

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 13/12/2020.

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 Agrônomicas, 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 Agrônomicas, 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.

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.

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.