANTOS et al., 2018).

Figura 2.3 - Representação das bases utilizadas para determinação dos parâmetros edáficos. Grids (a), pontos de solos analisados pelo ZSEE (b), união de informações do grid e ZSEE (c), dados Radambrasil em escala 1:1.000.000 (d) e a interseção das informações anteriores (e)



A capacidade de água disponível no solo foi estimada a partir da equação elaborada por (STAPE, 2002):

$$CAD = 0,1503 - 0,137 \cdot \text{Areia} - 0,057 \cdot \text{Argila} \cdot ds \cdot p$$

onde CAD = capacidade de água disponível (mm), areia e argila são as frações das partículas (g g^{-1}), ds é a densidade do solo (g cm^{-3}) e p é a profundidade do solo (m).

A água disponível no solo variou entre 20 e 180 mm para uma profundidade de 2 m (Figura 2.4b).

A profundidade efetiva do solo foi determinada pelo tipo de solo, variando entre 50 e 200 cm; valores mínimos foram destinados a Neossolos Litólicos e valores máximos a Latossolos.

O índice de fertilidade do solo (FR), que varia entre 0 e 1 (solo de maior e menor fertilidade, respectivamente), foi estimada de acordo com a equação proposta por Alvares (2011) e variou em função da capacidade de troca catiônica.

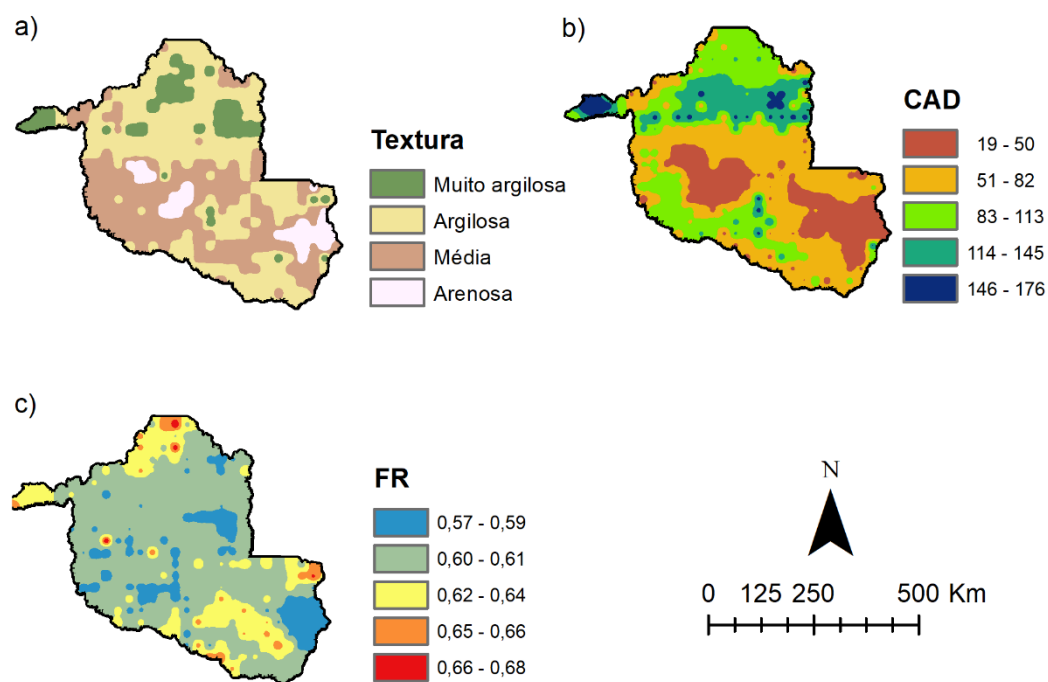
$$FR = 0,5483 + 3,1575[1 - e^{(-0,0036x)}]$$

onde FR é o índice de fertilidade do solo e x é a capacidade de troca catiônica efetiva ($\text{CTCe} - \text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

Os valores de FR variaram entre 0,57 e 0,68 (Figura 2.4c). Geralmente a fertilidade do solo é menor em solos arenosos, enquanto em solos argilosos são mais altos (ALMEIDA et al., 2010).

O déficit de razão de umidade (c_θ) e a potência do déficit de razão de umidade (n_θ), parâmetros modificadores da quantidade de água no solo, foram determinados conforme Landsberg e Waring (1997) (Figura 2.4a).

Figura 2.4 - Textura dos solos (a), água disponível no solo em mm (b) e índice de fertilidade dos solos (c)



O número de registros exclusivos de solos com classificação em quatro níveis foi 36, entretanto, com a seleção do tipo de solo mais representativo, a partir do cálculo da área de ocupação de cada tipo de solo em cada grid, o número foi reduzido para 29 (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Parâmetros de solos utilizados no modelo 3-PG. Classificação dos solos mais representativos dos grids, profundidade e textura

Classificação em quatro níveis	Profundidade (cm)	Textura
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-plintossólico	100	Média
LATOSSOLO-AMARELO-Distrófico-típico	200	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico e plintossólico	100	Argilosa Muito
GLEISSOLO-HÁPLICO-Tb Distrófico-típico	80	argilosa
LATOSSOLO-AMARELO-Distrófico-típico e plintossólico	150	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-plintossólico e típico	100	Argilosa
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico e úmbrico	200	Média
PLINTOSSOLO-ARGILÚVICO-Alumínico-típico e abrupto	80	Média
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico	100	Média
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico	200	Argilosa Muito
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Alumínico-típico	200	argilosa
PLINTOSSOLO-ARGILÚVICO-Distrófico-típico	80	Média Muito
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Alítico-plintossólico	100	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico e léptico	100	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Eutrófico-típico	100	Média
NEOSSOLO-QUARTZARÊNICO-Hidromórfico-típico	80	Argilosa
NEOSSOLO-LITÓLICO-Distrófico-típico	50	arenosa Muito
NITOSSOLO-VERMELHO-Distoférrico-típico	80	argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-petroplíntico	100	Média
CAMBISSOLO-HÁPLICO-Tb Distrófico-típico	80	Argilosa
CAMBISSOLO-HÁPLICO-Ta Eutrófico-típico	80	Argilosa
NEOSSOLO-FLÚVICO-Tb Distrófico-típico	80	Média
NEOSSOLO-QUARTZARÊNICO-Órtico-típico	80	arenosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Eutrófico-léptico	100	Argilosa
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-petroplíntico	200	Média
CAMBISSOLO-HÁPLICO-Alumínico-léptico	80	Média Muito
LATOSSOLO-VERMELHO-Distrófico-típico	200	argilosa
LUVISSOLO-CRÔMICO-Órtico-típico	100	Média
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Ácrico-típico	150	Argilosa

Ordem, Subordem, Grande Grupo e Subgrupo

Simulações do modelo

Foram estimados o volume aos sete anos, a área basal da parcela (AB) e o valor médio do diâmetro à altura do peito (DAP) para cada célula quadrática. As simulações

da produtividade atingível foram feitas com base nos 37 anos de registros climáticos do estado, os quais possibilitaram a definição de 31 ciclos climáticos reais (que compreendem o período de 1980 a 2016), em intervalos (rotações) de sete anos.

Foram avaliadas as relações entre a produtividade e o clima em cada grid. Não foi possível avaliar a eficiência do modelo, pois a região não dispõe de informações de monitoramento contínuo de crescimento, devido à existência de poucas plantações de eucalipto no estado e também ao fato de que as mesmas não foram monitoradas de forma adequada.

2.3 RESULTADOS

A diferença entre a temperatura média mínima de maior e menor registro foi de 1,4 °C, para a temperatura média foi de 1,1 °C e para a temperatura máxima foi de 0,8°C. A diferença entre os registros extremos de precipitação foi de 10%, oscilando entre 1848 e 2029 mm (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Valores médios de temperatura máxima, mínima e média, de radiação global e de precipitação para cada quadro climático

Ciclo	Tmáx	Tmin	Tmed	Rad	DPV	PPT	UR
	°C	°C		MJ m ⁻²	kPa	mm	%
1980-1986	31,5	20,5	26,0	15,5	0,6	1962	81,6
1981-1987	31,6	20,5	26,1	15,5	0,7	1947	81,2
1982-1988	31,6	20,5	26,0	15,3	0,7	1944	81,1
1983-1989	31,5	20,4	25,9	15,4	0,7	1940	80,8
1984-1990	31,5	20,3	25,9	15,7	0,7	2002	81,1
1985-1991	31,5	20,4	26,0	15,7	0,7	2018	81,3
1986-1992	31,6	20,5	26,0	16,0	0,7	2000	81,5
1987-1993	31,6	20,5	26,0	16,2	0,7	1996	81,6
1988-1994	31,5	20,4	26,0	16,2	0,6	2016	82,1
1989-1995	31,5	20,5	26,0	16,3	0,6	2012	82,3
1990-1996	31,5	20,6	26,0	16,3	0,6	1975	82,6
1991-1997	31,4	20,8	26,1	16,1	0,6	1946	83,0
1992-1998	31,4	20,8	26,1	16,1	0,6	1904	83,7
1993-1999	31,4	20,8	26,1	15,9	0,6	1886	84,4
1994-2000	31,5	20,8	26,2	15,9	0,5	1848	84,6
1995-2001	31,5	20,9	26,2	16,0	0,5	1856	84,7
1996-2002	31,6	21,0	26,3	16,1	0,5	1855	84,7
1997-2003	31,7	21,1	26,4	16,3	0,6	1863	84,2
1998-2004	31,8	21,1	26,4	16,2	0,6	1866	83,7
1999-2005	31,9	21,1	26,5	16,3	0,6	1888	83,2
2000-2006	32,0	21,2	26,6	16,4	0,6	1916	82,7
2001-2007	32,0	21,2	26,6	16,6	0,7	1944	81,9
2002-2008	32,1	21,2	26,6	16,7	0,7	1935	81,0
2003-2009	32,0	21,2	26,6	16,6	0,7	1970	80,6
2004-2010	32,1	21,3	26,7	16,7	0,8	1948	79,7
2005-2011	32,1	21,3	26,7	16,8	0,8	1928	79,1
2006-2012	32,1	21,3	26,7	16,9	0,8	1935	78,7
2007-2013	32,0	21,4	26,7	17,0	0,8	1977	78,4
2008-2014	31,9	21,5	26,7	16,8	0,8	2029	78,3
2009-2015	32,1	21,7	26,9	16,8	0,8	2011	77,8
2010-2016	32,2	21,7	27,0	16,8	0,9	1970	77,1
Máximo	32,2	21,7	27,0	17,0	0,9	2029	84,7
Mínimo	31,4	20,3	25,9	15,3	0,5	1848	77,1
Média	31,7	20,9	26,3	16,2	0,7	1945	81,6

Com base nos valores médios do monitoramento de 37 anos, os meses que apresentaram as temperaturas médias extremas (Tmáx e Tmín), foram agosto e julho, respectivamente. Os meses de janeiro e julho apresentaram os valores máximos e mínimos de precipitação, respectivamente (Tabela 2.3). O maior volume de chuva

aconteceu entre outubro e março e representaram 79% da precipitação total. O terceiro trimestre do ano foi o mais seco, com 0,6% da precipitação total anual.

Tabela 2.3 - Valores médios de 37 anos para a temperatura máxima, mínima e média, para a precipitação e seus respectivos desvios-padrão

Mês	T _{máx}	T _{mín}	T _{méd}	UR	PPT
		°C		%	mm
Jan	31,8±0,7	23,4±0,5	27,6±0,6	85,9±2,3	314,7±48,5
Fev	32,3±0,5	23,3±0,5	27,8±0,5	86,0±2,4	292,7±34
Mar	31,5±0,5	23,4±0,5	27,4±0,5	86,2±2,2	286,8±68,4
Abr	32,2±0,5	22,2±0,7	27,2±0,5	85,2±2,9	175,8±58
Mai	31,6±0,5	21,4±0,9	26,5±0,6	83,6±3,7	86,3±24,1
Jun	31,3±0,5	19,6±1,0	25,5±0,7	80,7±5,1	24,5±17,5
Jul	34,5±0,5	18,4±1,0	26,4±0,7	75,4±7,3	13,2±3,3
Ago	34,9±0,5	20,2±0,6	27,6±0,5	71,9±9,3	27,0±13,0
Set	33,3±0,6	21,1±0,6	27,2±0,5	74,3±6,9	82,6±43,2
Out	33,5±0,5	22,5±0,5	28,0±0,5	78,7±4,5	157,1±34,5
Nov	32,1±0,5	22,8±0,7	27,4±0,6	81,9±4,0	214,6±39,8
Dez	31,0±0,6	22,9±0,6	27±0,6	84,5±3,0	275,8±59,9

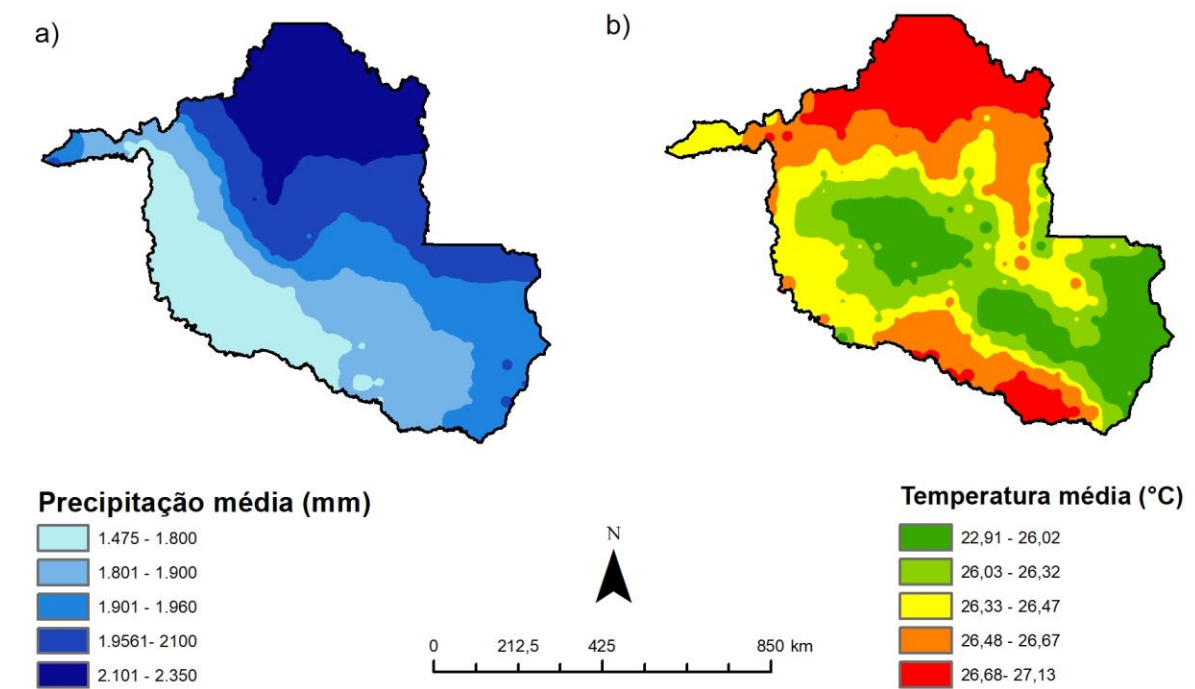
Os valores destacados representam os valores máximo e mínimo de cada variável.

As temperaturas máxima, mínima e média variaram entre 29,5 e 36,4 °C; 17,5 e 24,4 °C; e 24,1 e 30,2 °C, respectivamente. A temperatura média ótima para o crescimento⁶ do clone é de 23,95 °C, a temperatura máxima para o crescimento do clone estudado é de 28,65 °C (Barroso, 2020, no prelo) e a temperatura mínima é de 7,25 °C. Em 37 anos de monitoramento, apenas 0,01% dos dias apresentaram temperatura máxima acima de 28,65 °C e não houve dias com temperatura igual ou inferior à temperatura mínima. O DPV oscilou entre 0,26 kPa em fevereiro e 1,63 kPa em agosto (influenciado pela umidade relativa do ar maior que 90% e menor que 50%). O número de dias com valores críticos para o DPV maior que 1 kPa foi de 12%.

A região norte do estado apresenta os maiores valores médios de precipitação (Figura 2.5). Quanto à temperatura, os maiores valores são encontrados ao norte e ao sudoeste (Figura 2.5).

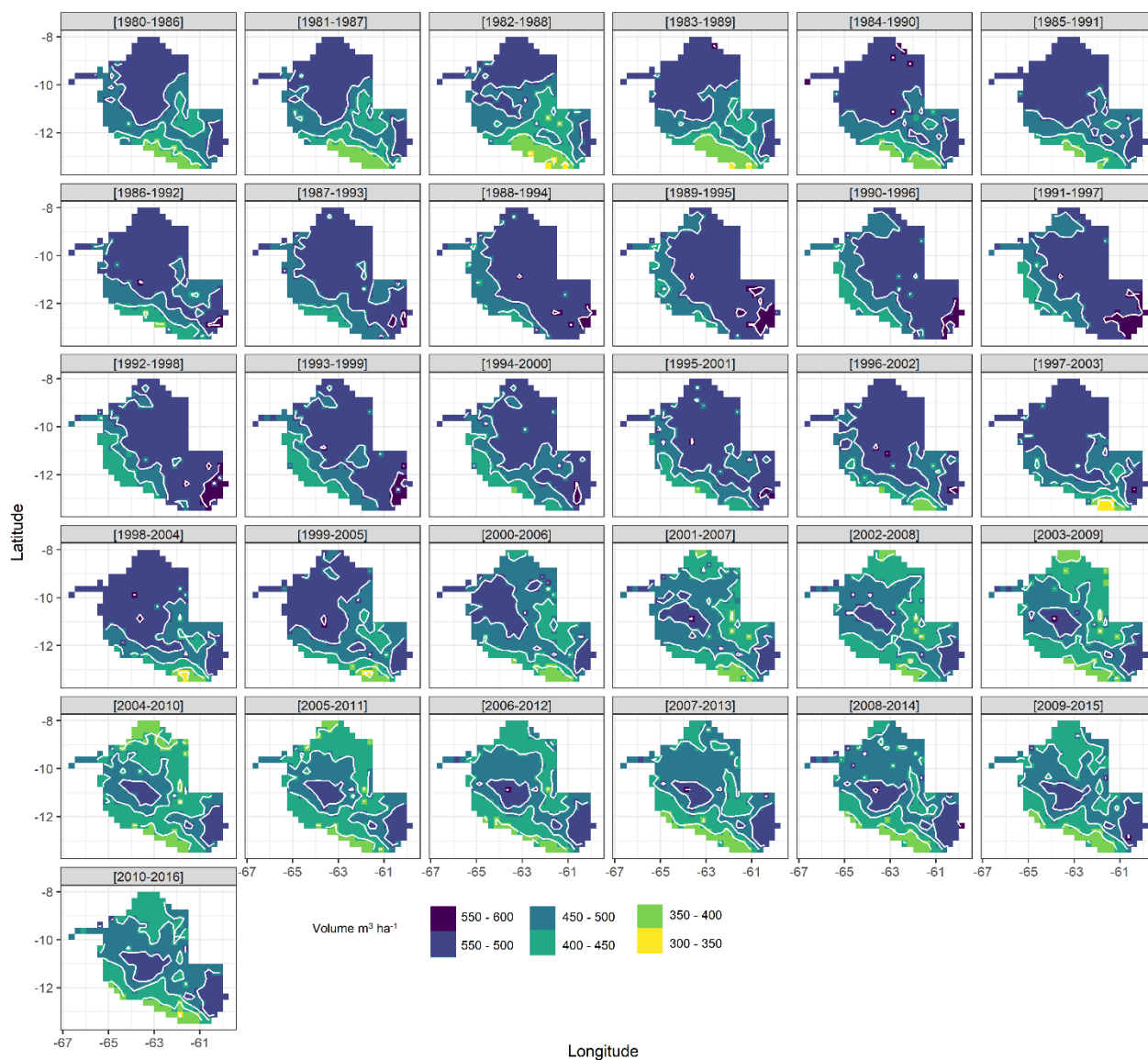
⁶ Obtido em comunicação pessoal com Queiroz, T.B.

Figura 2.5 - Representação espacial da precipitação anual (a) e da temperatura média anual (b)



A espacialização do volume aos 7 anos para os diferentes ciclos é representada na Figura 2.6. Os ciclos que apresentaram maiores valores médios de produtividade foram os que representam os intervalos de 1988 a 1994 e de 1989 a 1995, e os que apresentaram menores valores foram os que estão nos intervalos de 2004 a 2010 e de 2005 a 2011.

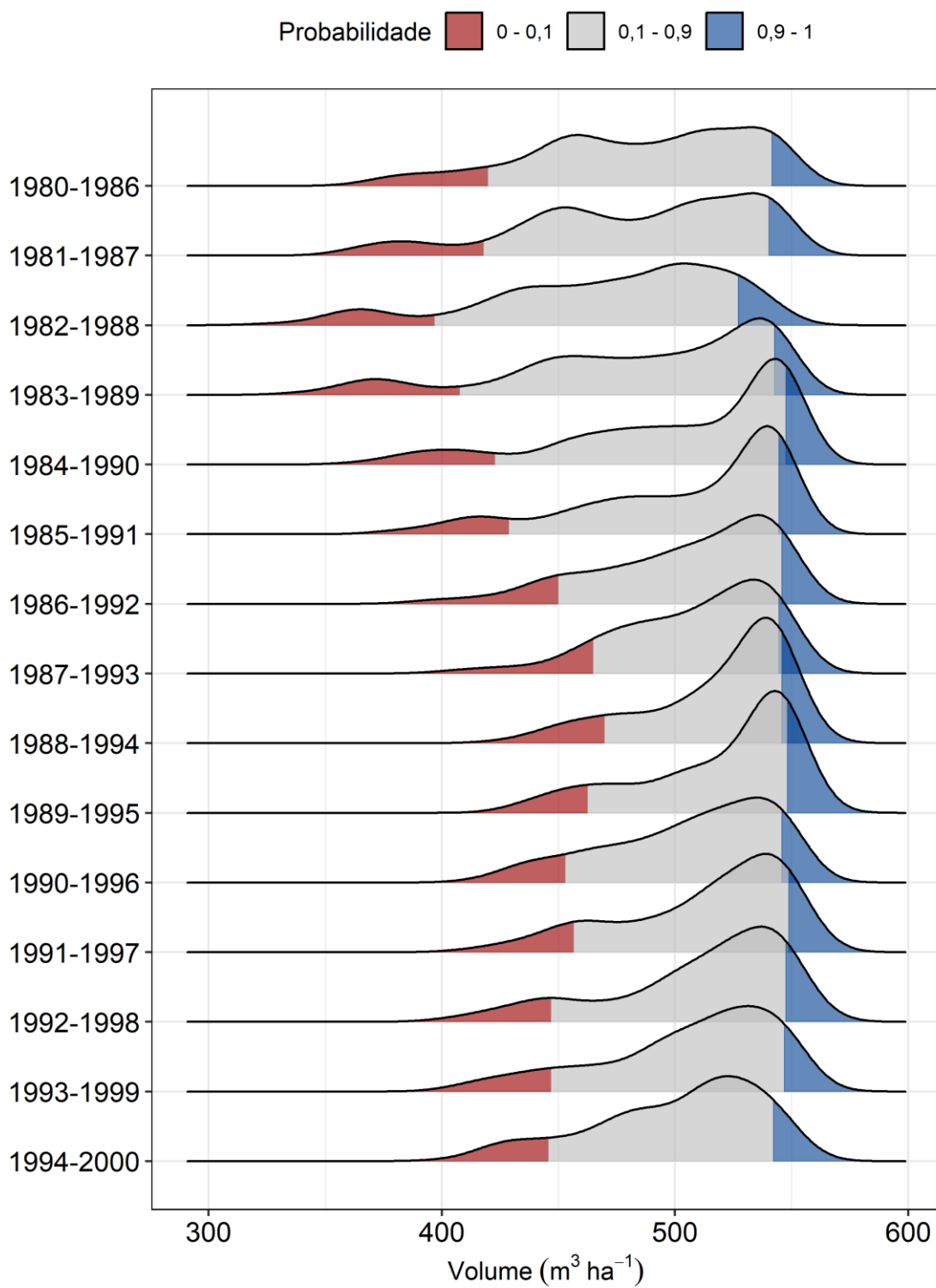
Figura 2.6 - Simulações de mapas de produtividade (volume aos 7 anos) para o estado de Rondônia



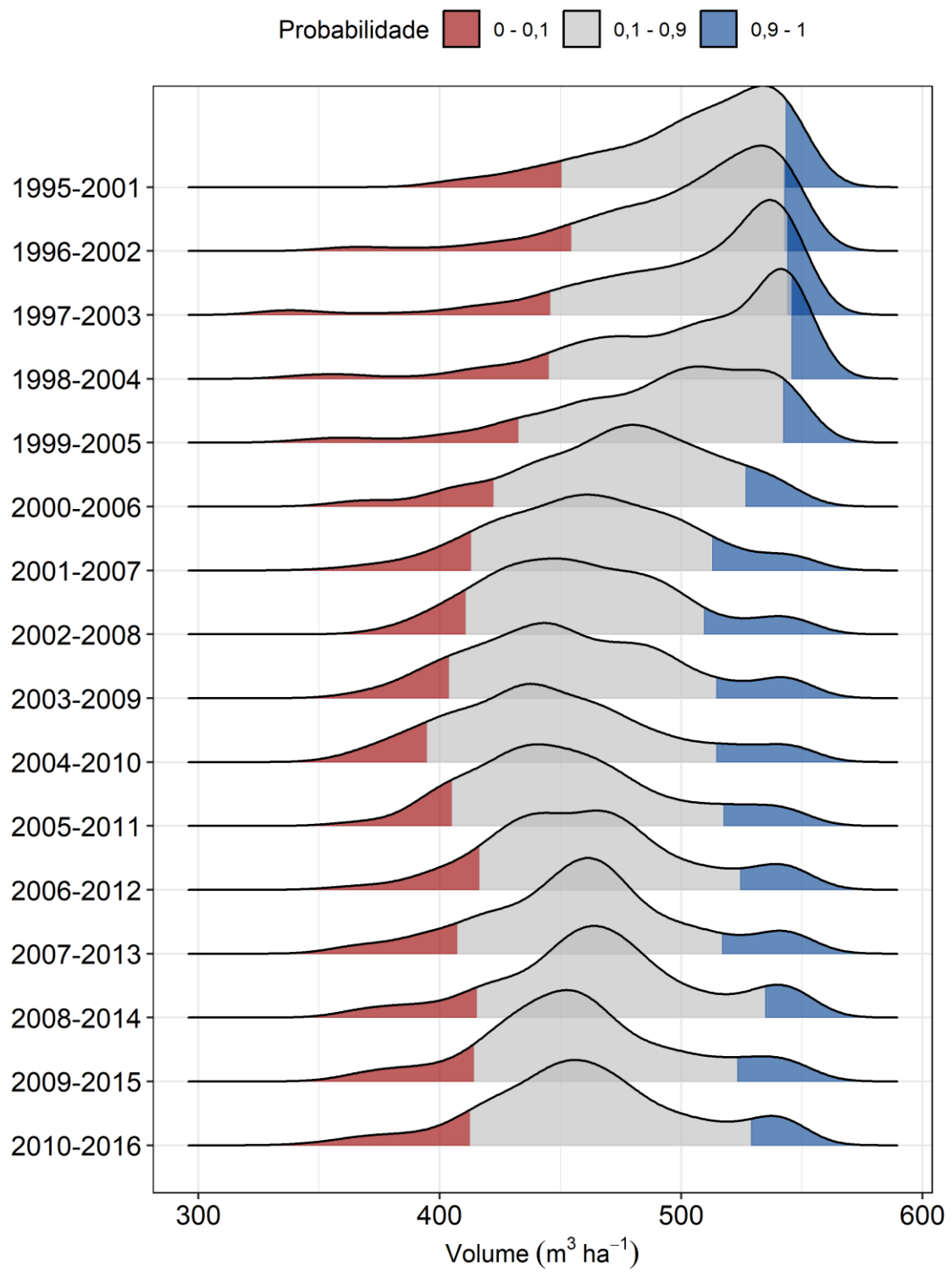
A Figura 2.7 representa o volume aos 7 anos nos diferentes ciclos climáticos. Em cada intervalo de ciclo de 7 anos há informações de todos os grids, simbolizando as alterações nas distribuições de produtividade ao longo do espaço para a probabilidade de 10% e 90%. Considerando os valores médios de todo estado, entre as simulações de 1980 a 2005, há uma tendência de produtividade mediana superior a $500 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$. Após este período, há uma maior tendência de que a produtividade fique próxima a $450 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$.

A probabilidade de ocorrência de volume inferior a média nacional, $252 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, é nula. Em 94% das simulações há a ocorrência de produtividade entre 252 e $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e em 39% das simulações há ocorrência de volume superior a $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Figura 2.7 - Distribuição da produtividade (volume de lenho para as 317 células quadradas para o estado de Rondônia) para a probabilidade de 10% e 90% aos 7 anos para os diferentes ciclos climáticos



Continua...



Os limites de produtividade aos sete anos foram de 325 e 565 m³ ha⁻¹ (Tabela 2.4). O valor mínimo aconteceu na simulação de 1982 a 1988 no município⁷ de Pimenteiras, enquanto o valor máximo aconteceu na simulação de 1992 a 1998 no município de Vilhena . O valor mediano da produtividade foi 493 m³ ha⁻¹.

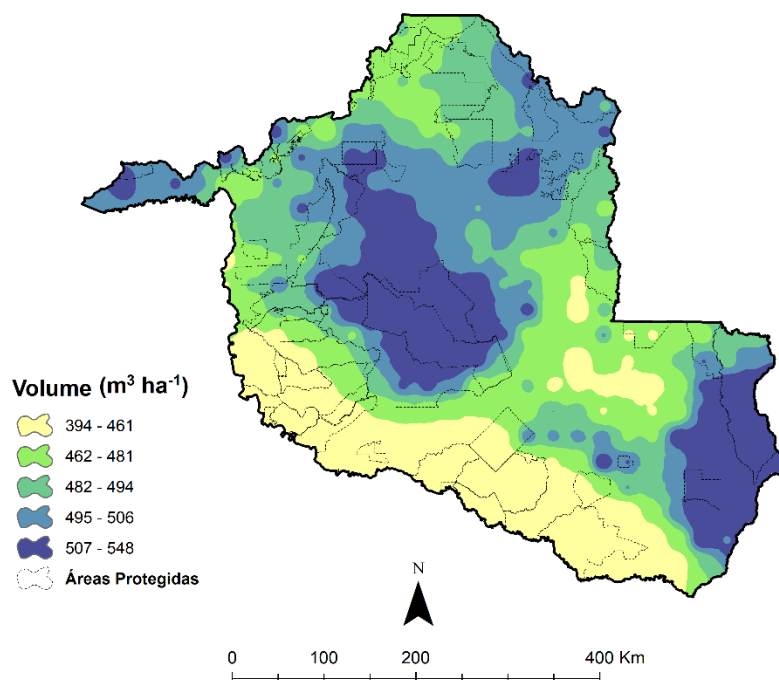
Tabela 2.4 - Valores máximo, mínimo e mediana de produtividade (volume, área basal e DAP) aos sete anos por ciclo

Ciclo	Volume (m ³ ha ⁻¹)			Área basal (m ² ha ⁻¹)			DAP (cm)		
	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med
1980-1986	549	369	489	39,6	30,8	37,2	21,4	18,8	20,6
1981-1987	549	359	494	40,2	30,3	37,4	21,5	18,6	20,7
1982-1988	544	325	480	39,6	28,4	36,7	21,3	18,0	20,5
1983-1989	550	338	496	40,2	29,1	37,6	21,6	18,3	20,7
1984-1990	552	362	520	39,6	30,5	38,7	21,6	18,7	21,1
1985-1991	549	377	519	40,6	31,3	38,7	21,6	18,9	21,1
1986-1992	553	391	513	39,6	32,0	38,4	21,5	19,2	21,0
1987-1993	555	401	516	40,1	32,6	38,5	21,6	19,3	21,0
1988-1994	562	422	531	41,7	33,7	39,2	21,9	19,7	21,2
1989-1995	561	431	533	39,6	34,2	39,1	21,9	19,8	21,2
1990-1996	554	416	514	39,9	33,4	38,4	21,7	19,6	21,0
1991-1997	564	411	522	42,2	33,1	38,8	22,0	19,5	21,1
1992-1998	565	400	522	39,6	32,6	38,8	22,1	19,3	21,1
1993-1999	559	405	516	39,7	32,8	38,5	21,8	19,4	21,0
1994-2000	558	400	510	39,6	32,5	38,2	21,7	19,3	20,9
1995-2001	556	396	514	41,0	32,3	38,4	21,7	19,2	21,0
1996-2002	553	356	516	40,4	30,1	38,5	21,7	18,6	21,0
1997-2003	550	329	518	40,9	28,6	38,6	21,6	18,1	21,0
1998-2004	556	341	515	39,6	29,3	38,5	21,8	18,3	21,0
1999-2005	553	340	501	39,6	29,2	37,8	21,6	18,3	20,8
2000-2006	548	356	479	40,0	30,1	36,7	21,5	18,6	20,5
2001-2007	551	353	463	39,6	30,0	35,8	21,6	18,5	20,3
2002-2008	549	372	455	39,5	31,0	35,4	21,4	18,9	20,2
2003-2009	551	361	450	40,2	30,4	35,2	21,6	18,7	20,1
2004-2010	549	358	442	39,3	30,3	34,8	21,5	18,6	20,0
2005-2011	549	360	449	39,7	30,4	35,2	21,5	18,7	20,1
2006-2012	550	360	460	39,6	30,4	35,7	21,5	18,7	20,2
2007-2013	552	358	460	39,6	30,2	35,7	21,5	18,6	20,2
2008-2014	554	361	465	39,6	30,4	36,0	21,6	18,7	20,3
2009-2015	552	360	456	40,1	30,4	35,5	21,5	18,7	20,2
2010-2016	547	345	458	39,6	29,5	35,6	21,5	19,8	20,2
Máx	565	431	533	42,2	34,2	39,2	22,1	18,0	21,2
Mín	544	325	442	39,3	28,4	34,8	21,3	18,8	20,0
Méd	553	371	493	40,0	31,0	37,3	21,6	19,8	20,7

⁷ As informações de cada grid para as variáveis analisadas estão disponíveis nos arquivos suplementares.

As regiões sudeste e centro-nordeste foram as regiões que apresentaram os maiores valores médios de produtividade, enquanto a região sul foi a que apresentou os menores valores (Figura 2.8).

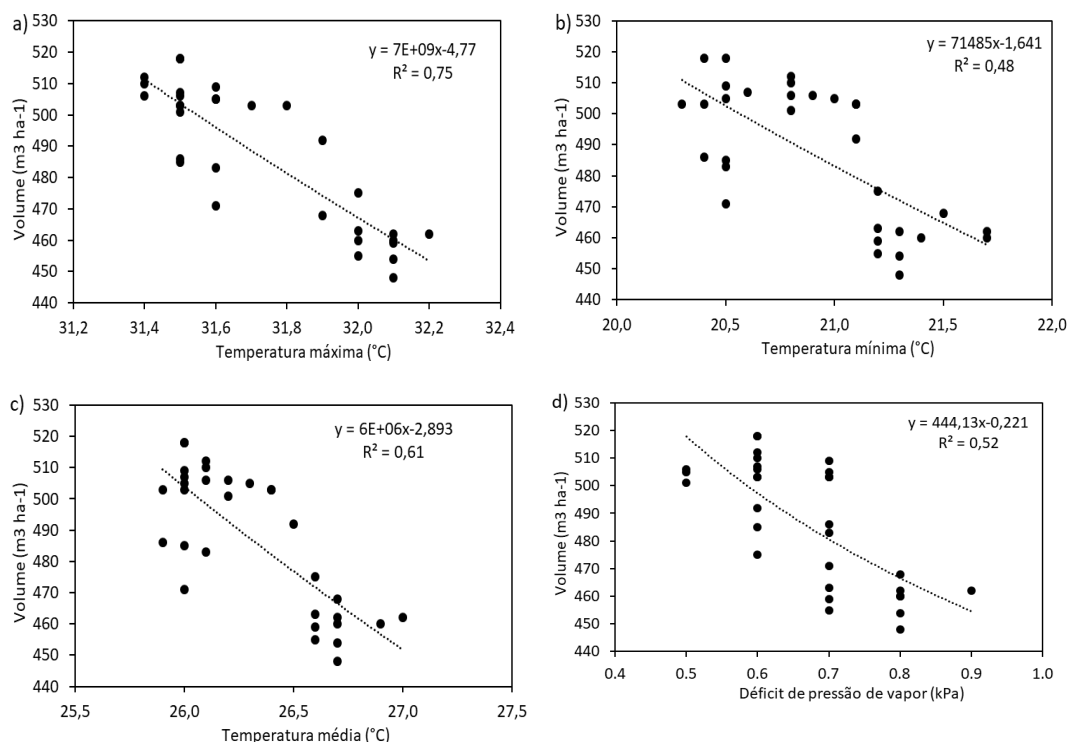
Figura 2.8 - Representação espacial do volume médio aos 7 anos (considerando os valores médios dos 31 ciclos climáticos). As linhas tracejadas representam as áreas protegidas do estado (unidades de conservação e áreas indígenas)



Há uma forte relação entre a temperatura média e a produtividade, sendo que menores valores para a produtividade são encontrados em locais com a temperatura média mais elevada.

A variável que apresentou a maior correlação com a produtividade foi a temperatura máxima ($R^2 = 0,75$), seguida pela temperatura média ($R^2 = 0,61$) e pelo DPV ($R^2 = 0,52$) (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Correlação entre a produtividade nos diferentes ciclos climáticos e as variáveis climáticas. Temperatura máxima (a), temperatura mínima (b), temperatura média (c), e déficit de pressão de vapor (f). Cada ponto representa um ciclo climático



2.4 DISCUSSÃO

Este trabalho mostrou a aplicabilidade do modelo 3-PG para fornecer uma perspectiva de produtividade para extensas áreas ainda não exploradas para plantações de eucalipto. O modelo foi sensível às diferenças ambientais e foi capaz de fornecer informações iniciais sobre a probabilidade de valores de produtividade para diferentes quadros espaciais e temporais na região. Diferentes trabalhos foram desenvolvidos para avaliar a influência das mudanças climáticas em cenários futuros (AUGUSTYNICZIK et al., 2017; BAESSO; RIBEIRO; SILVA, 2010; REYER, 2015), em nosso caso, avaliamos estas influências em ciclos climáticos reais, baseados em registros passados.

Do primeiro ao último ciclo (1980 a 2016), com exceção da precipitação, houve a elevação de valores para todas as variáveis meteorológicas, com $0,7^{\circ}\text{C}$ para a temperatura máxima, $1,2^{\circ}\text{C}$ para a temperatura mínima, 1°C para a temperatura média, $1,3 \text{ MJ m}^{-2}$ para a radiação global e $0,3 \text{ kPa}$ para o déficit de pressão de vapor.

Torres et al. (2012) destacaram estas mudanças e ainda reforçaram que a região é considerada um *hotspot* climático, termo designado para indicar áreas com grandes mudanças climáticas regionais.

Ainda que estudos indiquem que o desmatamento provoque uma tendência de redução da precipitação na região (SALATI; NOBRE, 1991; SEIXAS; PINHEIRO, 2014) não notou-se isso no presente trabalho. Houve períodos de redução de até 9% da precipitação, entretanto, diferente da temperatura que apresentou elevação de valores de forma constante, com o passar dos anos voltou a haver acréscimo de valores para esta variável. Franca (2015) analisou a climatologia das chuvas em Rondônia entre os anos de 1981 a 2011 e não encontrou tendência linear significativa de aumento ou redução das chuvas ao longo do período observado.

Um dos aspectos mais importantes da modelagem espacial baseada em processos é a capacidade de quantificar os fatores que contribuem para a produção florestal (ALMEIDA et al., 2010). As variáveis meteorológicas que melhor explicaram a produtividade foram a temperatura máxima, a temperatura média e o déficit de pressão de vapor, sendo que a influência da temperatura máxima e mínima e da umidade relativa do ar pode ser combinada em uma única variável, o déficit de pressão de vapor.

Os ciclos que apresentaram os maiores valores médios de produtividade possuíam em comum menores valores de temperatura média, máxima e mínima, assim como reduzido déficit de pressão de vapor e elevada precipitação.

Binkley et al. (2017) analisaram a influência do clima, do espaçamento e da genética em plantios clonais de eucalipto no Brasil e no Uruguai e observaram que a produção de lenho reduz $2,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada aumento de 1°C na temperatura, além de destacarem que esta redução pode ser resultado da perda de carbono na respiração.

A fotossíntese é reconhecida como um dos processos mais sensíveis à temperatura nas plantas (YAMORI; HIKOSAKA; WAY, 2014). O aumento da temperatura afeta diretamente a produtividade das florestas através de seus efeitos nas temperaturas de crescimento e na quantidade de água no solo (REYER, 2015). Isso é previsto no modelo 3-PG com alterações na condutância estomática, na evapotranspiração e no modificador fisiológico do modelo. Em estudo semelhante, Baesso, Ribeiro e Silva, (2010) concluíram que a elevação da temperatura e a redução da precipitação causarão redução da produtividade de plantações de eucalipto.

A média de produtividade nacional é de $36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (BINKLEY et al., 2017), entretanto os valores médios de nosso trabalho estão entre 64 e $74 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valores próximos aos encontrados para a produtividade potencial de plantações de eucalipto (STAPE et al., 2010). Os fatores que podem ter influenciado a elevada produtividade da região são: o reduzido número de dias com a ocorrência de temperatura maior que a máxima e menor que a mínima para o crescimento, a reduzida ocorrência de déficit de pressão de vapor maior que o valor crítico e a elevada precipitação, que variou entre 1848 a 2029 mm ano^{-1} .

A produtividade de uma cultura pode ser dada em termos potenciais, atingíveis ou reais. Na produtividade potencial entende-se que não há limitação hídrica, nutricional ou fitossanitária, ou seja, varia em função das variáveis ambientais e de suas interações com as características das culturas (fatores determinantes). A produtividade atingível é influenciada pelos fatores determinantes e pelo déficit hídrico (fator limitante). A produtividade real, por sua vez é influenciada pelos fatores determinantes, limitantes e fatores decorrentes do manejo (FREITAS, 2018).

As estimativas de produtividade foram desenvolvidas para valores atingíveis e não reais, portanto há de se destacar que ataques de doenças e pragas não são previstos pelo modelo e estes fatores podem afetar a produção. As doenças que ocorrem em campo podem impactar negativamente a sobrevivência e o crescimento das árvores, o que resulta redução da produção da madeira, tanto no volume como na qualidade energética (AUER; SANTOS, 2011). A ferrugem do eucalipto (*Puccinia psidii*), por exemplo, provoca a redução do crescimento das plantas (ZAUZA et al., 2008) e apresenta correlação positiva com a umidade relativa do ar, quanto maior a umidade relativa do ar, maior a infestação com a doença e o estado de Rondônia está em uma região favorável à ocorrência da ferrugem do eucalipto na maior parte do ano (ALVARES et al., 2017). O número de estações meteorológicas utilizadas pelos pesquisadores que elaboraram os mapas de informações meteorológicas se restringe a 8 e o número de grids é 317. Estes números reduzem a acuracidade do modelo, todavia fornecem estimativas que podem nortear estratégias de plantações florestais para a região.

2.5 CONCLUSÃO

O modelo 3-PG pôde fornecer informações iniciais sobre a probabilidade de valores de produtividade atingível aos sete anos para diferentes cenários espaciais e temporais.

A produtividade foi fortemente influenciada pela temperatura média máxima, representando a vulnerabilidade da cultura. Como há uma tendência de elevação da temperatura ao longo dos anos, existe a necessidade em estabelecer planos para que a produtividade não seja afetada por estas mudanças, como a busca por clones mais resistentes à seca e/ou o estabelecimento de novas áreas de plantio.

O modelo foi sensível às limitações locais, sejam elas edáficas ou climáticas, podendo servir como ferramenta para propor práticas silviculturais para gerenciar estresses causados por restrições, tais como fertilização, número de plantas por hectare e desbastes.

Este trabalho poderá servir como ferramenta para investidores na região, que poderão avaliar o risco de produzir florestas em qualquer local do estado em diferentes ciclos climáticos e com níveis de probabilidade de produtividade variáveis. Como exemplo, o empreendedor florestal poderá utilizar este trabalho como referência para o planejamento de seu negócio, incluindo investimentos em aquisição de áreas, extensão do plantio e tecnologias no processo de produção.

Ainda que não exista informações detalhadas sobre o crescimento de plantações de eucalipto na região estudada para validar os dados estimados, o modelo foi testado em diferentes locais do mundo, o que demonstra sua eficiência e justifica ainda mais seu uso para áreas sem histórico de plantações florestais.

REFERÊNCIAS

- ACKERLY, D. D. et al. The Evolution of Plant Ecophysiological Traits: Recent Advances and Future Directions. **BioScience**, [s. l.], v. 50, n. 11, p. 979, 2000.
- ALMEIDA, A. C. et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 259, n. 9, p. 1730–1740, 2010.
- ALVARES, C. A. Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do estado de São Paulo. [s. l.], 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-23052011-161837/>>
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVARES, C. A. et al. Climatic favourability zones for Eucalyptus rust in Brazil. **Forest Pathology**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 1–17, 2017.
- ARAUJO, M. J. et al. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 454, n. June, p. 117631, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117631>>
- AUER, C. G.; SANTOS, Á. F. Dos. Doenças em eucaliptos destinados à produção de energia na região Sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 31, n. 68, p. 373–379, 2011.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D. et al. Productivity of *Fagus sylvatica* under climate change – A Bayesian analysis of risk and uncertainty using the model 3-PG. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 401, p. 192–206, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.061>>
- BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO NA REGIÃO NORTE DO ESPÍRITO SANTO E SUL DA BAHIA. **Ciencia Florestal**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 335–344, 2010.
- BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 405, n. September, p. 271–283, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>
- CALDEIRA, D. et al. Forest Ecology and Management Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity Eucalyptus clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 462, n. November 2019, p. 117989, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>>
- COOPS, N. C.; WARING, R. H. Estimating forest productivity in the eastern Siskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. **Canadian Journal of Forest Research**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 143–154, 2001. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/x00-146>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

DAVIS, R. et al. The normal fire environment—Modeling environmental suitability for large forest wildfires using past, present, and future climate normals. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], 2017.

FORRESTER, D. I.; TANG, X. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 319, p. 233–254, 2015.

FRANCA, R. R. Da. Climatologia das chuvas em Rondônia – período 1981-2011. **Revista Geografias**, [s. l.], v. 1, n. 20, p. 44–58, 2015. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/650>>

FREITAS, C. H. De. **Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e produtividade de eucalipto**. 2018. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-08102018-174547/>>

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2019**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

LEMOES, C. C. Z. et al. Estimação, zoneamento e análise de sensibilidade da produtividade florestal de Eucalyptus no Nordeste do Estado de São Paulo através do modelo 3-PG. **Scientia Forestalis**, [s. l.], v. 46, n. 119, p. 1–13, 2018.

LITTON, C. M.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2007.

MÄKELÄ, A. et al. Process-based models for forest ecosystem management: Current state of the art and challenges for practical implementation. **Tree Physiology**, [s. l.], v. 20, n. 5–6, p. 289–298, 2000.

MARSDEN, C. et al. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 301, p. 112–128, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.039>>

REYER, C. Forest productivity under environmental change—A review of stand-scale modeling studies. **Current Forestry Reports**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 53–68, 2015.

REYER, C. P. O. et al. Integrating parameter uncertainty of a process-based model in assessments of climate change effects on forest productivity. **Climatic Change**, [s. l.], v. 137, n. 3–4, p. 395–409, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1694-1>>

SALATI, E.; NOBRE, C. A. Possible climatic impacts of tropical deforestation. **Climatic Change**, [s. l.], v. 19, n. 1–2, p. 177–196, 1991.

SANTOS, H. G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. - Portal Embrapa**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/>>-

/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 22 out. 2019.

SCHLINDWEIN, J. A. et al. Soils of Rondônia : Uses and Possibilities. **R. Bras. Cis. da Amazônia**, [s. l.], v. v1, n.1, p. 213–231, 2012.

SEIXAS, I. M.; PINHEIRO, E. D. S. Sensoriamento remoto aplicado à análise chuva-vegetação na Amazônia Central. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 635, 2014.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in Northeastern Brazil**. 2002. Colorado State University, [s. l.], 2002.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>>

TORRES, R. R. et al. Socio-climatic hotspots in Brazil. **Climatic change**, [s. l.], v. 115, p. 597–609, 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

YAMORI, W.; HIKOSAKA, K.; WAY, D. A. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynthesis Research**, [s. l.], v. 119, n. 1–2, p. 101–117, 2014.

ZAUZA, E. Â. V. et al. Eficiência de fungicidas sistêmicos no controle da ferrugem do eucalyptus. **Revista Arvore**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 829–835, 2008.

ZHANG, J. et al. The formation of wood and its control. **Current Opinion in Plant Biology**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 56–63, 2014.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível desenvolver um conjunto de parâmetros para o clone de maior plasticidade fenotípica do Brasil.

A calibração do modelo foi realizada em quatro sítios experimentais que representam parte da diversidade climática brasileira e a validação do modelo foi obtida em 10 outros sites da mesma rede experimental.

O modelo conseguiu capturar as diferenças de solo e clima para prever a produtividade do clone.

O conjunto de parâmetros obtido poderá ser utilizado para simular a produtividade para áreas não exploradas para este fim, além de indicar as áreas que possuem potencial para a cultura e desta forma auxiliar na valoração da terra.

A atribuição do valor da terra poderá ser relacionada aos valores potenciais da produtividade florestal. O empreendedor florestal poderá ainda utilizar este trabalho como referência para o planejamento de seu negócio, incluindo investimentos em aquisição de áreas, extensão do plantio e tecnologias no processo de produção.

REFERÊNCIAS

- ACKERLY, D. D. et al. The Evolution of Plant Ecophysiological Traits: Recent Advances and Future Directions. **BioScience**, v. 50, n. 11, p. 979, 2000.
- ALMEIDA, A. C. et al. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 167–177, 2004.
- ALMEIDA, A. C. et al. Use of a spatial process-based model to quantify forest plantation productivity and water use efficiency under climate change scenarios. **18th World IMACS Congress and International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, MODSIM09**, n. July, p. 1816–1822, 2009.
- ALMEIDA, A. C. et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1730–1740, 2010.
- AMARAL, A. et al. Aplicação do modelo de crescimento florestal 3PG a povoamentos de Eucalipto na região centro de Portugal. 2001.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D. et al. Productivity of *Fagus sylvatica* under climate change – A Bayesian analysis of risk and uncertainty using the model 3-PG. **Forest Ecology and Management**, v. 401, p. 192–206, 2017.
- BATTAGLIA, M. et al. **CABALA: A linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support**. [s.l: s.n.]. v. 193
- BORGES, J. S. **PARAMETRIZAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA EUCALIPTO NA REGIÃO DO CERRADO DE MINAS GERAIS**. [s.l: s.n.].
- BORGES, J. S. et al. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the Region of Cerrado in Minas Gerais State. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 567–578, 2012.
- DYE, P. J. Modelling growth and water use in four pinus patula stands with the 3-pg model. **Southern African Forestry Journal**, v. 191, n. 1, p. 53–63, 2001.
- FEIKEMA, P. M. et al. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+ forest growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 5, p. 663–678, 2010.
- FORRESTER, D. I.; TANG, X. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. **Ecological Modelling**, v. 319, p. 233–254, 16 maio 2015.
- GONZALEZ-BENECKE, C. A. et al. Forest Ecology and Management
Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating , biomass partitioning and canopy closure. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 55–75, 2014.
- GONZALEZ-BENECKE, C. A. et al. Forest Ecology and Management Regional

validation and improved parameterization of the 3-PG model for *Pinus taeda* stands. **Forest Ecology and Management**, v. 361, p. 237–256, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2019**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

LEMOS, C. C. Z. et al. Estimacão, zoneamento e análise de sensibilidade da produtividade florestal de *Eucalyptus* no Nordeste do Estado de São Paulo através do modelo 3-PG. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, p. 1–13, 2018.

LEMOS, C. C. Z. DE. **Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

LITTON, C. M.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2007.

PASSIOURA, J. B. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? n. 1985, p. 690–694, 1996.

PENG, C. et al. Modelo Triplex - 2002. v. 153, p. 109–130, 2002.

PONTES, M. S. Parametrização do modelo 3-PG para teca (*Tectona grandis* L.f.) e dos sistemas FERTI-UFV e NUTRI-UFV para subsidiar o seu manejo nutricional. p. 79, 2011.

POTITHEP, S.; YASUOKA, Y. Application of the 3-PG model for gross primary productivity estimation in deciduous broadleaf forests: A study area in Japan. **Forests**, v. 2, n. 2, p. 590–609, 2011.

RODRÍGUEZ-SUÁREZ, J. A. et al. Application of the 3PG forest growth model to a *Eucalyptus globulus* plantation in Northwest Spain. **European Journal of Forest Research**, v. 129, n. 4, p. 573–583, 11 jul. 2010.

SANDS, P.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1–3, p. 273–292, 28 jun. 2002.

SEELY, B.; WELHAM, C.; KIM, S. **Application of a Hybrid Forest Growth Model to Evaluate Climate Change Impa...: EBSCOhost**. Disponível em: <<http://web-b-ebscohost.ez134.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=5083e9a0-e049-4acc-b7f2-e07e041cd8fc%40pdc-v-sessmgr04>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 219–234, 2004.

XIE, Y.; WANG, H.; LEI, X. Forest Ecology and Management Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern China. **Forest Ecology and Management**, v. 406, n. July, p. 208–218, 2017.