

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

MODELAGEM DO CRESCIMENTO PARA PLANTIOS DE
EUCALIPTO NO NORTE DE MINAS GERAIS, BRASIL

CARLOS MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA

2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

**MODELAGEM ECOFISIOLÓGICA DE EUCALIPTO NO NORTE DE
MINAS GERAIS, BRASIL**

CARLOS MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA

Sob a Orientação do Professor
Rafael Coll Delgado

e Co-orientação do Professor
José Francisco de Oliveira Júnior

Dissertação submetida como
requisito parcial para obtenção do
grau de **Mestre em Ciências**, no
Curso de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais,
Área de Concentração Conservação da
Natureza

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2016

634.956098151

O48m

T

Oliveira, Carlos Magno Moreira de, 1989-
Modelagem ecofisiológica de eucalipto no
norte de Minas Gerais, Brasil / Carlos
Magno Moreira de Oliveira. - 2016.
48 f.: il.

Orientador: Rafael Coll Delgado.

Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais e
Florestais, 2016.

Inclui bibliografia.

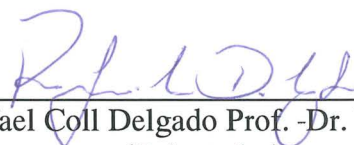
1. Eucalipto - Cultivo - Minas Gerais -
Teses. 2. Eucalipto - Crescimento - Minas
Gerais - Teses. 3. Plantio de florestas -
Minas Gerais - Teses. 4. Mudanças
climáticas - Minas Gerais - Teses. I.
Delgado, Rafael Coll, 1978- II.
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais. III.
Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

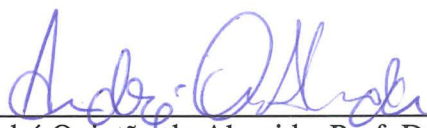
CARLOS MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza.

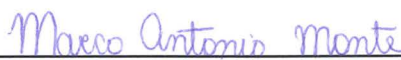
DISSERTAÇÃO APROVA EM 26/02/2016



Rafael Coll Delgado Prof. -Dr. UFRRJ
(Orientador)



André Quintão de Almeida. Prof. Dr. UFS



Marco Antonio Monte. Prof. Dr. UFRRJ



Emanuel José Gomes de Araújo. Prof. Dr. UFRRJ

À minha família,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar o meu caminho e me dar força em momentos delicados.

À minha família, que sempre me apoiou em minhas escolhas. Pelo amor incessante. Em especial ao meu pai, pelos valiosos conselhos e ensinamentos.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade de estudar em uma instituição pública, gratuita e de qualidade.

Ao curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF), pela oportunidade e apoio dado durante o desenvolvimento desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento.

Ao Prof. Rafael Coll Delgado, pelas orientações valiosas durante o desenvolvimento do trabalho e pela constante motivação. Agradeço pela grande oportunidade e pela confiança em mim depositada, mesmo nos momentos em que não estive presente na instituição.

Ao Prof. André Quintão de Almeida, pelo apoio dado nos primeiros passos com o modelo ecofisiológico, que foi de suma importância para concretização desse projeto. Agradeço a constante atenção dada no desenvolvimento do trabalho, mesmo longe da UFRRJ.

Ao Prof. Emanuel Gomes de Araújo, pela ajuda na obtenção dos dados e no seu processamento. Pelo companheirismo, orientação e pela confiança depositada.

Ao Prof. Marco Antonio Monte, pela ajuda na modelagem dos dados, pelo conhecimento compartilhado e pelas várias contribuições.

Ao Prof. José Francisco de Oliveira Júnior pela motivação e acreditar na importância do desenvolvimento desse projeto.

À Engenheira Florestal Thais, pela disponibilização dos dados utilizados nesse trabalho.

Aos companheiros do Quarto 512, pela amizade, companheirismos e bons momentos. Agradeço, em especial, aos amigos Gustavo, Felipe (Salsicha), Mateus (Nerso), Guilherme (Zé), Breno (Nestor), Flávio (Ganso) e Vitor (Pink).

Aos companheiros do Laboratório de Sensoriamento Remoto aplicado a Climatologia (LSRACA): Catherine, Thais, Felipe (Ceará), Camila, Raquel, Beatriz Griffó, Beatriz Rodrigues, Rafael (Popo), Mariana, Luiz e a Iris pelo companheirismos e troca de conhecimentos.

Ao Prof. Hugo Amorim Barbosa e ao Prof. Márcio Rocha Francelino, pela discussões profissionais, conhecimento compartilhado e pelos vários trabalhos desenvolvidos.

BIOGRAFIA

Carlos Magno Moreira de Oliveira nasceu em 14 de outubro de 1989, no município de Januária, norte do estado de Minas Gerais. Filho de Aldo Moreira de Oliveira e de Maria Ires Ferreira de Oliveira. No município de Januária (MG), concluiu o Ensino Fundamental em 2004 e o Ensino Médio em 2007, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Januária (CEFET - Januária). Em 2008, ingressou no curso de graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e, em 2010, transferiu-se para o curso de graduação em Engenharia Florestal da mesma instituição. Durante a graduação, foi bolsista de Iniciação Científica (FAPERJ), membro e bolsista do Programa de Ensino Tutorial (PET – Floresta) e estagiário da Secretaria Municipal de Meio Ambiente do município do Rio de Janeiro – RJ (MA/CGCA/GEC). Trabalhou nas áreas de geoprocessamento aplicado a análise ambiental e inventário florestal. Obteve o título de Engenheiro Florestal em fevereiro de 2014, ano em que ingressou no curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais da UFRRJ, nível de mestrado, como bolsista da CAPES. Em 2015, tornou-se membro efetivo do corpo docente do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (INFMG).

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Relação dos parâmetros do modelo 3-PG. Descrição de cada parâmetro, símbolo do parâmetro no modelo, unidade, a forma de obtenção de cada parâmetro e respectivos valores. | 9 |
| Tabela 2. Resumo das análises estatísticas dos dados estimados para parametrização proposta por Borges et al. (2012). | 13 |
| Tabela 3. Equações ajustadas para as variáveis altura (H) e volume (V) em função do diâmetro a altura do peito (DAP) para 2030 observações. | 13 |
| Tabela 4. Resumo das análises estatísticas dos dados estimados após o ajuste dos parâmetros fullCanAge, nS, aH, nHB, aV e nVB. | 15 |
| Tabela 5. Médias mensais de t_x ($^{\circ}\text{C}$), t_n ($^{\circ}\text{C}$) e P (mm) do ar obtidos das Normais Climatológicas do INMET e R_s (MJ.m^{-2}) obtidos das séries temporais de radiação solar para América do Sul (modelo GL1.2). | 26 |
| Tabela 6. Resumo das análises estatísticas das variáveis DAP, H, V e IMA estimadas por meio de médias mensais (mensal) e normais climatológicas (NC) para região de Bocaiúva (MG). | 30 |
| Tabela 7. Médias mensais de temperatura máxima do ar (T_x , $^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima do ar (T_n , $^{\circ}\text{C}$) e precipitação (mm) obtidos das Normais Climatológicas do INMET e radiação solar global (R_s , MJ.m^{-2}) obtidos das séries temporais de radiação solar para América do Sul (modelo GL1.2). | 41 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribuição das variáveis DAP (a), Altura (c), Volume (e) e IMA (g) em relação as idades do plantio e a relação dos dados observados e estimados pelo modelo 3-PG para DAP (b), Altura (d), Volume (f) e IMA (h) para o município de Bocaiúva (MG) com a parametrização proposta por Borges et al. (2012). | 12 |
| Figura 2. Distribuição das variáveis DAP (a), Altura (c), Volume (e) e IMA (g) em relação as idades do plantio e a relação dos dados observados e estimados pelo modelo 3-PG para DAP (b), Altura (d), Volume (f) e IMA (h) para o município de Bocaiúva (MG) após o ajuste dos parâmetros fullCanAge, nS, aH, nHB, aV e nVB. | 14 |
| Figura 3. Fluxograma das relações entre fatores fisiológicos e ambientais no modelo 3-PG. (Fonte: adaptado de Tickle et al. (2001)) | 24 |
| Figura 4. Distribuição mensal das variáveis precipitação (mm), temperatura máxima (tx, °C) e temperatura mínima do ar (tn, °C) para o município de Curvelo (MG). | 27 |
| Figura 5. Distribuição mensal da radiação solar global (Rs – MJ.m-2) para o município de Curvelo (MG). | 28 |
| Figura 6. Distribuição das variáveis DAP (a), Altura (c), Volume (e) e IMA (g) em relação as idades do plantio (os círculos pretos correspondem as estimativas por meio de dados climáticos mensais (mensal), os xis pretos correspondem a estimativas por meio de normais climatológicas (NC) e os círculos cinzas são dados observados). Relação entre dados observados e estimados pelo modelo 3-PG, utilizando-se normais climatológicas, para DAP (b), Altura (d), Volume (f) e IMA (h) para o município de Bocaiúva (MG). | 29 |
| Figura 7. Variação dos moduladores de disponibilidade de água no solo (fAS) e modulador de déficit de pressão de vapor (fDPV) de janeiro a dezembro para região de Bocaiúva (MG). ... | 31 |
| Figura 8. Variação dos moduladores de disponibilidade de água no solo (fAS) e modulador de déficit de pressão de vapor (fVDP) em relação as idades do plantio para região de Bocaiúva (MG) no período de 2004 a 2011. | 32 |
| Figura 9. Feixe de curvas de índice de local gerados pelo método da curva-guia, para eucaliptos, considerando a idade índice de 72 meses para região de Bocaiúva (MG). | 42 |
| Figura 10. Produção do volumétrica em relação a idade, nas diferentes classes de sítio, obtidas a partir do modelo de Clutter (linha tracejada) e do modelo 3-PG (linha contínua) para região de Bocaiúva (MG). | 43 |
| Figura 11. Curvas de produção em volume em relação a idade nas diferentes classes de sítio para região de Bocaiúva (MG) oriundas do modelo 3-PG. | 44 |
| Figura 12. Estimativa do incremento médio anual (IMA – linha cinza) e incremento corrente anual (ICA – linha preta) para os sítios 18, 21, 24, e 27 para eucaliptos na região de Bocaiúva, MG. | 45 |
| Figura 13. Incremento médio anual (IMA – linha cinza) e incremento corrente anual (ICA – linha preta) estimados pelo modelo 3-PG para eucaliptos na região de Bocaiúva, MG. | 46 |

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| RESUMO | xi |
| ABSTRACT | xiii |
| INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 2 |
| | |
| MODELO 3-PG NA PREDIÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM ÁREAS PARA PLANTIOS COMERCIAIS DE EUCALYPTUS | |
| RESUMO | 5 |
| ABSTRACT | 5 |
| 1. INTRODUÇÃO | 7 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS..... | 8 |
| 2.1 Área de Estudo..... | 8 |
| 2.2 Calibração do Modelo 3-PG | 8 |
| 2.3 Dados de Entrada do Modelo 3-PG | 10 |
| 2.4 Validação da Modelagem | 11 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 11 |
| 4. CONCLUSÃO | 15 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 16 |
| | |
| EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO FLORESTAL NO NORTE DE MINAS GERAIS | |
| RESUMO | 20 |
| ABSTRACT | 20 |
| 1. INTRODUÇÃO | 22 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 23 |
| 2.1 Physiological Principles in Predicting Growth (3-PG)..... | 23 |
| 2.2 Entrada dos Dados de Climáticos | 25 |
| 2.3 Validação da Modelagem | 26 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 4. CONCLUSÃO | 32 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 33 |
| | |
| MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE PLANTIOS DE EUCALYPTUS UTILIZANDO-SE MODELO BASEADO EM PROCESSOS E EMPÍRICOS NO NORTE DE MINAS GERAIS | |
| RESUMO | 36 |
| ABSTRACT | 36 |
| 1. INTRODUÇÃO | 38 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 39 |
| 2.1 Área de Estudo..... | 39 |
| 2.2 Modelagem Tradicional | 39 |
| 2.3 Modelagem Baseada em Processos | 39 |
| 2.3.1 Razão de fertilidade..... | 40 |
| 2.4 Dados Climáticos de Entrada do Modelo 3-PG..... | 40 |
| 2.5 Validação da Modelagem | 41 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 42 |
| 4. CONCLUSÃO | 46 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 47 |
| CONCLUSÃO GERAL | 48 |

RESUMO

OLIVEIRA, Carlos Magno Moreira. **Modelagem do crescimento para plantios de eucalipto no norte de Minas Gerais, Brasil**. 2016. 48f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

Plantios comerciais de *Eucalyptus* tem aumentado no Brasil, principalmente no estado de Minas Gerais. A avaliação dos efeitos das variáveis edáficas e climáticas sobre o crescimento das árvores torna-se ferramenta importante para otimizar as atividades de manejo. Nessa perspectiva, esse trabalho tem por objetivo ajustar e parametrizar o modelo 3-PG para região Norte de Minas Gerais, utilizando dados de parcelas permanentes de inventário florestal, dados climáticos de estações climatológicas e dados oriundos de sensoriamento remoto. Esse estudo foi realizado em plantios comerciais do gênero *Eucalyptus* no município de Bocaiúva (MG). Para parametrizar os parâmetros constante de relação entre DAP e altura (aH), potência de relacionamento entre DAP e altura (nHB), constante de relacionamento entre volume e DAP (aV) e potência de relacionamento entre volume e DAP (nVB) foram utilizados 2031 observações. O modelo 3-PG foi executado com parâmetros sugeridos na bibliografia para região e posteriormente executada com modificações nos parâmetros mencionados anteriormente. Para avaliar o efeito da variabilidade climática sobre o plantio, foram avaliadas as estimativas do modelo 3-PG alimentado com normais climatológicas e médias mensais e posteriormente analisado os efeitos dos moduladores ambientais fAS e fDPV sobre o crescimento do plantio. O banco de dados das normais climatológicas foram obtidas do INMET e a radiação solar global foi obtido do modelo GL 1.2 para américa do sul. O banco de dados com médias mensais foi adquirido pelo INMET, sendo que a precipitação foi obtida do satélite tropical TRMM e a radiação solar global foi estimado pelo modelo proposto pela FAO 56. Posteriormente, foi avaliado a eficiência do modelo 3-PG em estimar o crescimento e produção do povoamento em relação as estimativas dos modelos empíricos, considerando o parâmetro FR (Fertility Rating) como indicador da qualidade de sítio. Por meio de análises estatísticas foi observado melhora significativa da modelagem processual com a modificação dos parâmetros sugeridos, indicando que os valores dessa parametrização podem ser utilizados para outros municípios dessa região. As análises estatísticas demonstram que houve redução da variação dos dados por meio do erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) e eficiência do modelo (EF) maior que 0,80 para as variáveis DAP, Altura e Volume, indicando melhora significativa nas estimativas do modelo. Comparando-se as estimativas das variáveis dendrométricas com normais climatológicas e medias mensais, observa-se, pelos gráficos, que as estimativas foram semelhantes, sendo que as medias mensais apresentaram estimativas superiores. A análise estatística demonstra que as medias mensais foram mais próximas aos dados observados, com $S_{yx}\%$ 28 e EF de 0,82 para volume, enquanto que as normais climatológicas apresentaram $S_{yx}\%$ de quase 60% e EF de 0,22. O modulador fAS apresentou maior restrição no desenvolvimento das árvores, principalmente nos meses de julho, agosto e setembro. A modelagem processual apresentou estimativas de produção média em relação a modelagem empírica, sendo que o sítio estimado pelo 3-PG apresentou valores próximos ao sítio médio estimado pela modelam tradicional. O parâmetro FR, relativo a fertilidade do solo, apresentou boa relação com a classificação de sítios de produção, sendo necessários outros estudos para melhorar a acurácia na classificação dos índices de sítios. O modelo 3-PG pode realizar estimativas precisas de variáveis dendrométricas, mostrando-se ferramenta importante para avaliação de áreas com aptidão para produção florestal, por considerar o efeito de variáveis ambientais e climáticas no crescimento das árvores. A modelagem processual pode ser utilizada juntamente com ferramentas empíricas para avaliar o crescimento e produção de

plantios florestais sobre diferentes atividades de manejo e também em áreas futuramente produtoras.

Palavras-chave: produção florestal, modelo ecofisiológico, modelo 3-PG.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Carlos Magno Moreira. **Modeling growth for eucalyptus plantations in the north of Minas Gerais, Brazil**. 2016. 48f. Dissertation (Master Science in Environment and Forest Science). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

Commercial plantations of *Eucalyptus* has increased in Brazil, mainly in the state of Minas Gerais. The assessment of the effects of soil and climatic variables on the growth of trees becomes important tool to optimize management activities. In this perspective, this study aims to adjust and parameterize the 3-PG model for the North of Minas Gerais, using data from permanent plots of forest inventory, climate data from weather stations and data from remote sensing. This study was conducted in *Eucalyptus* of commercial plantations in the city of Bocaiuva (Minas Gerais). To parameterize the constant parameters of the relationship between DAP and height (H) relationship of power between DAP and height (NHB), constant relationship between volume and DAP (aV) and relationship of power between volume and DAP (NVB) were used in 2031 comments. The PG-3 model was run with parameters suggested in literature for the region and then executed with changes in the parameters mentioned above. To evaluate the effect of climate variability on planting were assessed estimates of 3-PG model fed with climatological normal and monthly averages and then analyzed the effects of environmental modulators fans and FDPV on the growth of planting. The database of climatological normals were obtained from INMET and global solar radiation was obtained from the GL 1.2 model for South America. The database with monthly average was acquired by INMET, and the precipitation was obtained from tropical TRMM satellite and solar radiation was estimated by the model proposed by FAO 56. Subsequently, we evaluated the efficiency of the 3-PG model in estimating the growth and production of settlement regarding estimates of empirical models, considering the FR parameter (Fertility Rating) as a site quality indicator. Through significant improvement was observed statistical analysis of procedural modeling with the modification of the suggested parameters, indicating that the values of this parameter can be used for other municipalities that region. Statistical analyzes showed that there was a reduction of variation of the data through the standard error of estimate (Syx%) and model efficiency (EF) greater than 0.80 for DBH, height and volume, indicating significant improvement in the model estimates . Comparing the estimates of dendrometric variables with climatological normal and monthly averages, it is observed, the graphics, the estimates were similar, with the monthly averages showed higher estimates. Statistical analysis demonstrated that the monthly averages were closer to those observed data, Syx 28% and EF 0.82 to volume while normal climatic Syx% showed almost 60% and EF 0.22. fAS modulator showed greater restriction on the development of trees, especially in the months of July, August and September. The procedural modeling showed average yield estimates in respect of empirical modeling, and the site estimated by 3-PG showed values close to the average estimated by site traditional model. The FR parameter on soil fertility, showed good relationship with the classification of production sites, and further studies to improve the accuracy in the classification of sites indexes. The 3-PG model can make accurate estimates of dendrometric variables, showing an important tool for evaluating areas with fitness for forest production, considering the effect of environmental and climate variables in the growth of trees. The procedural modeling can be used together with empirical tools to assess the growth and production of forest plantations on different management activities and in the future producing areas.

Key words: yield forest, ecophysiological model, 3-PG model.

INTRODUÇÃO GERAL

Os plantios florestais tem expandido, principalmente em regiões onde os índices de chuva tem reduzido, o que pode aumentar a competição por água, tornando-se necessário a utilização de ferramentas que permitam, por exemplo, a avaliação do balanço hídrico, déficit de pressão de vapor e a necessidade nutricional, resultando em práticas silviculturais adequadas (STAPE et al., 2010; ALMEIDA e SANDS, 2015). Para espécies comerciais como o *Eucalyptus*, com ciclo de rotação de 6 a 7 anos, torna-se interessante a previsão de produção frente as condições climáticas, já que um ano de seca pode levar a prejuízos econômicos consideráveis (MARSDEN et al., 2013).

Os efeitos das mudanças climáticas e das práticas silviculturais sobre a produção florestal podem ser avaliados por meio de Modelos Baseados em Processos (MBP) (PAUL et al., 2007; ALMEIDA et al., 2010; WARING et al., 2010; WEI et al., 2014). Isso torna-se possível por esses modelos incorporarem a descrição biofísica, ecológica e os processos fisiológicos da floresta o que permite avaliar os efeitos dos fatores ambientais sobre o crescimento (WEI et al., 2014). Além disso, esses modelos podem ser utilizados para identificar áreas aptas ou inaptas para produção frente a condições climáticas atuais ou de cenários climáticos futuros (WHITE et al., 2000; BAESSO et al., 2010).

Modelos empíricos, tradicionalmente utilizados no manejo de florestas, consideram o sítio de produção estável, em que as relações empíricas estabelecidas são restritas ao sítio e as condições climáticas (FORRESTER e TANG, 2015; ALMEIDA et al., 2010). Os MBP podem ser utilizados como uma ferramenta complementar aos modelos empíricos, facilitando o entendimento dos processos que regem o crescimento das árvores, otimizando as atividades de manejo (WEI et al., 2014).

Os MBP consideram o plantio como uma unidade na qual o comportamento é simulado por um conjunto de equações baseadas em processos fisiológicos e biofísicos que ocorrem durante o desenvolvimento do plantio. Dessa forma, os MBP são úteis para predições a longo prazo, quando comparado com os modelos empíricos, principalmente em função do manejo e do clima (RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al., 2010; WEI et al., 2014).

Vários modelos baseados em processos tem sido desenvolvidos nos últimos anos. Dentre eles, o 3-PG (*Physiological Principles Predicting Growth*), desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), tem sido muito empregado, principalmente por requerer pequeno número de variáveis de entrada (PAUL et al., 2007; RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al., 2010). Além disso, a possibilidade de utilização de parâmetros obtidos da literatura para o 3-PG, facilita o emprego deste em áreas ainda não avaliadas para produção florestal (LANDSBERG e WARING, 1997).

Os dados mínimos necessários para executar o modelo 3-PG podem ser divididos em quatro categorias: fatores do sítio, dados climáticos, condições iniciais do plantio e parâmetros relativos a espécie em estudo (RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al., 2010).

Esse modelo tem sido empregado para avaliar a capacidade produtiva de áreas para produção florestal de *Eucalyptus* (ALMEIDA et al., 2010; STAPE et al., 2010), para espécie do gênero *Nothofagus* (WHITE et al., 2000), *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook (ZHAO et al., 2009), *Betula platyphylla* (POTITHEP e YASUOKA, 2011) e *Pinus elliottii* (GONZALEZ-BENECKE et al., 2014). Outra aplicação do modelo é a estimativa da Produtividade Primária Bruta (PPB) de florestas plantadas ou naturais, que está relacionado com a assimilação de CO₂ pelas árvores (COOPS et al., 2007; NIGHTINGALE et al., 2007).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004.
- ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T. R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. 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.
- ALMEIDA, C. A.; SANDS, P. J. Improving the ability of 3-PG to model the water balance of forest plantations in contrasting environments. **Ecohydrology**, 2015.
- 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. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.
- COOPS, N. C.; BLACK, T. A.; JASSAL, R. S.; TROFYMOW, J. A.; MORGENSTERN, K. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 3, p. 385-401, 2007.
- 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, 2016.
- GONZALEZ-BENECKE, C. A.; JOKELA, E. J.; CROPPER JR. W. P.; BRACHO, R.; LEDUC, D. J. 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.
- LANDSBERG, J. J.; WRING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.
- MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; JEAN-PAUL, L.; CORBEELS, M.; McMURTRIE, R.; STAPE, J. L.; EPRON, D.; MAIRE, G. LE. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 112-128, 2013.
- NIGHTINGALE, J. M.; COOPS, N. C.; WARING, R. H.; HARGROVE, W. W. Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across the U.S.A. with those generated by a simple process model, 3-PGS. **Remote Sensing of Environment** v. 109, n. 4, p. 500-509, 2007.
- PAUL, K. I.; BOOTH, T. H.; JOVANOVIĆ, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J. D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, 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.
- RODRÍGUEZ-SUÁREZ, J. A.; IGLESIAS, M. L.; DIAZ-FIERROS, F. 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, 2010.

- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G., FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.
- ZHAO, M.; XIANG, W.; PENG, C.; TIAN, D. 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, p. 1520-1531, 2009.
- WARING, R. H.; COOPS, N. C.; LANDSBERG, J. J. Improving predictions of forest growth using the 3-PGS model with observations made by remote sensing. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1722-1729, 2010.
- WEI, L.; MARSHALL, J. D.; ZHANG, J.; ZHOU, H.; POWERS, R. F. 3-PG simulations of young ponderosa pine plantations under varied management intensity: Why do they grow so differently?. **Forest Ecology and Management**, v. 313, p. 69-82, 2014.
- WHITE, J. D.; COOPS, N. C.; SCOTT, N. A. Estimates of New Zealand forest and scrub biomass from the 3-PG model. **Ecological Modelling**, v. 131, n. 2-3, p. 175-190, 2000.

CAPÍTULO I

Modelo 3-PG na predição de variáveis dendrométricas em áreas para plantios comerciais de *Eucalyptus*

3-PG model in predicting the productive potential areas for commercial *Eucalyptus* stands

RESUMO

Expansão dos plantios comerciais de *Eucalyptus* requer avaliações precisas com relação a predição da produção, considerando-se a influência dos fatores ambientais no desenvolvimento do plantio. Esse trabalho tem por objetivo ajustar e avaliar a precisão do modelo 3-PG em estimar as variáveis altura, DAP, volume e IMA em plantio comercial de *Eucalyptus* no norte de Minas Gerais, utilizando dados meteorológicos provenientes de estações automáticas e de sensoriamento remoto, em escala mensal. Foram utilizados dados provenientes de inventário florestal em plantios comerciais de *Eucalyptus* sp., dispostos em talhões com espaçamento de 3 x 3 metros, compreendendo uma área de total de 313 ha. Para estimar as variáveis dendrométricas foi utilizado o modelo 3-PGpjs 2.4, utilizando parametrização sugerida para a região, disponível na literatura e posteriormente realizado ajuste dos parâmetros fullCanAge e nS e parametrização dos parâmetros aH, nHB, aV e nVB. Observou-se que o modelo tende a superestimar as variáveis dendrométricas quando utilizado a parametrização proposta para essa região. Após o ajuste dos parâmetros fullCanAge e nS e parametrização dos parâmetros aH, nHB, aV e nVB o modelo melhorou suas estimativas com $R^2_{aj.}$ de 0,90 e EF acima de 0,80 para DAP, altura e volume e $R^2_{aj.}$ de 0,78 e EF de 0,58 para o IMA, assim como apresentou comportamento de distribuição média dos dados estimados em relação aos dados observados. O 3-PG mostrou eficiente na estimativa de variáveis de interesse no manejo florestal, assim como ferramenta potencial para avaliação de áreas propícias para expansão de novos plantios.

Palavras-chave: produção florestal; modelagem baseada em processos; modelo 3-PG.

ABSTRACT

Expansion of commercial plantations of *Eucalyptus* requires accurate assessments regarding the prediction of production, considering the influence of environmental factors in the development of planting. This work aims to adjust and evaluate the accuracy of the 3-PG model in estimating the variables height, DBH, volume and MAI in commercial planting of eucalyptus in northern Minas Gerais, using meteorological data from automatic stations and remote sensing in monthly scale. They used data from forest inventory in commercial plantations of *Eucalyptus* sp., arranged in plots with spacing of 3 x 3 meters, comprising an area of 313 ha. To estimate the dendrometric variables we used the model 3-PGpjs 2.4 using parameterization suggested for the region, available in the literature and later performed adjustment of parameters fullCanAge and nS and parameterization of the parameters H, NHB, aV and nVB. It was observed that the model tends to overestimate the dendrometric variables used when the parameterization proposal for that region. After adjusting the parameters fullCanAge and nS and parameterization of the parameters H, NHB, aV and NVB the model improved its estimates $R^2_{aj.}$ EF 0.90 and above 0.80 for DBH, height and volume and $R^2_{aj.}$ EF of 0.78 and 0.58 for the MAI, and had an average distribution behavior of the estimated data

on the observed data. The 3-PG showed efficient in the estimation of variables of interest in forest management, as well as a potential tool for the evaluation of areas suitable for expansion of new plantations.

Keywords: forest yield; process-based models; 3-PG model.

1. INTRODUÇÃO

As espécies do gênero *Eucalyptus* têm sido muito utilizadas no Brasil, para atender a demanda de madeira para serraria, celulose, energia, dentre outros usos. Com isso, é cada vez mais comum o uso de ferramentas confiáveis no gerenciamento da produção, principalmente em plantios com áreas extensas, onde diversos fatores ambientais influenciam no desenvolvimento do plantio (ALMEIDA et al., 2004).

Modelos de crescimento e produção são ferramentas utilizadas para prever o crescimento e produção de plantios florestais comerciais. Porém, os modelos biométricos, tradicionalmente aplicados, possuem limitações para estimativa da produção em locais onde não há plantios, pois necessitam de medições temporais de variáveis dendrométricas. Outra característica dos modelos tradicionais é a baixa sensibilidade às variações climáticas anuais e se houver práticas de manejo diferentes durante as rotações do plantio, as relações empíricas são alteradas (STAPE et al., 2004).

Uma alternativa aos modelos tradicionais são os modelos baseados em processo ou modelos mecanísticos que calculam a fotossíntese, em princípio, pela estimativa da quantidade de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) absorvida pelo dossel e a capacidade deste em fixar carbono com base no parâmetro de eficiência do uso da luz, que por sua vez é regulado por fatores ambientais que afetam a condutância estomática ou atividade fotossintética (LANDSBERG e WARING, 1997). Dessa forma, os Modelos Baseados em Processos (MBP) podem ser definidos como um processo no qual o comportamento do sistema é função de um conjunto de componentes e de suas interações e o ambiente, por meio de processos físicos e mecânicos que ocorrem ao longo do tempo (MAKELA et al., 2000).

Existe uma variedade de modelos que vem relacionando estimativas da Produtividade Primária Bruta (PPB), respiração autotrófica e o residual da Produtividade Primária Líquida (PPL), dentre os modelos estão o FOREST-BGC (RUNNING e COUGHLAN, 1988; RUNNING e GOWER, 1991), BIOMASS (McMURTRIE et al., 1990), TREGRO (WEINSTEIN et al., 1991) e o 3-PG (*Physiological Principles Predicting Growth*) desenvolvido por Landsberg e Waring (1997).

A concepção sobre a aplicação dos MBPs tem mudado, o que tem contribuído para difusão dessa ferramenta entre as empresas florestais. Porém, ainda tem-se a ideia de que os modelos empíricos fornecem resultados melhores quando comparado aos modelos mecanísticos ou processuais (MAKELA et al., 2000; TICKLE et al., 2001), isso porque estes têm capacidade de predição com maior objetividade em áreas amostradas, enquanto os processuais são mais generalistas, sendo potencialmente empregados em locais ainda sem informações das espécie de interesse (MAESTRI, 2003).

Um dos grandes impedimentos para difusão e utilização dos modelos baseados em processos está na quantidade de parâmetros necessários para executá-los, sendo que alguns desses parâmetros são de difícil obtenção (ALMEIDA et al., 2004, CAMPION et al., 2005) ou são pouco conhecidos, o que reduz a confiabilidade das estimativas (MAKELA et al., 2000). Além disso, os modelos baseados em processos são vistos apenas como ferramenta aplicável ao entendimento do desenvolvimento do ecossistema e para estimativa de produção de biomassa, ao invés de estimar variáveis dendrométricas de interesse dentro do manejo florestal, como diâmetro médio e volume de madeira (TICKLE et al., 2001).

Para difundir o emprego dos modelos baseados em processos e, por conseguinte, ser integrado no processo de gestão florestal junto aos modelos biométricos, o modelo 3-PG foi simplificado e desenvolvido em linguagem visual basic utilizando o Excel (SANDS e LANDSBERG, 2002) facilitando o uso e parametrização, o que permite determinar o potencial de produtividade de áreas sem plantios (STAPE et al., 2004) e fornecer orientações

para realizar estimativas sobre o estoque de madeira frente as variações climáticas (ALMEIDA et al., 2004).

O 3-PG tem sido empregado em plantios homogêneos em diferentes países para espécies do gênero *Eucalyptus sp.*, *Pinus sp.* e *Douglas fir* (TICKLE et al., 2001; SANDS e LANDSBERG, 2002; ALMEIDA et al. (2004); STAPE et al., 2004; PAUL et al., 2007; NIGHTINGALE et. Al., 2008; RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al. (2010); STAPE et al., 2010; BORGES et al., 2012; LONDERO et al., 2015).

Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho foi aplicar e avaliar o desempenho do modelo 3-PG para estimativa de variáveis de interesse no manejo florestal, utilizando dados climáticos temporais coletados em estações meteorológicas automáticas e obtidos por sensoriamento remoto, com baixo custo de obtenção, alta precisão e resolução espacial que abrange toda a área de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Bocaúva (MG) em plantios comerciais de *Eucalyptus sp.*. A área é composta por dez talhões implantados no ano de 2004, com espaçamento de 3 x 3 metros, compreendendo uma área total de aproximadamente 313 ha. O clima da região, segundo Köppen, é o “Aw” tropical de savana, com inverno seco e verão chuvoso, com temperatura média anual de 24,1°C e chuva média anual entre 1.000 mm a 1.100 mm (DURÃES et al., 2014).

2.2 Calibração do Modelo 3-PG

O modelo ecofisiológico 3-PG requer parâmetros alométricos e fisiológicos da espécie de interesse. Inicialmente foi utilizada a parametrização proposta por Borges et al. (2012) para *Eucalyptus* no cerrado na porção norte de Minas Gerais e avaliado a eficiência para estimativa das variáveis dendrométricas.

Posteriormente foi realizada a parametrização de modelos alométricos relativos a Altura total (m) e Volume (m³.ha⁻¹), sendo que os valores dos demais parâmetros sugeridos por Borges et al. (2012) foram mantidos. Por meio do Diâmetro a Altura do Peito (DAP, cm), altura total (m) e volume (m³.ha⁻¹), coletados no período de 2004 a 2011, foram ajustadas equações para obtenção dos parâmetros constante de relação entre DAP e altura (aH), potência de relacionamento entre DAP e altura (nHB), constante de relacionamento entre volume e DAP (aV) e potência de relacionamento entre volume e DAP (nVB). Segundo Landsberg e Waring (1997) o modelo alométrico incorporado no 3-PG que relaciona a altura total da árvore e o diâmetro a altura do peito (DAP) (w_h), o volume total e o DAP (w_v):

$$w_h = a_i \cdot DAP^{n_h} \quad (1)$$

$$w_v = a_i \cdot DAP^{n_v} \quad (2)$$

em que, w_h e w_v representam as variáveis altura total e DAP, respectivamente; a_i é o coeficiente e n_i é a potência que reflete a característica da espécie. Dados de DAP, altura, volume e incremento médio anual (IMA), estimados pelo modelo 3-PG, foram comparados com os dados obtidos pelo inventário florestal a fim de ajustar os parâmetros fullCanAge que relacionado a idade de fechamento do dossel, ou seja, quando atinge 100% de cobertura, e StemPower (nS) que relaciona a massa do fuste e o DAP (RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al. 2010) (Tabela 1).

Tabela 1. Relação dos parâmetros do modelo 3-PG. Descrição de cada parâmetro, símbolo do parâmetro no modelo, unidade, a forma de obtenção de cada parâmetro e respectivos valores.

| Parâmetro | Símbolo no 3-PG | Unidade | F | EC |
|---|-----------------|--------------------------------|---|-------|
| Partição folha/lenho para D = 2 cm | pFS2 | - | B | 1,64 |
| Partição folha/lenho para D = 20 cm | pFS20 | - | B | 0,15 |
| Constante do relacionamento entre massa do lenho e diâmetro | StemConst | - | B | 0,02 |
| Potência do relacionamento entre massa do lenho e diâmetro | StemPower | - | A | 3,22 |
| Fração máxima da PPL para raízes | pRx | - | L | 0,5 |
| Fração mínima da PPL para raízes | pRn | - | L | 0,1 |
| Taxa de queda de “litter” para t = 0 | gammaFx | 1/mês | B | 0,07 |
| Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta | gammaF0 | 1/mês | P | 0,001 |
| Idade em que a taxa de queda de “litter” é $\frac{1}{2}(\sigma +)$ | tgammaF | mês | B | 4 |
| Taxa média de ciclagem radicular | Rttover | 1/mês | B | 0,025 |
| Temperatura mínima para o crescimento | Tmin | °C | L | 8 |
| Temperatura ótima para o crescimento | Topt | °C | L | 25 |
| Temperatura máxima para o crescimento | Tmax | °C | L | 40 |
| Valor de fN quando FR = 0 | fN0 | - | L | 0,5 |
| Potência de (1 – FR), na expressão do fN | fNn | - | L | 1 |
| Nível de fertilidade (FR) | FR | - | L | 1 |
| Define a resposta estomática ao déficit de pressão do vapor | CoeffCond | 1/mBar | L | 0,032 |
| Parâmetro relacionado com disponibilidade de água no solo | soilclass | - | O | C |
| Idade máxima do povoamento para computar a idade | MaxAge | Ano | L | 9 |
| Potência para idade relativa (fage) | nAge | - | P | 4 |
| Idade relativa igual a 0,5 | rAge | - | P | 0,95 |
| Condutância máxima do dossel | MaxCond | m/s | P | 0,02 |
| IAF em que a condutância do dossel é máxima | LAIgcx | m ² /m ² | P | 3,33 |
| Condutância da camada limite do dossel | Blcond | m/s | P | 0,2 |
| Área foliar específica para plantios em idade zero | SLA0 | m ² /kg | B | 13,74 |
| Área foliar específica para plantios em idade adulta | SLA1 | m ² /kg | B | 7,56 |
| Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma +) 1 \sigma$ | tSLA | Ano | B | 1,23 |
| Interceptação máxima de água pelo dossel | MaxIntcptn | - | P | 0,15 |
| IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima | LAImaxIntcptn | - | P | 0,15 |
| Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel | k | - | P | 0,5 |
| Idade de fechamento do dossel | fullCanAge | Ano | B | 2 |
| Eficiência quântica máxima do dossel | Alpha | - | B | 0,08 |
| Relação PPL/PPB | Y | - | L | 0,5 |
| Fração de galho e casca para plantios em idade inicial | fracBB0 | - | B | 0,59 |
| Fração de galho e casca para plantios em idade adulta | fracBB1 | - | B | 0,19 |
| Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(+)$ | tBB | Ano | B | 2,17 |
| Densidade básica mínima – plantios em idade inicial | rhoMin | t/m ³ | B | 0,382 |
| Densidade básica máxima – plantios em idade adulta | rhoMax | t/m ³ | B | 0,505 |

F= forma de obtenção do parâmetro; B= parâmetro obtido de Borges et al. (2012) por observação ou ajuste; A = parâmetro ajustado; L = parâmetro obtido da literatura; P= parâmetro com valor original do modelo; EC = valor do parâmetro; D = Diâmetro; PPL = Produtividade Primária Líquida; FR= razão de fertilidade; PPB = Produtividade Primária Bruta;

2.3 Dados de Entrada do Modelo 3-PG

As informações relativos a temperatura mínima e máxima do ar (t_n e t_x , °C), radiação solar global (R_s , MJ. m⁻². dia⁻¹) e chuva (P, mm) que podem ser inseridos no modelo na forma de médias históricas da região ou médias mensais atuais, sendo esta a escala dos dados empregados nesse trabalho. Dados relativos a t_x e t_n foram obtidas de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a chuva foi obtida do satélite tropical TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) pelo produto 3B43, com resolução espacial de 20 km e informações de chuva horária que foram convertidos para média mensal. Segundo Almeida et al. (2015) os dados do produto 3B43 podem ser utilizados quando não há dados de Estações Meteorológicas Convencionais (EMC), com boa precisão.

As informações de R_s foram obtidas pelo método proposto pela FAO 56 (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (Allen et al., 1998) que requer informações de latitude do local e horas de brilho solar por dia (n), sendo este último obtido da base de dados do INMET:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (3)$$

em que, R_s = radiação solar (MJm⁻²dia⁻¹); $a_s + b_s$ = fração da radiação no topo da atmosfera que chega ao planeta em dias claros ($n=N$); n =duração de brilho solar (horas); N =possibilidade máxima de duração de horas de brilho solar (horas); R_a = radiação solar no topo da atmosfera (MJm⁻²dia⁻¹).

A radiação solar no topo da atmosfera (R_a) foi obtida da seguinte forma:

$$R_a = 37,6 \cdot \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \left[\left(H \cdot \frac{\pi}{180} \right) \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}H \right] \quad (4)$$

em que, $\left(\frac{D}{D_0} \right)^2$ = distância relativa terra sol (U.A – Unidade Astronômica); H =ângulo horário do por do sol (°); δ = declinação solar (°); φ = latitude (°).

Outras informações necessárias para executar o modelo são latitude do local do plantio, fertilidade e textura do solo e capacidade mínima e máxima de retenção de água no solo. A variável referente a fertilidade do solo varia de 0 a 1, sendo que 1 indica que há alta fertilidade e não impede o crescimento do plantio e se aproxima de 0 quando há redução da fertilidade. A textura do solo foi obtida a partir do levantamento de solo realizado pela empresa, sendo constatado a predominância de latossolo vermelho com textura argilosa. Segundo Borges (2012) nessa região há uma variação da disponibilidade de água no solo (Available Soil Water – ASW) de 200 mm a 260 mm na profundidade efetiva do sistema radicular de 2,0 metros.

2.4 Validação da Modelagem

Para avaliar a acurácia das estimativas obtidas por meio do modelo 3-PG, foram utilizadas 335 medições do inventário florestal realizadas em 10 talhões e sobrepostas aos valores médios estimados pelo 3-PG para avaliar o comportamento das variáveis Diâmetro Médio a Altura do Peito (DAP - cm), Altura (m), Volume (m³) e Incremento Médio Anual (IMA – m³.ha⁻¹). Posteriormente, as medições provenientes do inventário florestal foram filtradas nas diferentes idades do povoamento de forma que coincidissem com as idades de saída do modelo, totalizando 25 observações médias de parcelas para aplicar os seguintes métodos estatísticos: correlação linear (Pearson) (r), coeficiente de determinação ajustado ($R_{aj.}^2$), erro padrão da estimativa (S_{yx}), eficiência do modelo (EF) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). As formulações que foram usadas seguem abaixo:

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (5)$$

$$R_{aj.}^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{res}}{SQ_t} \right) \cdot \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (6)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n-p-1}} \quad \therefore S_{yx} \% = \frac{S_{yx}}{\bar{O}} * 100 \quad (7)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

em que, P_i é o i ésimo valor estimado pelo modelo 3-PG, O_i é o i ésimo valor observado, \bar{O} é a média aritmética da variável observada, SQ_{res} é a soma dos quadrados dos resíduos, SQ_t é a soma total dos quadrados, n é o número de dados observados e p é o número de coeficientes do modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de saída do modelo 3-PG, utilizando a parametrização do Borges et al. (2012), foram plotados sobre os dados observados nos primeiros 7 anos do povoamento (Figura 1). Percebe-se que a distribuição dos dados estimados demonstra tendência de superestimativa em relação aos dados observados.

O modelo tende a superestimar os valores das quatro variáveis avaliadas, principalmente após os 4,5 anos de idade do povoamento (Figura 1). Após o quarto ano, espera-se que a altura média comece a estabilizar e o plantio aumente o incremento em diâmetro, isso porque o desenvolvimento do dossel se estabiliza e aumenta-se a competição entre plantas (LONDERO et al., 2015). Observa-se que a modelagem dos dados por meio dos parâmetros propostos por Borges et al. (2012) tende a aumentar os resíduos próximo ao período de rotação do povoamento, o que fica evidente na relação entre observado e estimado para o Volume e conseqüentemente para o IMA (Figura 1-f,h).

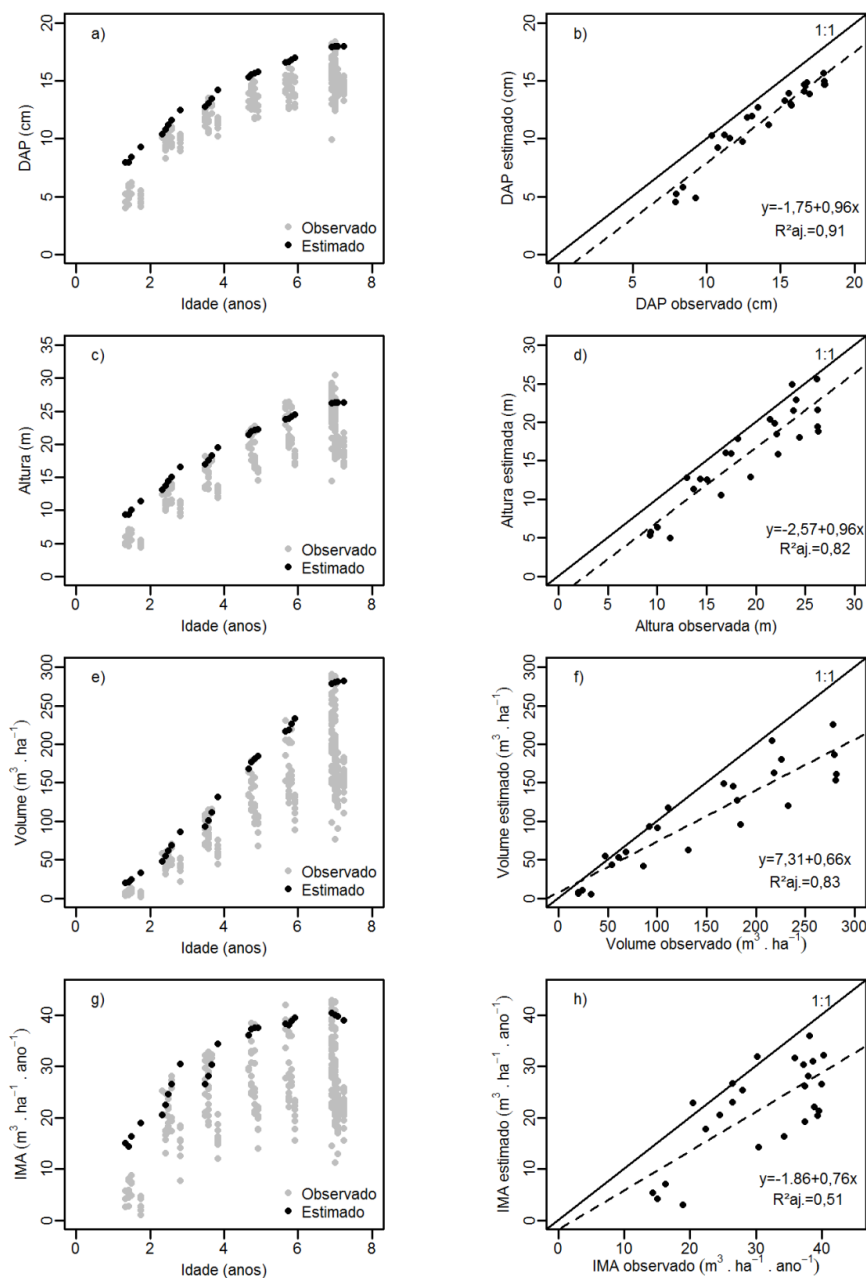


Figura 1. Distribuição das variáveis DAP (a), Altura (c), Volume (e) e IMA (g) em relação as idades do plantio e a relação dos dados observados e estimados pelo modelo 3-PG para DAP (b), Altura (d), Volume (f) e IMA (h) para o município de Bocaiúva (MG) com a parametrização proposta por Borges et al. (2012).

O coeficiente de Pearson mostrou-se satisfatório para as variáveis DAP, Altura e Volume com valores superior a 0,90, enquanto que esse coeficiente para o IMA foi de 0,73, apresentando boa relação entre os dados observados e estimados pelo modelo (Tabela 1).

O coeficiente de determinação ajustado para as variáveis DAP, Altura e Volume foi superior a 0,80, demonstrando que mais de 80% da variação da variável dependente é explicado pela variável independente (Figura 1). A eficiência do modelo mostrou-se muito baixo em todas as variáveis, não ultrapassando a marca de 0,60 para o DAP, Altura e Volume, enquanto que para o IMA o EF foi de -0,53 indicando que a média dos dados observados é melhor que a predição do modelo (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo das análises estatísticas dos dados estimados para parametrização proposta por Borges et al. (2012).

| Variáveis | N | R | R ² _{aj.} | S _{yx} | S _{yx} % | EF | RMSE |
|--|----|------|-------------------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|
| DAP (cm) | 25 | 0,95 | 0,91 | 2,57 | 22,29 | 0,45 | 2,46 |
| Altura (m) | 25 | 0,91 | 0,82 | 4,25 | 27,14 | 0,52 | 4,08 |
| Volume (m ³ .ha ⁻¹) | 25 | 0,92 | 0,83 | 59,47 | 58,18 | 0,22 | 57,04 |
| IMA (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹) | 25 | 0,73 | 0,51 | 11,66 | 53,78 | -0,53 | 11,18 |

Segundo Rodríguez-Suárez et al. (2010) as variáveis fullCanAge e StemPower (nS) quando ajustadas adequadamente, proporcionam melhores resultados. A fullCanAge está relacionado com a idade de fechamento do dossel, ou seja, quando o dossel atinge 100% de cobertura. StemPower relaciona a massa do fuste e o DAP. Os valores desses parâmetros podem ser obtidos através de medições em campo ou por meio de ajustes. O melhor resultado para aqueles parâmetros foram 2 e 3,22, respectivamente obtidas por meio de ajustes. O valor do parâmetro fullCanAge, encontrado nesse estudo, corrobora com os valores encontrados por Borges et al. (2012), enquanto que Rodríguez-Suárez et al. (2011) encontrou valor de 3,5 no noroeste da Espanha e Londero et al. (2015) encontrou 3 para o sul do Brasil. Como essa variável indica a idade de fechamento do dossel, percebe-se a coerência nesses resultados encontrados, já que as condições ambientais em região tropical proporciona maior atividade fotossintética e por conseguinte maior incremento de fitomassa em menor intervalo de tempo, quando comparado as regiões temperadas.

Rodríguez-Suárez et al. (2011) também menciona que o parâmetro nS tem influência sobre as estimativas do modelo, principalmente após o quinto ano do plantio. Dessa forma, observa-se que na Figura 2 os dados estimados tem tendência central em relação aos dados observados, o que é esperado para um modelo que gera estimativas médias para as variáveis dendrométricas em diferentes idades do plantio.

Também foram ajustados os modelos alométricos relativos as variáveis altura (H) e volume de madeira (V) a partir de 2030 observações. O ajuste dos modelos alométricos apresentaram bons resultados, sendo R²_{aj.} de 0,92 e S_{yx}% de 10,48 para a variável altura e R²_{aj.} de 0,87 e S_{yx}% de 21,59 para Volume. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Londero et al. (2015) em Guaíba (RS) com *Eucalyptus saligna*.

Na Tabela 2 são apresentadas as equações, por meio das quais foram determinados os parâmetros constante de relacionamento entre altura e DAP (aH), potência de relacionamento entre altura e DAP (nHB), constante de relacionamento entre volume e DAP (aV), potência de relacionamento entre volume e DAP (nVB), respectivamente 0,60, 1,33, 0,23, 2,47. A partir desses parâmetros foram obtidos novas estimativas do modelo (Figura 3).

Tabela 3. Equações ajustadas para as variáveis altura (H) e volume (V) em função do diâmetro a altura do peito (DAP) para 2030 observações.

| Região | Variável | Equação | N | R ² | S _{xy} % |
|---------------|--------------------------|------------------------------|------|----------------|-------------------|
| Bocaiúva (MG) | altura (m) | H=0,60*.dap ^{1,33*} | 2030 | 0,92 | 10,48 |
| | volume (m ³) | V=0,23*.dap ^{2,47*} | 2030 | 0,87 | 21,59 |

^{ns}=não significativo ; e*=significativo a 5%.

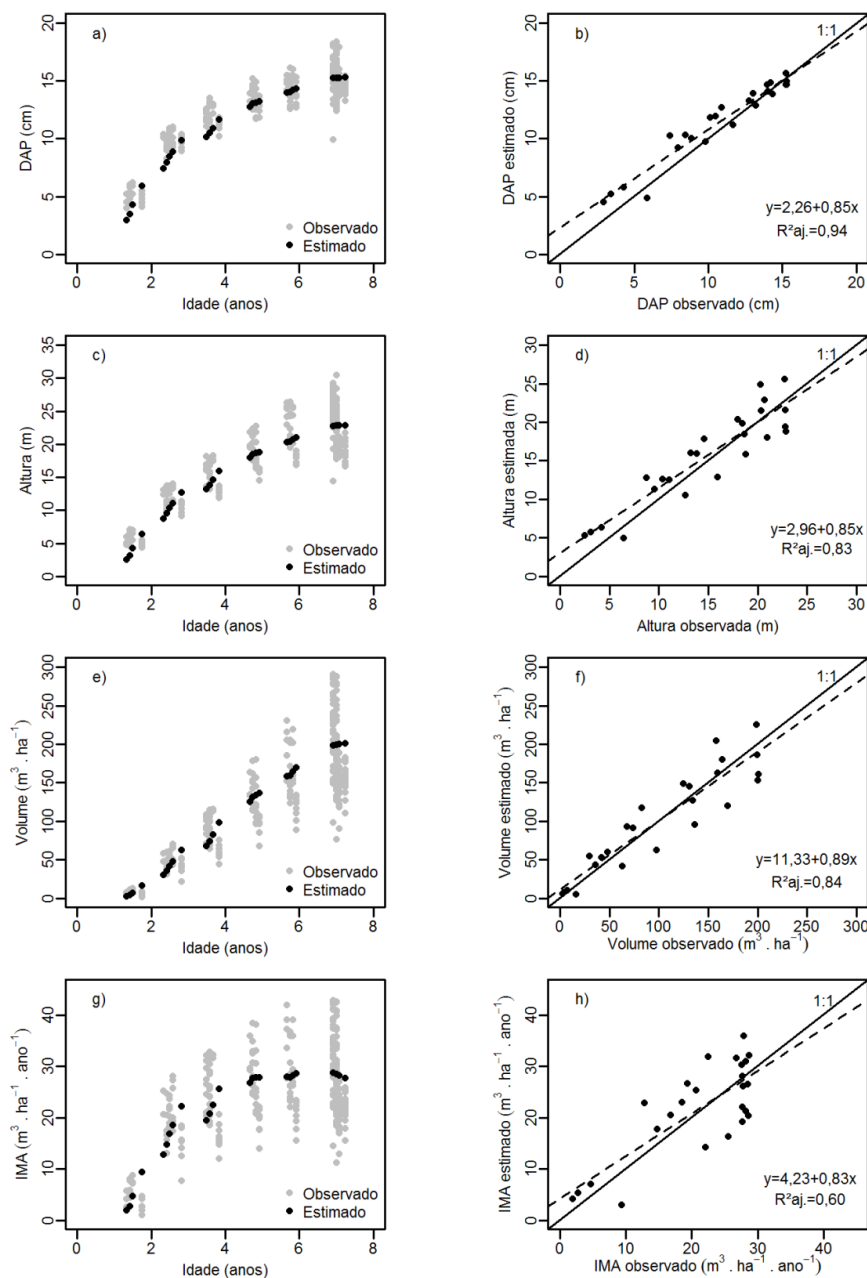


Figura 2. Distribuição das variáveis DAP (a), Altura (c), Volume (e) e IMA (g) em relação as idades do plantio e a relação dos dados observados e estimados pelo modelo 3-PG para DAP (b), Altura (d), Volume (f) e IMA (h) para o município de Bocaiúva (MG) após o ajuste dos parâmetros fullCanAge, nS, aH, nHB, aV e nVB.

Pela análise estatística, observa-se melhoria nas estimativas após o ajuste dos parâmetros fullCanAge e nS e parametrização dos parâmetros aH, nHB, aV e nVB, principalmente pela redução da variação dos dados, o que é demonstrado pelo erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) e pela eficiência do modelo (EF) que para o DAP, Altura e Volume foi maior que 0,80 (Tabela 3). Tickle et al. (2001) obteve $S_{yx}\%$ próximos aos encontrados nesse trabalho para variável volume e R^2_{aj} de 0,58.

O IMA apresentou melhoria considerável em relação a modelagem realizada com os parâmetros propostos por Borges et al. (2012). Observa-se que o valor da EF do modelo ficou próximo a 0,60 e o RMSE que foi de $5,82 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (Tabela 4). O coeficiente de determinação ajustado mostra que de 60% da variação da variável dependente é explicada

pelas variáveis independentes, enquanto que Almeida et al. (2004b) obteve ajuste onde a regressão explica mais de 80% dessa variação em uma análise com 10 observações. A redução do coeficiente de determinação ajustado está fortemente relacionada com o número de observações, sendo que ao reduzir esse número o R^2_{aj} aproxima-se de 1.

Pela Figura 2 (b, d, e, h) observa-se que a linha de tendência da regressão após o ajuste do modelo foi melhor, o que é demonstrando pela inclinação da curva próxima a 1. Almeida et al. (2004a) também observou boa correspondência para as variáveis volume e área basal em plantio de *Eucalyptus* no Espírito Santo, Brasil.

O 3-PG tende a superestimar o DAP, H, Volume e IMA médios, principalmente nas idades iniciais do plantio (Figura 2-b, d, f, h). Essa tendência inverte-se a partir dos 6 anos, quando o modelo tende a subestimar essas variáveis, porém com menor erro, já que os dados tendem a ficar próximos a linha um pra um. Esse comportamento também foi observado por Amichev et al. (2010) com híbridos de Walker aos 7 anos. Segundo Almeida et al. (2010) o 3-PG tende a superestimar essas variáveis quando se inicia o modelo. Outra fonte de erro na estimativa seria a densidade da madeira, já que o modelo considera como variável de valor fixo para estimativa do volume e não detecta a influência da precipitação ou estiagem sobre a densidade (ALMEIDA et al., 2010).

Tabela 4. Resumo das análises estatísticas dos dados estimados após o ajuste dos parâmetros fullCanAge, nS, aH, nHB, aV e nVB.

| Variáveis | N | R | R^2_{aj} | S_{yx} | $S_{yx}\%$ | EF | RMSE |
|--|----|------|------------|----------|------------|------|-------|
| DAP (cm) | 25 | 0,97 | 0,93 | 1,24 | 10,74 | 0,87 | 1,19 |
| Altura (m) | 25 | 0,92 | 0,83 | 2,76 | 17,59 | 0,80 | 2,64 |
| Volume (m ³ .ha ⁻¹) | 25 | 0,92 | 0,84 | 27,11 | 26,52 | 0,84 | 26,00 |
| IMA (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹) | 25 | 0,78 | 0,60 | 6,07 | 28,00 | 0,58 | 5,82 |

4. CONCLUSÃO

O modelo 3-PG é eficiente na estimativa de variáveis de interesse no manejo florestal. Por meio da parametrização realizada em plantio de referência é possível realizar estimativas confiáveis para áreas de interesse, sendo necessário apenas o ajuste ou parametrização de alguns parâmetros, como fullCanAge, nS, aH, nHB, aV e nVB, para melhorar a precisão do modelo.

Por meio dessa parametrização, pode-se realizar estimativas de produção florestal em áreas que empresas florestais tenham interesse em produzir, utilizando-se dados de estações meteorológicas e provenientes de sensoriamento remoto.

Assim, o modelo 3-PG demonstra que pode ser utilizado como ferramenta do planejamento florestal, auxiliando na tomada de decisão sobre a definição e mapeamento de áreas com potencial para a produção florestal.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF, Anuário Estatístico da. Ano base 2012. Brasília, DF, 2013.
- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; BORNAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.4, p.650-662, 1989.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J.; AMBROGI, M. S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S. M.; BERTOLUCCI, F. L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 2-3, p. 167-177, 2004.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004.
- ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T. R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. 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.
- ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; JUNIOR OLIVEIRA, J. F.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A. S. Avaliação das Estimativas de Precipitação do Produto 3B43-TRMM do Estado do Amazonas. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 279-286, 2015.
- AMICHEV, B. Y.; JOHNSTON, M.; REES, K. C. J. V. Hybrid poplar growth in bioenergy production systems: Biomass prediction with a simple process-based model (3PG). **Biomass & Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 687-702, 2010.
- BORGES, J. S. Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. 2009. 77f. **Dissertação** (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2009.
- BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H. M.; BARROS, N. F.; DIAS, S. C. M. 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.
- CAMPION, J. M.; ESPREY, L. J.; SCHOLES, M. C. Application of the 3-PG model to a *Eucalyptus grandis* stand subjected to varying levels of water and nutritional constraints in KwaZulu-Natal, South Africa. **Southern African Forestry Journal**, v. 203, n. 1, p. 3-13, 2005.
- COOPS, N. C.; WARING, R. H.; LANDSBERG, J. J. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **Forest Ecology and Management**, v. 104, n. 1-3, p. 113-127, 1998.
- DURÃES, M. C. O.; SALES, N. L. P.; NETO, S. D.; FIGUEIREDO, M. A. P. Levantamento florístico do estrato arbóreo de três fragmentos de floresta ciliar como subsídio à recomposição da vegetação do rio Cedro, Montes Claros – MG. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 47-58, 2014.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

- LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; SZYMCZAK, D. A.; ARAÚJO, E. F. Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba-RS. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 293-305, 2015.
- MAESTRI, R. Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais. 2003. 143f. **Tese** (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2003.
- MÄKELÄ, A.; LANDSBERG, J., EK, A. R.; BURK, T. E.; TER-MIKAELIAN, M.; AGREN, G. I.; OLIVER, C. D.; PUTTONEN, P. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. **Tree Physiology**, v. 20, n. 5-6, p. 289-298, 2000.
- McMURTRIE, R. E.; ROOK, D. A.; KELLIHER, F. M. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen. **Forest Ecology and Management**, v. 30, n.1-4, p. 381-413, 1990.
- NIGHTINGALE, J. M.; HILL, M. J.; PHINN, S. R.; DAVIES, I. D.; HELD, A. A.; ERSKINE, P. D. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. **Forest Ecology and Management**, v. 254, n. 2, p. 107-121, 2008.
- PAUL, K. I.; BOOTH, T. H.; JOVANOVIC, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J. D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, n. 2-3, p. 237-247, 2007.
- RODRÍGUEZ-SUÁREZ, J. A.; IGLESIAS, M. L.; DIAZ-FIERROS, F. Application of the 3PG forest growth model to a *Eucalyptus globulus* plantation in Northwest Spain. **Eur J Forest Res**, v. 129, n. 4, p. 573-583, 2010.
- RUNNING, S. W.; COUGHLAN, J. C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. **Ecological Modelling**, v. 42, n. 2, p. 125-154, 1988.
- 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, 2002.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G., FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil *Eucalyptus* Potential 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 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.; The Bago Science Team. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. **Forest Ecology and Management**, v. 152, n. 1-3, p. 275-291, 2001.
- WEI, L.; MARSHALL, J. D.; ZHANG, J.; ZHOU, H.; POWERS, R. F. 3-PG simulations of young ponderosa pine plantations under varied management intensity: Why do they grow so differently?. **Forest Ecology and Management**, v. 313, p. 69-82, 2014.

WEINSTEIN, D. A.; BELOIN, R. M.; YANAI, R. D. Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses. **Tree Physiology**, v. 9, n. 1-2, p. 127-146, 1991.

CAPÍTULO II

Efeitos da variabilidade climática na produção florestal no Norte de Minas Gerais

Effects of climate variability in forest production in the North of Minas Gerais

RESUMO

O clima têm influência direta na produção em plantios comerciais de *Eucalyptus*. A compressão dos efeitos dessas variações sobre as variáveis que regem o crescimento das árvores torna-se importante no planejamento do manejo de florestas. Esse estudo tem por objetivo analisar o efeito de variações no clima, por meio de dados climáticos mensais e médias históricas em plantios de *Eucalyptus* utilizando o modelo 3-PG. Para isso, foi utilizado o modelo 3-PG com parametrização proposta na literatura para o norte de Minas Gerais. O 3-PG foi executado utilizando médias históricas e mensais obtidas pelo INMET, sendo que algumas variáveis foram obtidas por sensoriamento remoto. Para avaliar as estimativas do modelo foram utilizados a correlação linear (Pearson) (r), coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa (S_{yx}), eficiência do modelo (EF) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). As variáveis dendrométricas, Diâmetro Médio a Altura do Peito (DAP - cm), Altura (m), Volume (m^3) e Incremento Médio Anual (IMA - $m^3.ha^{-1}$), estimadas pelo 3-PG, utilizando normais climatológicas, demonstraram bons resultados com $R^2_{aj.}$ acima de 0,77, porém há tendência de subestimativa das variáveis ao longo do tempo. Essa tendência de subestimativa reduz a eficiência (EF) do modelo em estimar, principalmente, o IMA que apresentou EF de -0,53 e aumenta a diferença entre os dados estimados e observados. Observa-se que de janeiro de 2005 a dezembro de 2011 não houve redução da produção, caso as variáveis climáticas tivessem comportamento semelhante as médias históricas. Dentre os moduladores ambientais, observou-se que o fAS teve maior restrição sobre o crescimento das árvores nessa região, seguido do modulador fDPV, o que pode está relacionado as altas temperaturas que a região apresenta. A utilização de normais climatológicas mostrou-se adequadas para analisar o potencial produtivo de novas áreas para produção de *Eucalyptus*, porém deve-se atentar para possíveis variações climáticas que podem reduzir a produção.

Palavras-chave: variação climática; modelagem ecofisiológica; modelo 3-PG.

ABSTRACT

The climate has a direct influence on production in commercial plantations of *Eucalyptus*. The compression of the effects of these changes on the variables governing the growth of the trees becomes important in the planning of forest management. This study aims to analyze the effect of variations in climate, through monthly weather data and historical averages in *Eucalyptus* plantations using the 3-PG model. For this, we used the 3-PG model parameterization proposed in the literature to the north of Minas Gerais. The 3-PG was performed using historical and monthly averages by INMET, and some variables were obtained by remote sensing. To evaluate the estimates of the model were used linear correlation (Pearson) (r), adjusted coefficient of determination ($R^2_{aj.}$), standard error of estimate (S_{yx}), model efficiency (EF) and root mean squared error (RMSE). The dendrometric variables, average diameter at breast height (DBH - cm), height (m), volume (m^3) and annual average increase (MAI - $m^3.ha^{-1}$) estimated by the 3-PG using normal climatological

demonstrated good results with R^2_{aj} above 0.77, but there is underestimation trend of variables over time. This trend of underestimation reduces efficiency model (EF) to estimate mainly the MAI who presented EF -0.53 and increases the difference between the estimated and observed data. It is observed that from January 2005 to December 2011 there was no reduction in production if climatic variables had similar behavior historical averages. Among the environmental modulators, it was observed that the fans had a greater restriction on the growth of trees in this region, followed by fDPV modulator, which can associated high temperatures that the region has. The use of climatological normals proved to be appropriate to analyze the productive potential of new areas for production *Eucalyptus*, but attention should be paid to possible climate changes that can reduce production.

Keywords: climate variation; ecophysiological modeling; 3-PG model.

1. INTRODUÇÃO

Os plantios comerciais de eucalipto visam suprir a demanda das empresas florestais no que tange a produção de papel e celulose, carvão para siderurgia, lenha, serrados, compensados, laminados, chapas de fibras e MDF (*Medium Density Fiberboard*) (BAESSO et al., 2010). Entre 2012 e 2013 as áreas plantadas no Brasil tiveram um aumento de 2,8%, sendo que 72,0 % desse total são de eucalipto e 20,7% são de pinus (ABRAF, 2013). Vários estados brasileiros possuem grandes áreas de plantios de eucaliptos, sendo que Minas Gerais possui a maior área (BAESSO et al., 2010).

Mudanças no comportamento das variáveis climáticas tem influenciado diretamente na produção das florestas e, por conseguinte, o abastecimento industrial (BAESSO et al., 2010). Segundo Coops e Waring (2011), variações nas condições climáticas têm sido observado nas três últimas décadas no Noroeste do oceano Pacífico, reduzindo a quantidade e a duração da cobertura de neve. Essas mudanças também tem provocado mudanças sobre conjuntos de espécies arbóreas do Noroeste.

A partir dessas tendências há a necessidade de se entender a relação entre as mudanças climáticas e as florestas, o que auxilia nas operações florestais (COOPS e WARING, 2011). Estudos demonstram que há forte relação entre o crescimento e a disponibilidade de água, sendo que longos períodos de estiagem podem reduzir a produtividade dos plantios de eucaliptos, ocasionando na mortalidade (ALMEIDA et al., 2010).

Há várias formas de prever como o clima afeta a distribuição da vegetação. Alguns modelos relacionam variáveis climáticas ao desenvolvimento de algumas espécie, por vezes, incluindo o relevo e propriedades do solo. Dentre os métodos estatísticos utilizados para avaliar essas mudanças, pode-se destacar regressão múltipla, redes neurais e árvore de decisão (COOPS e WARING, 2011).

A redução da precipitação e as variabilidades climáticas podem ocasionar em deficiências na formação dos indivíduos florestais e baixo incremento do plantio. Avaliação da distribuição da precipitação, perfis climáticos e utilização de modelos estatísticos tem sido utilizados no zoneamento climática, indicando a espécie que melhor se adaptada as condições climáticas (BUGG et al., 2006).

Os modelos baseados em processos possuem algumas vantagens quando comparados aos modelos empíricos para previsão de cenários de produção florestal. Os métodos estatísticos convencionais de crescimento e produção baseiam-se em dados dendrométricos históricos do povoamento, limitando-se as predições de crescimento futuro por desconsiderar as variações climáticas (LU et al., 2015). Além disso, os modelos baseados em processos consideram variações sazonais como a radiação solar, umidade e temperatura, propriedades relativas ao solo, assim como tratos culturais aplicados ao povoamento que podem influenciar na produção fotossintética tanto na porção da árvore acima do solo, como nas raízes (COOPS e WARING, 2010; ZHAO et al., 2009). A partir dos modelos baseados em processos pode-se avaliar quais variáveis ambientais tem maior restrição sobre o crescimento em função das variações climáticas (PINKARD e BATTAGLIA, 2001; BAESSO et al., 2010), porém exige-se conhecimento detalhado sobre as características fisiológicas da espécie de interesse (COOPS e WARING, 2010).

O 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*), modelo baseado em processos, tem sido utilizado, pelo setor industrial, para avaliar a aptidão de áreas para produção florestal e por conseguinte diagnosticar os efeitos climáticos sobre a produção, através de cenários de produção florestal. Segundo Landsberg et al. (2003), o 3-PG pode ser utilizado para avaliar o efeito de secas prolongadas sobre a produção, principalmente quando utilizam-se médias climáticas como base de dados para executar o modelo.

Nessa perspectiva, esse trabalho tem por objetivo avaliar a influência da variabilidade climática sobre a produção de *Eucalyptus* na região Norte de Minas Gerais utilizando o modelo 3-PG para estimativa de variáveis dendrométricas, de interesse no manejo florestal, por meio de dados climáticos em escala mensal e por médias históricas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Physiological Principles in Predicting Growth (3-PG)

O 3-PG pode ser dividido em duas partes, de forma que a primeira é relativa a produção de biomassa. A radiação líquida é calculada a partir da radiação solar incidente e relações empíricas padrão que consideram o albedo. A Produtividade Primária Bruta (PPB) é calculada a partir da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA) e o coeficiente de eficiência quântica do dossel (α_c), e o total de Produtividade Primária Líquida (PPL) obtido por parte da PPB (LANDSBERG e WARING, 1997).

A Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) é estimada a partir da radiação solar global, sendo que 1Mj de radiação solar é equivalente de 2,3 mol da RFA (SANDS e LANDSBERG, 2002). A fração da RFAA é obtida pela redução da RFA por meio de modificadores, como o fechamento dos estômatos, que está associado com o aumento do déficit de pressão de vapor; o balanço de água no solo é obtido pela relação da chuva mensal, estoque de água disponível no solo e a evapotranspiração calculada pela equação de Penman-Monteith com a condutância do dossel modificado pelo índice de área foliar da floresta e os modificadores estimados mensalmente; os efeitos da geada, calculada pelo número de dias com geada por mês; a temperatura que é uma função quadrática que regula a capacidade de sazonal de fotossíntese (LANDSBERG e WARING, 1997) (Figura 3).

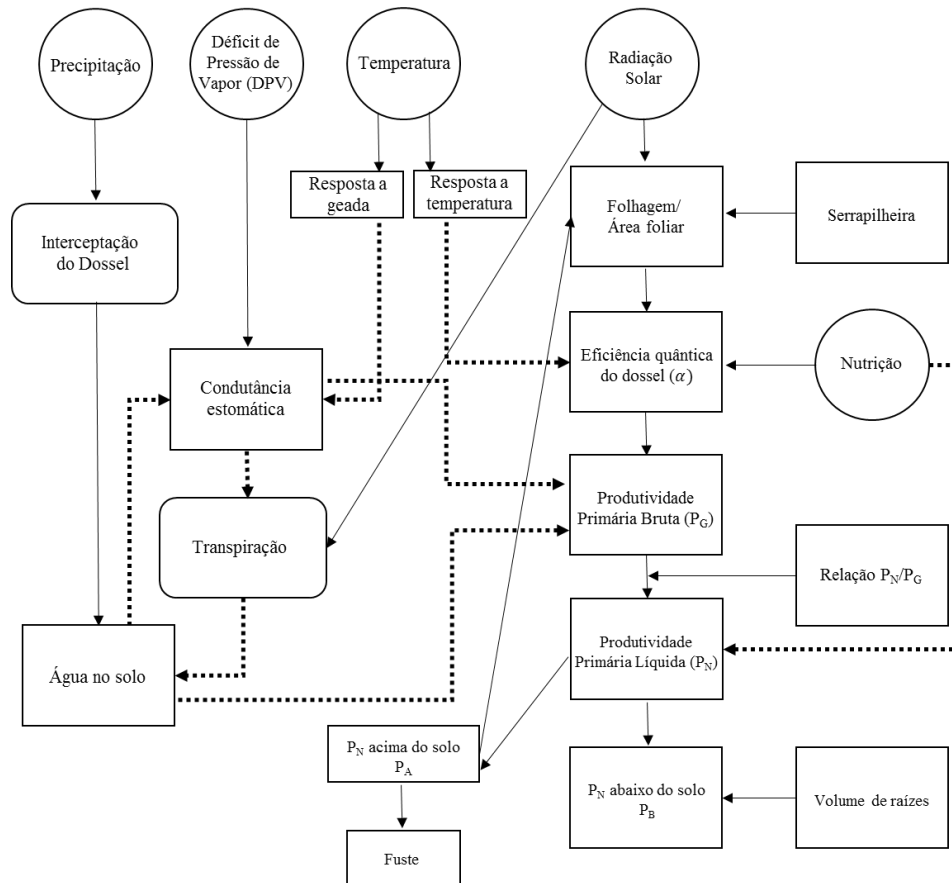


Figura 3. Fluxograma das relações entre fatores fisiológicos e ambientais no modelo 3-PG. (Fonte: adaptado de Tickle et al. (2001))

Quando o índice de área foliar (L^*) for menor que 3, a condutância do dossel (g_c) é calculada como a condutância estomática máxima (g_{cmax}).

O módulo de balanço de água no solo é calculado pela diferença entre a transpiração total mensal (mm), estimado por meio da equação de Penman-Monteith, utilizando o valor de condutância do dossel ($g_c - m \cdot s^{-1}$) e a chuva mensal (mm). O modelo inicia as estimativas a partir do valor de máximo conteúdo de água no solo (θ - mm) isso depende da profundidade das raízes e das características do solo. A umidade do solo para povoamentos florestais é estimada pela seguinte equação:

$$r_\theta = \frac{\text{conteúdo de água no solo atual} + \text{balanço de água}}{\text{disponibilidade de água no solo}} \quad (10)$$

Landsberg e Waring (1997) mencionam que o conteúdo de água no solo varia de 25 a 250 mm. Dessa forma o modificador de água no solo pode ser calculado da seguinte forma:

$$f_\theta = \frac{1}{1 + [(1 - r_\theta) / c_\theta]^{n_\theta}} \quad (11)$$

em que, c_θ e n_θ são variáveis relacionadas ao tipo de solo. Para solos arenosos, franco-arenosos, franco-argilosos e argilosos, os valores de c_θ são 0,7, 0,6, 0,5 e 0,4 e para n_θ são 9, 7, 5 e 3, respectivamente.

O modelo original calcula esse modificador somente na presença de geada, assumindo que não há atividade fotossintética quando a temperatura está abaixo de zero (LANDSBERG e WARING, 1997). Posteriormente, a partir de estudos, foi proposto a inserção do

modificador $f_T(T_a)$ que relaciona os efeitos da temperatura sobre o coeficiente de eficiência quântica (α_c) (SANDS e LANDSBERG, 2002):

$$f_T(T_a) = \frac{(T_a - T_n)}{(T_{opt} - T_n)} \times \frac{(T_x - T_a)^{(T_x - T_{opt}) / (T_{opt} - T_n)}}{(T_x - T_{opt})} \quad (12)$$

em que, T_a , T_n , T_x e T_{opt} são a temperatura média mensal, temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura ótima de crescimento, respectivamente.

Com o desenvolvimento do plantio, a quantidade de nutrientes presente no solo tende a reduzir. Isso ocorre pela alocação e imobilização desses nutrientes nas partes lenhosas da planta. As árvores adultas tem taxas máximas de atividade fotossintética semelhantes no início da manhã, com redução durante o dia que vai de 25 a 30% a mais que em árvores jovens. Segundo Landsberg e Waring (1997) essas diferenças estão relacionadas a sensibilidade dos estômatos ao déficit de pressão de vapor da atmosfera e também ao fluxo hidráulico que passa por trajetos longos e tortuosos. Com isso, há uma redução da atividade fotossintética que pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$f_{age} = \frac{1}{1 + (F_a / 0,95)^{n_{age}}} \quad (13)$$

em que, F_a é a relação entre a idade do plantio e a idade de declínio fisiológico; n_{age} controla a taxa de alteração da função.

Para estimar as variáveis dendrométricas, o modelo necessita de informações climáticas, como disponibilidade de água no solo na zona das raízes, número de indivíduos por hectare, fitomassa total alocado nas raízes, fuste e parte aérea e a razão de fertilidade do solo. Também são necessárias informações relativas aos parâmetros que compõe o modelo, que podem ser obtidos por meio de parametrização ou pela literatura. Nesse estudo, foi utilizada a parametrização proposta por Borges et al. (2012) para o cerrado em Minas Gerais, alterando alguns parâmetros, por apresentarem melhores resultados.

Por meio de parametrizações, foram obtidos novos parâmetros para os modelos alométricos relativos a Altura (m) e Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$), por meio de 2030 observações de dados de altura e volume, provenientes de inventário florestal contínuo (Equação 14 e 15).

$$H = 0,60 \cdot dap^{1,33} \quad (14)$$

$$V = 0,23 \cdot dap^{2,47} \quad (15)$$

Dessa forma, os parâmetros propostos por Borges et al. (2012) em relação a constante de relacionamento entre altura e DAP (aH), potência de relacionamento entre altura e DAP (nHB), constante de relacionamento entre volume e DAP (aV), potência de relacionamento entre volume e DAP (nVB) foram alterados para 0,60, 1,33, 0,23 e 2,47, respectivamente, por apresentarem melhores estimativas.

2.2 Entrada dos Dados de Climáticos

Para avaliar a precisão do modelo 3-PG em estimar variáveis dendrométricas foram utilizados dados climáticos em escala mensal e escala histórica. O banco de dados em escala mensal foi o mesmo apresentado no Capítulo 1.

O banco de dados climáticos de médias históricas é composto pela radiação solar média anual obtida do modelo GL1.2 que estima a radiação solar por meio de imagens do satélite GOES que podem ser obtidas no site <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao>. Esse modelo trabalha com informações das bandas do visível (VIS) e infravermelho (IV),

resultando em médias diárias de radiação solar sobre células de 0,4° x 0,4° e médias subsequentes em 5 dias (pêntadas) no período de 26 de dezembro de 1995 a 24 de dezembro de 2006, resultando em 803 pêntadas. Os dados foram processados no programa OpenGrADS, obtendo-se a média mensal de radiação solar global (R_s – MJ.m⁻²) no período de 10 anos; a chuva, t_n e t_x foi obtido pelas normais climatológicas do Brasil disponibilizado pelo INMET. Como a área de estudo, Bocaiúva, não possui normais climatológicas, foram utilizados dados do município mais próximo, Curvelo (MG) (Tabela 5).

Tabela 5. Médias mensais de t_x (°C), t_n (°C) e P (mm) do ar obtidos das Normais Climatológicas do INMET e R_s (MJ.m-2) obtidos das séries temporais de radiação solar para América do Sul (modelo GL1.2).

| Mês | t_x (°C) | t_n (°C) | Chuva (mm) | Radiação Solar (MJ.m ⁻²) |
|-----------|------------|------------|------------|--------------------------------------|
| Janeiro | 30,70 | 19,40 | 166,90 | 21,60 |
| Fevereiro | 31,60 | 19,60 | 117,60 | 20,63 |
| Março | 31,40 | 18,90 | 109,00 | 19,53 |
| Abril | 30,60 | 17,10 | 54,20 | 17,83 |
| Mai | 29,00 | 14,60 | 22,60 | 15,45 |
| Junho | 28,00 | 11,90 | 3,90 | 14,93 |
| Julho | 27,70 | 11,50 | 10,60 | 16,07 |
| Agosto | 29,70 | 13,00 | 8,70 | 18,80 |
| Setembro | 30,90 | 15,60 | 21,90 | 20,15 |
| Outubro | 31,00 | 18,30 | 124,20 | 19,51 |
| Novembro | 30,40 | 19,10 | 180,40 | 17,64 |
| Dezembro | 30,00 | 19,30 | 221,60 | 19,01 |

2.3 Validação da Modelagem

O 3-PG foi configurado para gerar estimativas mensais no período de junho de 2005 a dezembro de 2011. Para avaliar a acurácia das estimativas do modelo 3-PG alimentado com médias mensais e normais climatológicas, foram utilizadas 335 medições do inventário florestal realizadas em 10 talhões e sobreposto aos valores médios estimados pelo 3-PG para avaliar o comportamento das variáveis Diâmetro Médio a Altura do Peito (DAP - cm), Altura (m), Volume (m³) e Incremento Médio Anual (IMA – m³.ha⁻¹.ano⁻¹). Posteriormente, as medições foram agrupadas nas diferentes idades do povoamento de forma que coincidissem com as idades de saída do modelo, totalizando 25 observações médias para aplicar os seguintes métodos estatísticos: correlação linear (Pearson) (r), coeficiente de determinação ajustado ($R_{aj.}^2$), erro padrão da estimativa (S_{yx}), eficiência do modelo (EF) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). As formulações que serão usadas seguem abaixo:

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (16)$$

$$R_{aj.}^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{res}}{SQ_t} \right) \cdot \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (17)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n-p-1}} \quad \therefore S_{yx} \% = \frac{S_{yx}}{O} * 100 \quad (18)$$

$$EF=1-\frac{\sum(O_i-P_i)^2}{\sum(O_i-\bar{O})^2} \quad (19)$$

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (20)$$

em que, P_i é o i ésimo valor estimado pelo modelo 3-PG, O_i é o i ésimo valor observado, \bar{O} é a média aritmética da variável observada, SQ_{res} é a soma dos quadrados dos resíduos, SQ_t é a soma total dos quadrados, n é o número de dados observados e p é o número de coeficientes do modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4, a representação gráfica dos dados climáticos demonstram períodos com pouca chuva, como de maio a setembro em que a chuva média estimada está abaixo de 25 mm, considerando as normais climatológicas. O período chuvoso compreende entre outubro e março, sendo dezembro o mês com maior chuva média (Figura 4). As temperaturas máximas e mínimas tem oscilação semelhante, onde os menores valores da t_x são 28,00 e 27,70 e t_n de 11,90 e 11, nos meses de junho e julho, respectivamente, compreendendo o inverno. A R_s apresenta picos variando de 17,64 a 21,60 entre os meses de setembro e janeiro (Figura 5).

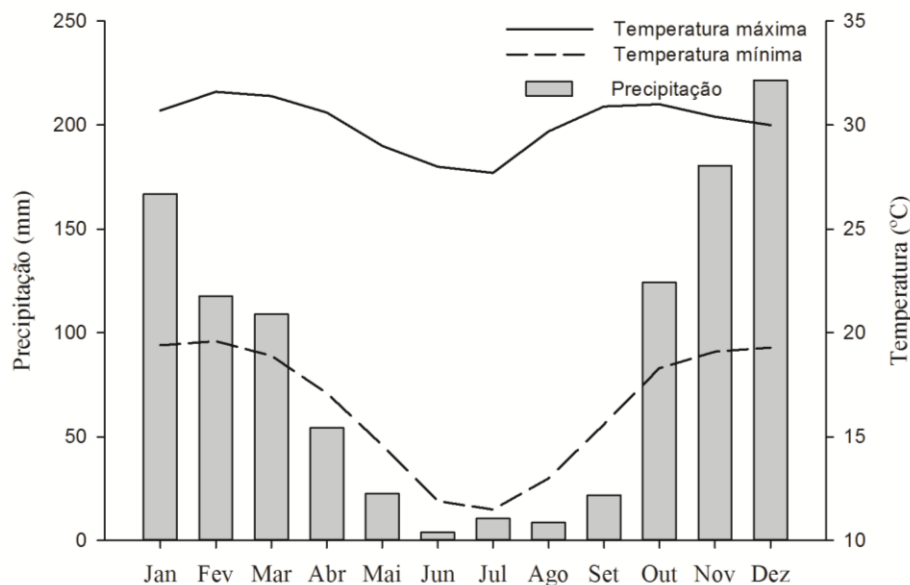


Figura 4. Distribuição mensal das variáveis precipitação (mm), temperatura máxima (t_x , °C) e temperatura mínima do ar (t_n , °C) para o município de Curvelo (MG).

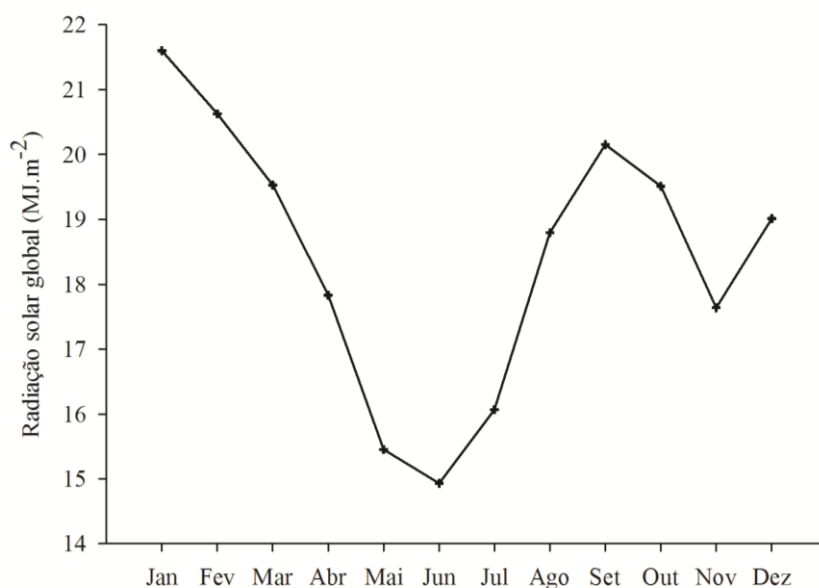


Figura 5. Distribuição mensal da radiação solar global (R_s – MJ.m⁻²) para o município de Curvelo (MG).

A modelagem do 3-PG utilizando médias mensais e normais climatológicas apresentam comportamento similar nos primeiros 4 anos do povoamento (Figura 6). Segundo Almeida et al. (2004), o efeito de secas prolongadas pode ser captada pelo modelo quando utiliza-se médias mensais atuais e compara-se com as estimativas realizados com médias históricas. Pelos resultados, obtidos por meio de médias mensais, observa-se que não houve perda na produção no período de 2004 a 2011 para essa região, caso o regime climático fosse semelhante as normais climatológicas, sendo que, após o quarto ano, as condições ambientais atuais favoreceram ganho na produção (Figura 6).

Percebe-se que há tendência de subestimativa das variáveis ao longo do tempo quando utiliza-se normais climatológicas, já que a linha de tendência entre os dados observados e estimados ficam acima da linha 1:1 (Figura 6-b,d,f,h). Após quarto ano, o modelo tende a subestimar a H e DAP e por conseguinte, a subestimativa acentua-se nas variáveis Volume e IMA, já que esses são dependentes da H e do DAP (Figura 6-a,c,e,g). Os efeitos da chuva podem variar de acordo com a idade do plantio e também com os períodos de seca, demonstrando que médias históricas são pouco eficientes para captar essas variações no crescimento (ALMEIDA et al., 2004a).

Pela análise estatística, observa-se que o coeficiente de Pearson apresenta correlação linear forte positiva para o DAP, H e V com coeficientes acima de 0,90 e correlação moderada positiva para IMA, acima de 0,70 (Tabela 6). O coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) demonstraram bons resultados, não apresentando variações consideráveis quando comparado ao $R^2_{aj.}$ obtido a partir dos dados climáticos mensais, corroborando com a análise realizada por Borges et al. (2012), onde foram utilizadas médias históricas para realizar as estimativas. O $R^2_{aj.}$ relativo ao IMA – NC ficou abaixo ao encontrado por Almeida et al. (2004a), porém o pico da IMA-NC ficou próximo aos 6 anos indo ao encontro dos valores encontrados por Almeida et al. (2004a) para áreas ao sul da Bahia e ao Norte do Espírito Santo (Tabela 6). Percebe-se que os valores de S_{xy} , $S_{xy}(\%)$ e o RMSE dobraram de valor quando utilizado as normais climatológicas, demonstrando que a diferença entre os dados observados e estimados aumentou. Isso pode ser observado pela EF teve redução considerável, sendo que a EF do volume reduziu de 0,82 para 0,22 e IMA foi de -0,53,

indicando baixa eficiência do modelo para estimar o IMA com normais climatológicas (Tabela 6).

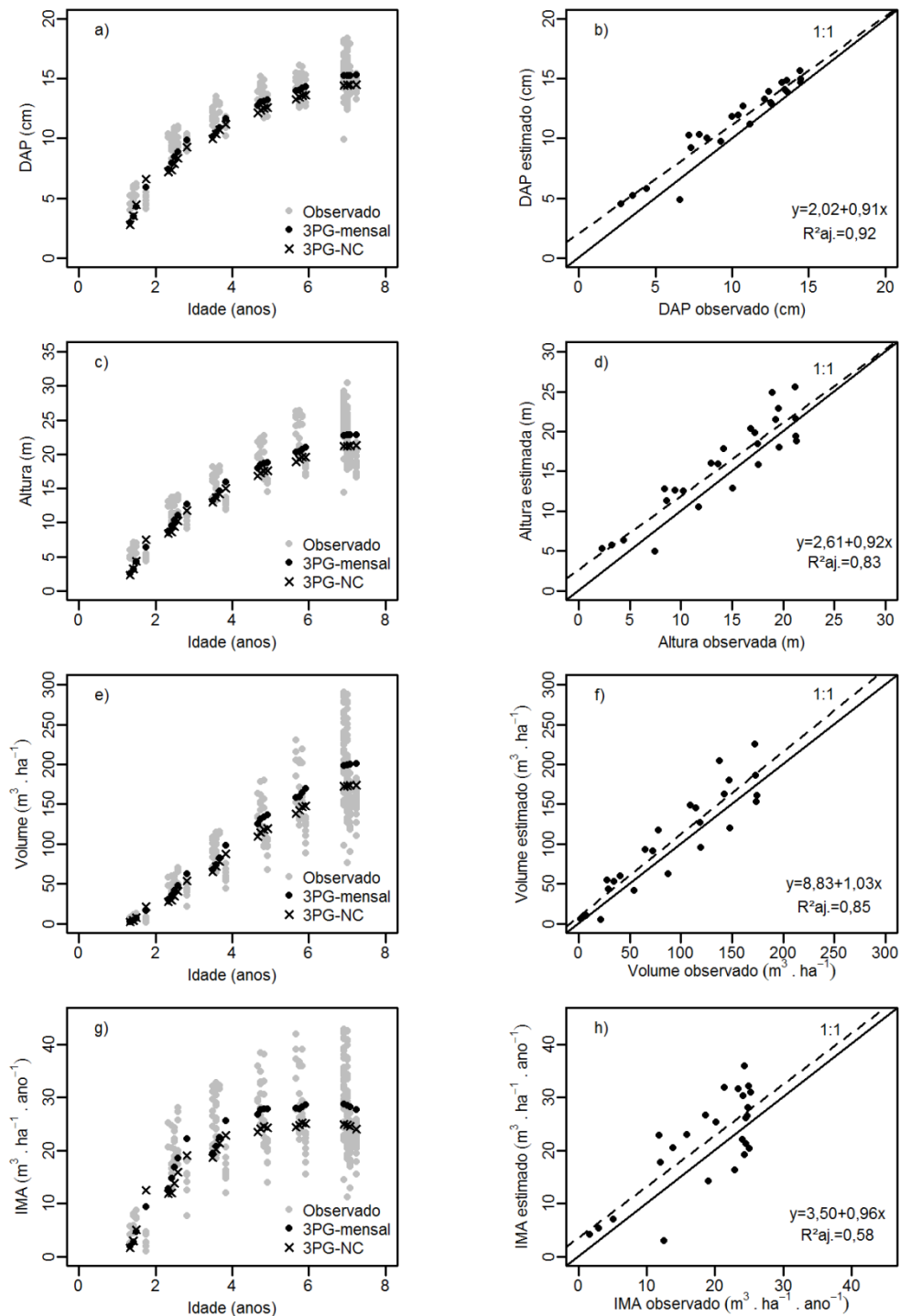


Figura 6. Distribuição das variáveis DAP (a), Altura (c), Volume (e) e IMA (g) em relação as idades do plantio (os círculos pretos correspondem as estimativas por meio de dados climáticos mensais (mensal), os xis pretos correspondem a estimativas por meio de normais climatológicas (NC) e os círculos cinzas são dados observados). Relação entre dados observados e estimados pelo modelo 3-PG, utilizando-se normais climatológicas, para DAP (b), Altura (d), Volume (f) e IMA (h) para o município de Bocaiúva (MG).

Tabela 6. Resumo das análises estatísticas das variáveis DAP, H, V e IMA estimadas por meio de médias mensais (mensal) e normais climatológicas (NC) para região de Bocaiúva (MG).

| Variáveis | N | r | R _{aj} | S _{yx} | S _{yx} (%) | EF | RMSE |
|-----------------------------------|----|------|-----------------|-----------------|---------------------|-------|-------|
| DAP (cm) – mensal | 25 | 0,96 | 0,92 | 1,51 | 13,09 | 0,81 | 1,45 |
| DAP (cm) – NC | 25 | 0,95 | 0,91 | 2,57 | 22,29 | 0,45 | 2,46 |
| H (m) – mensal | 25 | 0,91 | 0,83 | 3,00 | 19,17 | 0,76 | 2,88 |
| H (m) – NC | 25 | 0,91 | 0,82 | 4,25 | 27,14 | 0,52 | 4,08 |
| V (m ³ /ha) – mensal | 25 | 0,92 | 0,85 | 28,54 | 27,92 | 0,82 | 27,37 |
| V (m ³ /ha) – NC | 25 | 0,92 | 0,83 | 59,47 | 58,18 | 0,22 | 57,04 |
| IMA (m ³ /ha) – mensal | 25 | 0,77 | 0,58 | 6,64 | 30,66 | 0,50 | 6,37 |
| IMA (m ³ /ha) – NC | 25 | 0,73 | 0,51 | 11,66 | 53,78 | -0,53 | 11,18 |

Segundo Almeida et al. (2004a), a média histórica pode ser utilizada para avaliar o potencial produtivo de novas áreas, para implantação de povoamento florestais. Porém, pode incorrer em estimativas pouco precisas para tomada de decisão, aplicando-se de forma prévia para caracterização da área e avaliação da aptidão do local para a cultura de interesse, devendo-se considerar que variações nas variáveis climáticas que afetam diretamente a produção florestal. Esse mesmo autor, demonstra que informações precisas de chuva e Déficit de Pressão de Vapor (DPV) tem grande influência na precisão das estimativas. Isso foi constatado pela avaliação de duas áreas, com distância de aproximadamente 50 km, que apresentaram diferença de 154 m³.ha⁻¹ aos 7 anos.

A temperatura média ficou abaixo da temperatura ótima (< 25° C) de abril a setembro pelas normais climatológicas, o que pode reduzir o desempenho fisiológico das plantas, já que o modelo considera a temperatura do ar uma das variáveis que regulam a atividade fotossintética por meio do modulador fT (Tabela 1). Resultados semelhantes foram encontrados por Coops e Waring (2010) com *Pinus contorta* Dougl. no Noroeste da América do Norte. Zhao et al. (2009) demonstrou, por meio de cenários de produção, que a variação da temperatura ótima (T_{opt}) de crescimento no cultivo de *Chinese fir* resulta em diferentes níveis de produção florestal. Segundo esse autor, o aumento progressivo da T_{opt} de 0-2°C no modelo 3-PG, resultou em estimativas de produção elevado, reduzindo o período de rotação do plantio. Porém, aumentando a T_{opt} em mais de 2°C pode resultar em perdas na produção. Como a região Norte de Minas Gerais tem por característica altas temperaturas do ar durante o ano, isso pode favorecer a produção, desde que as demais variáveis ambientais, que regem o desenvolvimento dos indivíduos, estejam adequadas.

O modulador de disponibilidade de água no solo (fAS) tem variação acentuada entre os meses, sendo que a partir de março a restrição sobre desenvolvimento dos indivíduos aumenta gradativamente (Figura 7). Nos meses de julho, agosto e setembro o modulador apresenta menor valor, ou seja, máxima restrição sobre a atividade fotossintética, mas com menor desvio padrão quando comparado abril, maio, outubro e novembro. Por outro lado, o modulador fDPV apresenta baixa variação, apresentando valores próximos a 0,7 e com desvio padrão próximo a zero (Figura 7). No estudo realizado por Almeida et al. (2004a), variações induzidas do DPV influenciou na produção em volume aos 7 anos, sendo que em um dos locais a perda seria de aproximadamente 16,3%.

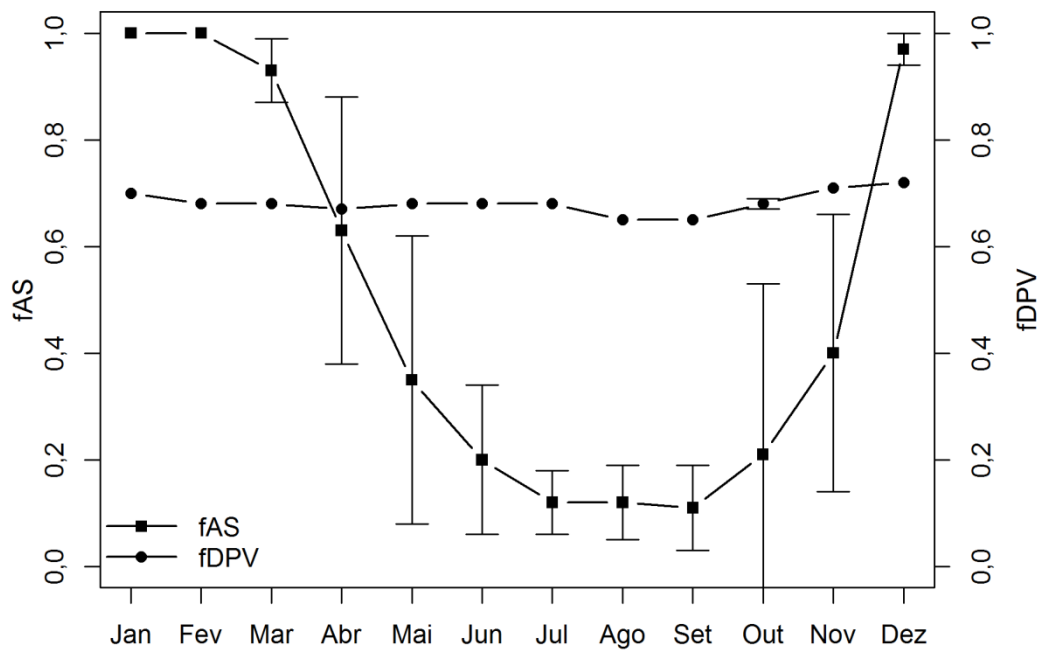


Figura 7. Variação dos moduladores de disponibilidade de água no solo (fAS) e modulador de déficit de pressão de vapor (fDPV) de janeiro a dezembro para região de Bocaiúva (MG).

A Figura 8 apresenta o comportamento dos moduladores fAS e fDPV em relação as idades do plantio. Observa-se que o modulador fDPV permaneceu constante, entre o segundo e o sétimo ano do plantio, corroborando com o apresentado na Figura 8. Como os moduladores ambientais, no 3-PG, variam de 0 a 1, sendo que 0 é alta restrição e 1 é quando não há impedimento desse modulador sobre o crescimento do plantio, observa-se que o fDPV atuou com aproximadamente 30% de restrição sobre o desenvolvimento do plantio. Já o modulador fAS apresentou alta restrição sobre o crescimento do plantio, principalmente entre o segundo e o quinto ano. Após o quinto ano, a restrição desse modular foi reduzida chegando a aproximadamente 0,60. Segundo Coops e Waring (2010) o modulador fAS apresenta limitação significativa sobre a atividade fotossintética em plantios de Pinus. Por meio do comportamento desses moduladores, percebe-se que a ação desses pode influenciar no desenvolvimento do plantio nos anos subsequentes a esses eventos, como pode ser observado a partir dos 4,5 anos, aproximadamente (Figura 6). De acordo com Waring et al. (2014) as configurações atuais do 3-PG associadas a dados climáticos e de solo coletados em campo, ou seja, com alta precisão, permitem prever o crescimento do dossel e a dinâmica interanual do plantio com erros próximos aos das medições de campo.

Além disso, Waring et al. 2014 observa que a tendência de aumento da temperatura no oeste da América do Norte ocasiona a redução do número de dias de geada, podendo está relacionada a mortalidade de indivíduos de pinus em floresta na Columbia Britânica. Por outro lado, Coops e Waring (2010) mencionam que a redução do período de inverno, pode favorecer o período de crescimento para espécies adaptadas como Pinus e Douglas-fir na região noroeste da Columbia Britânica. Dessa forma, a região tropical pode ter mortalidade de indivíduos florestais pelo aumento demasiado da temperatura em locais com estiagens prolongadas, ocasionando em estresse hídrico como sugerido por Coops e Waring (2010) ou até aumento da produção quando não houver estresse hídrico, favorecendo a atividade fotossintética.

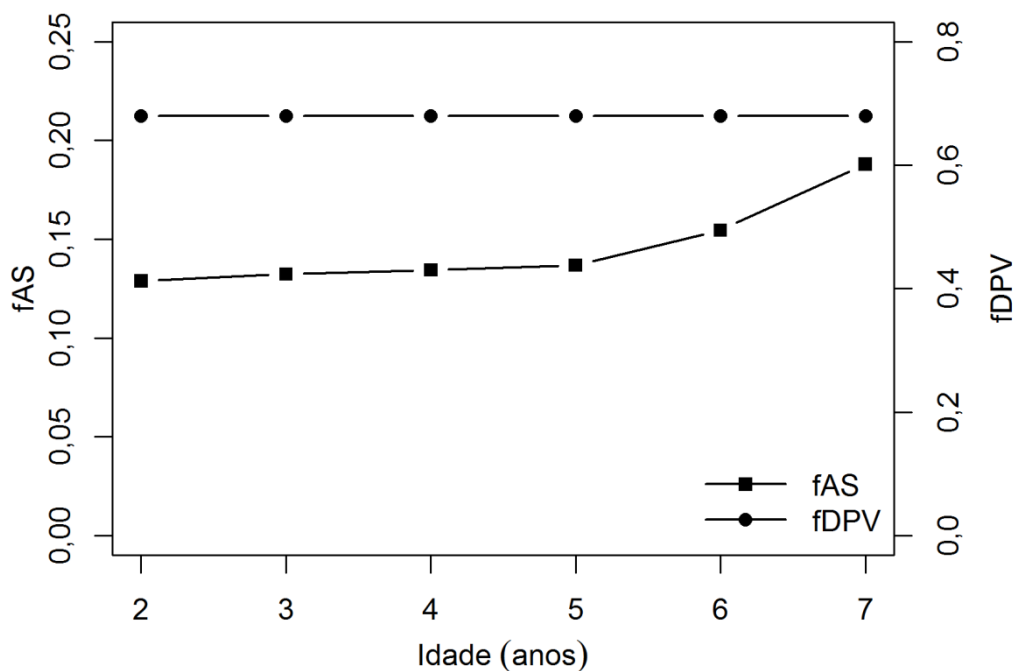


Figura 8. Variação dos moduladores de disponibilidade de água no solo (fAS) e modulador de déficit de pressão de vapor (fVDP) em relação às idades do plantio para região de Bocaiúva (MG) no período de 2004 a 2011.

4. CONCLUSÃO

Para uma análise exploratória do potencial produtivo de novas áreas para produção florestal, o uso do 3-PG alimentado com normais climatológicas mostra-se adequado. Devendo-se atentar para possíveis subestimativas ou superestimativas de algumas variáveis dendrométricas, em função de possíveis variações no regime de chuvas ou de temperatura do ar.

As normais climatológicas podem ser utilizadas para avaliar o potencial produtivo de novas áreas ou avaliar os efeitos da variabilidade climática sobre a produção. Além disso, as normais climatológicas podem demonstrar como cada modulador ambiental age sobre o desenvolvimento do plantio para região de interesse, indicando que intervenções silviculturais podem ser interessantes para reduzir possíveis perdas.

As estimativas do modelo são reguladas por moduladores ambientais, sendo que nesse estudo, o fAS apresentou forte restrição sobre o crescimento quando comparado ao fDPV. Isso pode estar relacionado às altas temperaturas da região, a distribuição irregular da chuva durante o ano e a textura do solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF, Anuário Estatístico da. Ano base 2012. Brasília, DF, 2013.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J.; AMBROGI, M. S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S. M.; BERTOLUCCI, F. L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 2-3, 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.
- ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T. R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. 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.
- 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. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.
- BATTAGLIA, M.; CHERRY, M. L.; BEADLE, C. L.; SANDS, P. J.; HINGSTON, A. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. **Tree Physiology**, v. 18, n. 8-9, p. 521-528, 1998.
- BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H. M.; BARROS, N. F.; DIAS, S. C. M. 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.
- BUGG, A. L.; LANDSBERG, J.; LAUGHLIN, G.; TICKLE, P.; FRAKES, I. Application of three modelling approaches to simulating tree growth in central NSW, Australia. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 3, p. 310-319, 2006.
- COOPS, N. C.; WARING, R. H. A process-based approach to estimate lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) distribution in the Pacific Northwest under climate change. **Climatic Change**, v. 105, n. 1, p. 313-328, 2011.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 2009-228, 1997.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H.; COOPS, N. C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v. 172, n. 2-3, p. 199-214, 2003.
- LU, Y.; COOPS, N. C.; WANG, T.; WANG, G. A Process-Based Approach to Estimate Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Distribution and Productivity in Southern China under Climate Change. **Forests**, v. 6, n.3, p. 360-379, 2015.

TICKLE, P. K.; COOPS, N. C.; HAFNER, S. D.; TEAM, T. B. S. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. **Forest Ecology and Management**, v. 152, n. 1-3, p. 275- 291, 2001.

WARING, R. H.; COOPS, N. C.; MATHYS, A.; HILKER, T.; LATTA, G. Process-Based Modeling to Assess the Effects of Recent Climatic Variation on Site Productivity and Forest Function across Western North America. **Forests**, v. 5, n. 3, p. 518-534, 2014.

ZHAO, M.; XIANG, W.; PENG, C.; TIAN, D. 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.

CAPÍTULO III

Modelagem do crescimento e produção de plantios de *Eucalyptus* utilizando-se modelo baseado em processos e empíricos no Norte de Minas Gerais

Modeling of growth and yield of *Eucalyptus* plantations using process-based model and empirical in the North of Minas Gerais

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo aplicar o modelo 3-PG para classificar a capacidade produtiva, tendo como índice de sítio a fertilidade do solo, e também estimar o crescimento e produção. Para classificação dos sítios de produção foi utilizado o modelo de Schumacher na forma linearizada, pelo método da curva-guia. A partir dessas informações pôde-se estimar o crescimento e produção do povoamento utilizando o modelo de Clutter. Essas informações de produção obtidas por modelagem empírica foi comparado com a modelagem ecofisiológica, sendo que para simular os diferentes sítios de produção, o parâmetro FR (Fertility rating) foi variado no modelo 3-PG. A classificação dos sítios de produção apresentou bons resultados com R^2 de 0,80, S_{xy} de 2,59 e CV% de 13,97. Para estimar a produção futura foi utilizado o modelo de Clutter que apresentou R^2 de 0,89 e 0,99 para estimativa do volume e área basal, respectivamente. Variações nos valores do parâmetro FR demonstraram que este tem boa relação com a estimativa da produção volumétrica em diferentes sítios, porém não representou os sítios de maior produção. O modelo 3-PG, por ser um modelo pontual, realiza estimativas médias, com tendência a estimar os sítios de baixa produção. O modelo ecofisiológico mostrou que pode ser usado para estimar sítios de produção, sendo necessário outras avaliações para identificar parâmetros de fácil obtenção e com boa relação com a produção. Dessa forma, não pode-se dispensar o uso de modelos tradicionais para aumentar a confiabilidade na tomada de decisão, sendo necessário estudos mais detalhados de parâmetros fisiológicos e ambientais para melhorar a acurácia das estimativas.

Palavras-chave: prognose; produção florestal; modelagem empírica; modelagem processual.

ABSTRACT

This work aims to apply the 3-PG model to classify the production capacity, with the site index soil fertility, and also estimate the growth and production. For classification of production sites was used Schumacher model in linear form, the guide curve method. From this information it was possible to estimate the growth and production of settlement using the model of Clutter. These production information obtained by empirical modeling was compared with ecophysiological modeling, and to simulate different production sites, the FR parameter (Fertility rating) was varied in model 3-PG. The classification of production sites had good results with R^2 0.80, S_{xy} 2.59% and CV of 13.97. To estimate future production model was used Clutter who presented R^2 0.89 and 0.99 to estimate the volume and basal area, respectively. Variations in FR parameter values demonstrated that this good relationship with an estimated volume production in different places, but did not represent the largest production sites. The model 3-PG, as a timely model performs average estimates, with a tendency to estimate the low production sites. The ecophysiological model showed that can be

used to estimate production sites, requiring further evaluation to identify parameters easily obtainable and with good relationship with production. Thus, one can not do without the use of traditional models to increase reliability in decision making, requiring more detailed studies of physiological and environmental parameters to improve the accuracy of estimates.

Keywords: prognosis; forestry production; empiric model; process model.

1. INTRODUÇÃO

Modelos de crescimento e produção são ferramentas importantes para o planejamento e manejo florestal. Segundo Campos e Leite (2013) os modelos de crescimento e produção podem ser classificados em empíricos constituído por polinômios que estabelecem relações funcionais de maneira empírica e mecânicos (baseados em processos) que se embasam em relações funcionais ou processos de crescimento, o que pode auxiliar no entendimento da dinâmica de crescimento da floresta, mas sendo pouco eficientes na predição da produção.

O gerenciamento de povoamentos florestais necessitam de ferramentas que projetem taxas de crescimento e a produtividade em diferentes locais. Tradicionalmente, utilizam-se modelos de crescimento e produção baseado em mensurações florestais, que descrevem estatisticamente os padrões de crescimento das árvores, por meio de medições contínuas de parcelas florestais (TICKLE et al., 2001). Essa modelagem pode ser expressa por meio de gráficos ou tabelas (TICKLE et al., 2001; CAMPOS e LEITE, 2013).

Para estimar o crescimento e produção de povoamentos, são necessárias informações quanto a capacidade de produção dos diferentes locais de produção, que pode ser indicado por índice de qualidade. A qualidade do local ou a capacidade de produção pode ser definido como o potencial para produção de madeira ou outro produto florestal para determinada espécie (CAMPOS E LEITE, 2013). Essa qualidade pode ser expressa de modo quantitativo, por meio de índice de local, que representa a altura dominante média do povoamento em uma idade específica (idade-índice) (CAMPOS e LEITE, 2013). Informações edáficas podem ser utilizadas como indicadores de qualidade de sítio, que segundo Campos e Leite (2013), podem ser mais precisas na classificação da capacidade produtiva, quando utilizada para elaborar as curvas de índices de local.

A estimativa da produção de determinada local, por meio de índices de local torna-se uma técnica prática e precisa, pois os fatores que regem o crescimento do povoamento florestal são refletidos no crescimento em altura e, por conseguinte, no volume. Porém, essa técnica torna-se inviável em locais sem árvores da espécie de interesse, limitando sua flexibilidade de aplicação (PÉREZ-CRUZADO et al. 2011; CAMPOS e LEITE, 2013). Além disso, as práticas de manejo adotadas e as variações climáticas podem influenciar na produção de determinado local, o que inviabiliza a aplicação de modelos empíricos na classificação do índice de sítio e, conseqüentemente, nas estimativas futuras do volume. Esta lacuna pode ser solucionada com o uso de modelo baseados em processos, por estes utilizarem variáveis climáticas e ambientais no processamento (PÉREZ-CRUZADO et al., 2011).

Nos últimos anos, empresas florestais tem utilizado modelos híbridos e/ou baseados em processos para avaliar a produção de florestas homogêneas ou áreas potenciais para produção florestal, através do entendimento de variáveis climáticas e ambientais que influenciam no crescimento, tornando-se uma ferramenta importante para tomada de decisão (PINKARD e BATTAGLIA, 2001; DYE et al., 2004; PÉREZ-CRUZADO et a., 2011). Intervenções realizadas na floresta, como poda e desbaste, podem ter melhor aproveitamento quando observado a melhor época para realizar estas atividades de manejo, sendo que alguns modelos baseados em processos podem indicar esse período por meio dos processos que regem o crescimento, ao contrário dos modelos empíricos (PINKARD e BATTAGLIA, 2001).

Esse trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência do modelo ecofisiológico 3-PG em prever a capacidade produtiva de áreas para plantios de eucaliptos. Para tanto, será analisado as estimativas volumétricas do modelo frente a variação de parâmetros relativos a fertilidade do solo, como variável indicadora da qualidade do sítio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Bocaíuva (MG) em plantios comerciais de *Eucalyptus sp.*. A área é composta por dez talhões implantados no ano de 2004, com espaçamento de 3 x 3 metros, compreendendo uma área total de aproximadamente 313 ha. O clima da região, segundo Köppen, é o “Aw” tropical de savana, com inverno seco e verão chuvoso, com temperatura média anual de 24,1°C e chuva média anual entre 1.000 mm a 1.100 mm (DURÃES et al., 2014).

2.2 Modelagem Tradicional

A modelagem tradicional foi realizada, por meio da determinação do índice de sítio, utilizando o método da curva-guia, e a determinação do volume foi realizada por meio do modelo de Clutter.

Para determinar os índices de sítio foram utilizados dados de inventário florestal de 113 parcelas permanentes e temporárias, totalizando 2030 observações. O índice de sítio foi determinado, a partir do modelo de Schumacher, na forma linearizada:

$$\text{Ln(Hd)} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I}\right) + \varepsilon \quad (21)$$

em que Hd: altura dominante; β_0 e β_1 : são os coeficientes; I: idade índice (meses).

Para estimativa do crescimento e produção do povoamento foi empregado o modelo de Clutter, em sua forma simplificada, aplicado ao banco de dados composto por 1252 observações, resultante das 2030 observações após organização das idades atuais e futuras:

$$\text{Ln}(V_2) = \beta_0 + \beta_1 I_2^1 + \beta_2 S_1 + \beta_3 \text{Ln}B_2 + \text{Ln}\varepsilon \quad (22)$$

$$\text{Ln}(B_2) = \text{Ln}B_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S_1 + \text{Ln}\varepsilon \quad (23)$$

em que I1: idade atual (meses); I2: idade futura (meses); V2: volume na idade I2 (m³.ha-1); S1: índice de local na idade I1 (metros); B1: área basal atual (m².ha-1); B2: área basal futura (m².ha-1); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_3 : parâmetros do modelo que projeta o volume; α_0 e α_1 : parâmetros do modelo que projeta a área basal; ε : erro aleatório.

2.3 Modelagem Baseada em Processos

O 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*), desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), baseia-se na radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) pelo dossel. A RFAA é reduzida por meio de moduladores, como o fechamento dos estômatos, que está associado com o aumento do déficit de pressão de vapor (D); o balanço de água no solo é obtido pela relação da precipitação mensal, estoque de água disponível no solo e a evapotranspiração calculada pela equação de Penman-Monteith com a condutância do dossel modificado pelo índice de área foliar da floresta (L) e os modificadores estimados mensalmente (D); os efeitos da geada, calculada pelo número de dias com geada por mês; a temperatura que é uma função quadrática que regula a capacidade de sazonal de fotossíntese (LANDSBERG e WARING, 1997). O modelo necessita de parâmetros fisiológicos

parametrizados para espécies em florestas homogêneas, sendo que nesse estudo foi utilizado a parametrização proposta por Borges et al. (2012) com algumas modificações.

Para executar o modelo foram utilizados dados de temperatura mínima (T_n , °C) e máxima do ar (T_x , °C), precipitação (mm) e informações sobre o solo, como textura, disponibilidade máxima e mínima de água no solo e fertilidade do solo.

2.3.1 Razão de fertilidade

A razão de fertilidade ou fertility rating (FR) do solo é um parâmetro requerido pelo modelo 3-PG, variando de 0-1, sendo 0 representa um solo com máxima restrição de nutrientes e 1 indica um solo com alta fertilidade. Esse parâmetro é de difícil mensuração, pois deve representar a fertilidade na região de exploração das raízes (DYE et al., 2004). Landsberg et al. 2003 menciona que há baixas relações entre as medidas de fertilidade do solo e o crescimento das árvores, o que dificulta a estimativa dessa variável. O FR pode ser obtido de modo empírico fazendo um ranking entre os solos de maior e menor qualidade (ALMDEIDA et al., 2010). Esse parâmetro compõe um dos modulares de produção do 3-PG. Segundo Sands e Landsberg (2003), o modulador f_N , pode ser obtido pela seguinte equação:

$$f_N(FR) = f_{N0} + (1 - f_{N0})FR \quad (24)$$

em que f_{N0} é o valor de f_N quando $FR=0$.

Segundo Almeida et al. (2010) fatores como água disponível, textura, oxigênio, manejo e topografia são variáveis que devem ser consideradas para obter o parâmetro FR. Dessa forma, Almeida et al. (2010) sugere que o FR pode ser estimado através da equação:

$$FR = 0,4LF + 0,2LA + 0,1LO + 0,2LM + 0,1LT \quad (25)$$

em que LF: limitação da fertilidade; LA: limitação de água; LO: limitação de oxigênio; LM: limitação de manejo; LT: limitação topográfica.

Nesse estudo, o modelo 3-PG foi configurado para realizar estimativas anuais das variáveis volume e IMA. Para simular os diferentes sítios de produção, foi considerado variações no parâmetro FR (Fertility Ratio) ao longo dos anos, de modo sistemático e sem medições em campo, mantendo-se os demais parâmetros inalterados. Por padrão, o modelo considera que a fertilidade do solo diminui ao longo do tempo, o que pode está relacionado a utilização dos nutrientes para formação de biomassa alocada nas folhas, galhos, fuste e raiz.

2.4 Dados Climáticos de Entrada do Modelo 3-PG

O 3-PG requer parâmetros relativos a fisiologia da espécie e também informações climáticas do local. O banco de dados em escala anual foi construído utilizando-se a partir de informações disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Desse banco de dados foi extraídos informações relativas a precipitação (mm), temperatura mínima (T_n , °C) e máxima do ar (T_x , °C). Como a área de estudo, Bocaíuva, não possui normais climatológicas, foram utilizados dados do município mais próximo, Curvelo (MG).

O BDMEP não fornece informações sobre radiação solar global (R_s), então optou-se por utilizar informações do modelo GL1.2 que estima a radiação solar por meio de imagens do satélite GOES. Esse modelo trabalha com informações das bandas do (visível) VIS e (infravermelho) IV, resultando em médias diárias de radiação solar sobre células de $0,4^\circ \times 0,4^\circ$ e médias subsequentes em 5 dias (pêntadas) no período de 26 de dezembro de 1995 a 24 de dezembro de 2006, resultando em 803 pêntadas. Os dados foram processados no programa

OpenGrADS, obtendo-se a média mensal de radiação solar global ($R_s - MJ.m^{-2}$) no período de 10 anos a partir da latitude e longitude do local (Tabela 1).

Tabela 7. Médias mensais de temperatura máxima do ar (T_x , °C), temperatura mínima do ar (T_n , °C) e precipitação (mm) obtidos das Normais Climatológicas do INMET e radiação solar global (R_s , $MJ.m^{-2}$) obtidos das séries temporais de radiação solar para América do Sul (modelo GL1.2).

| Mês | T_x (°C) | T_n (°C) | Precipitação (mm) | R_s ($MJ.m^{-2}$) |
|-----------|------------|------------|-------------------|-----------------------|
| Janeiro | 30,70 | 19,40 | 166,90 | 21,60 |
| Fevereiro | 31,60 | 19,60 | 117,60 | 20,63 |
| Março | 31,40 | 18,90 | 109,00 | 19,53 |
| Abril | 30,60 | 17,10 | 54,20 | 17,83 |
| Maio | 29,00 | 14,60 | 22,60 | 15,45 |
| Junho | 28,00 | 11,90 | 3,90 | 14,93 |
| Julho | 27,70 | 11,50 | 10,60 | 16,07 |
| Agosto | 29,70 | 13,00 | 8,70 | 18,80 |
| Setembro | 30,90 | 15,60 | 21,90 | 20,15 |
| Outubro | 31,00 | 18,30 | 124,20 | 19,51 |
| Novembro | 30,40 | 19,10 | 180,40 | 17,64 |
| Dezembro | 30,00 | 19,30 | 221,60 | 19,01 |

2.5 Validação da Modelagem

O 3-PG foi configurado para gerar estimativas anuais no período de junho de 2005 a dezembro de 2011. Para avaliar a eficiência da modelagem tradicional, será utilizado o coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (S_{yx}) e coeficiente de variação (CV%):

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{res}}{SQ_t} \right) \quad (26)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n-p-1}} \quad (27)$$

$$CV\% = \frac{S_{yx}}{\bar{O}} * 100 \quad (28)$$

em que, P_i é o i ésimo valor estimado pelo modelo, O_i é o i ésimo valor observado, \bar{O} é a média aritmética da variável observada, SQ_{res} é a soma dos quadrados dos resíduos, SQ_t é a soma total dos quadrados, n é o número de dados observados e p é o número de coeficientes do modelo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada análise de consistência dos dados, as observações discrepantes foram excluídas antes de proceder com as estimativas. O ajuste do modelo de Schumacher foi adequado com R^2 de 0,80, S_{xy} de 2,59 e CV% de 13,97. Os coeficientes foram significativos para essas duas equações, apresentando p-valor menor que 0,00 ao nível de significância de 1%. Por meio do modelo ajustado foi construído a curva-guia (Figura 9):

$$\ln(Hd) = 3,4644 - 22,4047 \left(\frac{1}{I}\right) \quad (29)$$

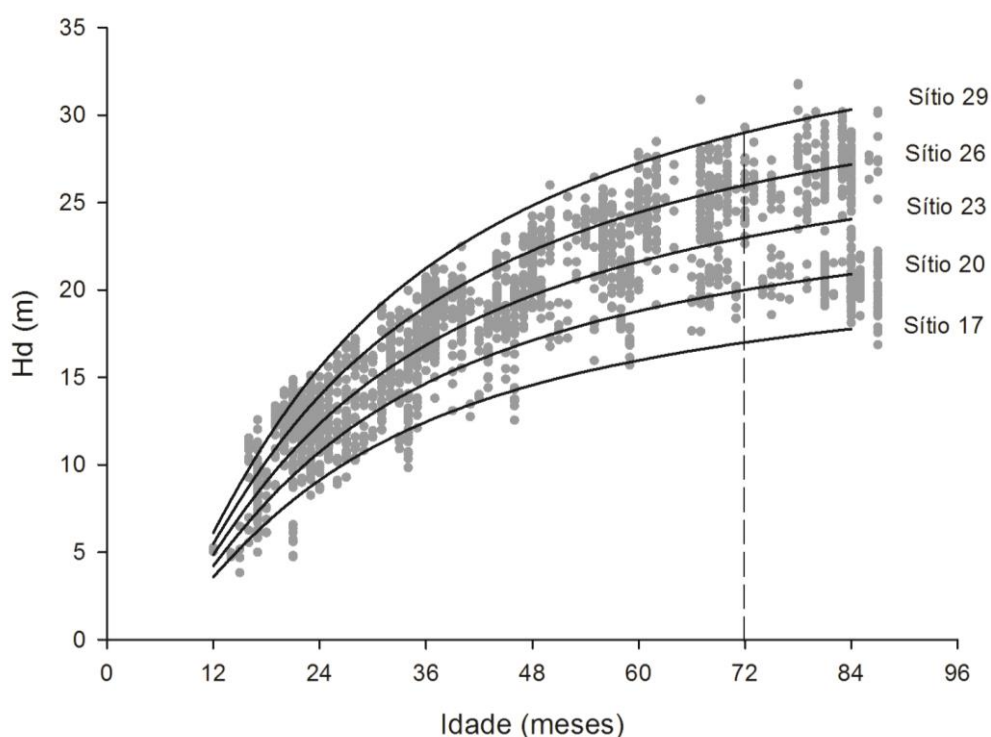


Figura 9. Feixe de curvas de índice de local gerados pelo método da curva-guia, para eucaliptos, considerando a idade índice de 72 meses para região de Bocaiúva (MG).

Foram excluídas observações dos sítios 10 a 15 e 30, por apresentarem poucas observações e também por representarem apenas as idades iniciais de crescimento, o que pode resultar em estimativas pouco precisas para esses sítios. A produção futura em área basal e volume pode ser determinada pela equação:

$$\ln(\hat{B}_2) = \ln B_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 1,975575 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + 0,052179 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S_1 \quad (30)$$

$$\ln(\hat{V}_2) = 1,910048 - 25,268110/I_2 + 0,034833S_1 + 0,995673\ln B_2 \quad (31)$$

O R^2 para as equações 30 e 31 foram 0,89 e 0,99, respectivamente. Os coeficientes foram significativos para essas duas equações, apresentando p-valor menor que 0,00 ao nível de significância de 1%. Para estimativa da área basal inicial, foi ajustado modelo de regressão linear simples, pelo método dos mínimos quadrados, tendo como variável dependente a área basal do povoamento aos 24 meses e como variável independente o sítio (Figura 10).

O modelo 3-PG estima valores médios de produção com base em parâmetros fisiológicos e também baseado nas variáveis climáticas do local. Nesse sentido, espera-se que

a estimativa de produção do modelo seja média em relação aos dados observados em campo, como apresentado na Figura 10. Nessa figura, observa-se que a modelagem processual, inicialmente, tende a ser menor que a média dos sítios. A partir dos 48 meses, essa diferença tende a diminuir, onde observa-se que a curva de produção do modelo processual tende a acompanhar a média de produção dos sítios e também a região média dos pontos relativos ao volume das parcelas no povoamento ao longo do tempo. PINKARD e BATTAGLIA (2001) observaram que por meio de modelagem processual pode-se obter resultados consistentes com relação a melhor época para poda e desbaste do povoamento e aumentar a produção, sendo que esses resultados foram compatíveis com modelagem tradicional.

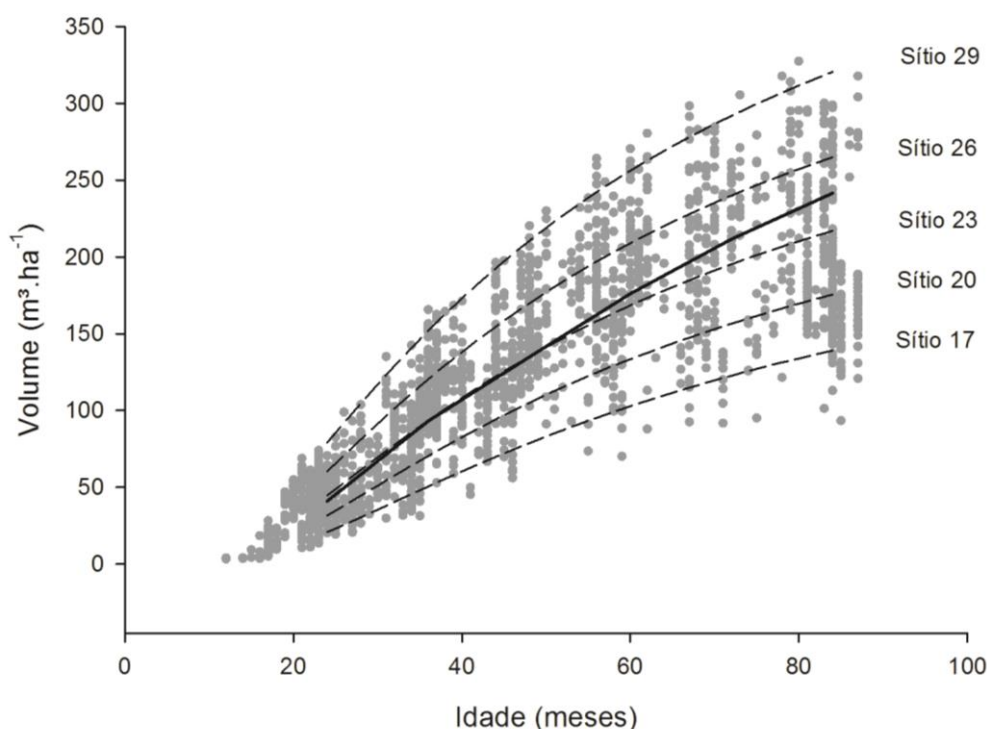


Figura 10. Produção do volumétrica em relação a idade, nas diferentes classes de sítio, obtidas a partir do modelo de Clutter (linha tracejada) e do modelo 3-PG (linha contínua) para região de Bocaiúva (MG).

Para simular diferentes classes de sítios, o parâmetro FR foi variado de 0,2 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1, menor a restrição da fertilidade do solo sobre o crescimento das árvores. Observa-se que o FR tem forte relação sobre o crescimento do povoamento, podendo-se considerar que esta representa a produção de diferentes sítios (Figura 11). Tickle et al. (2001) comparou as estimativas de volume estimado pelo 3-PG SPATIAL com o modelo empírico Lindsay (1939), muito empregado em florestas naturais de *Eucalyptus* na Austrália, e observou que as estimativas volumétricas foram muito similares.

O parâmetro FR necessita de medições em campo, sendo necessário realizar análises do solo na zona de exploração das raízes para aquisição de nutrientes. Segundo Dye et al. (2004) esse parâmetro é de difícil mensuração, principalmente em solos de maior densidade. Dessa forma, esse autor propôs a parametrização de FR com base no índice de sítio, pelo método de Clutter e Jones (1980), já que esse pode representar, de forma indireta, o potencial produtivo de cada área de cultivo expresso pela altura dominante. Segundo Almeida et al. (2010), a fertilidade do solo não é a única variável relativa ao solo que influencia no crescimento das plantas. Nesse caso, esse autor propôs um modelo para estimativa do

parâmetro FR, utilizando fertilidade, disponibilidade de água no solo, oxigênio, manejo e topografia.

Pela Figura 11 observa-se que o modelo 3-PG não representou sítios considerados de alta produção, como o sítio 30 estimado pelo modelo de Clutter, sendo necessário a calibração ou parametrização de outro parâmetro que tenha alta relação com a capacidade de produção. Segundo Almeida et al. (2010), variações nos parâmetros disponibilidade de água no solo (DAS) e o déficit de pressão de vapor (DPV) afetaram consideravelmente o crescimento das árvores, isso porque logo após plantio foi realizada adubação, fazendo com que o parâmetro FR tenha menor restrição sobre o crescimento. Porém, quando em períodos com baixo DPV, a variação da fertilidade no solo torna-se importante. Além disso, Almeida et al. (2010) sugere que deve-se ter atenção com a textura do solo, já que essa variável tem influência direta na retenção de água. O parâmetro FR tem relação linear com a eficiência quântica, ou seja, quanto maior a fertilidade do solo, maior será a fotossíntese por unidade de área foliar, desde que outros fatores não sejam limitantes. A DAS afeta a fotossíntese quando a quantidade de água no solo é reduzida consideravelmente, dessa forma quando esses dois fatores tornam-se limitantes, há maior acúmulo de biomassa nas raízes (COOPS et al., 2012).

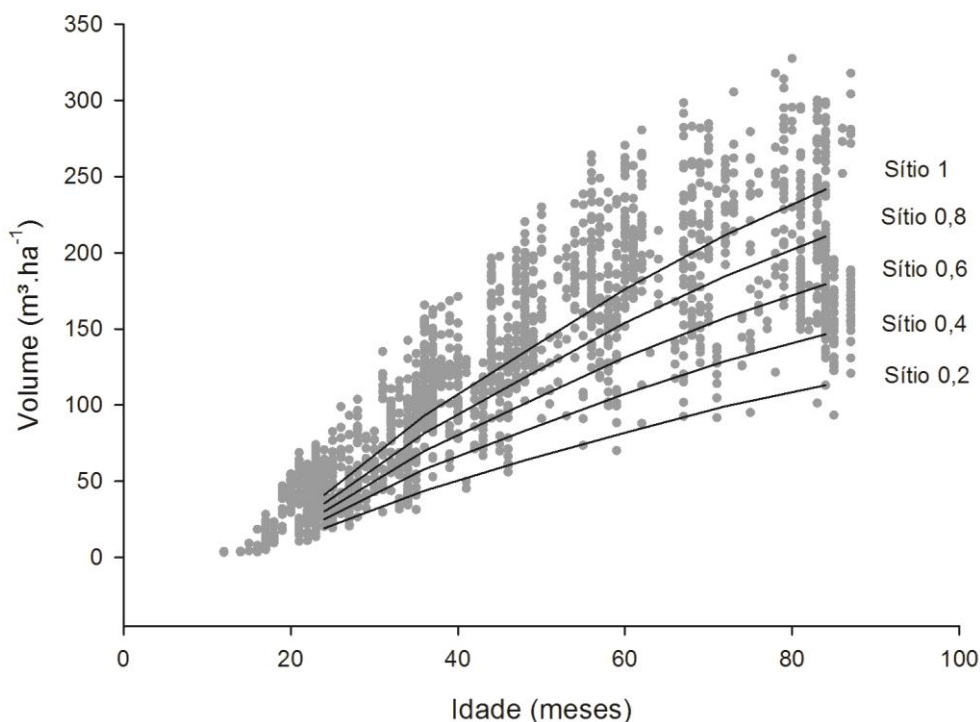


Figura 11. Curvas de produção em volume em relação a idade nas diferentes classes de sítio para região de Bocaiúva (MG) oriundas do modelo 3-PG.

Utilizando-se o modelo de Clutter foram estimadas as idades técnicas de corte (ITC), ou seja, período que pode ser realizada a exploração do plantio e obter o máximo de produção. Pela Figura 12, observa-se que a idade técnica de corte (ITC) foram muito próximas para todos os sítios, ocorrendo redução na ITC de até 14 meses para os sítios de maior produção. Os melhores sítios apresentaram estimativas de produção mais elevada em relação aos sítios de baixa qualidade, dessa forma a diferença entre o sítio 18 e o 27 foi de aproximadamente $70 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$.

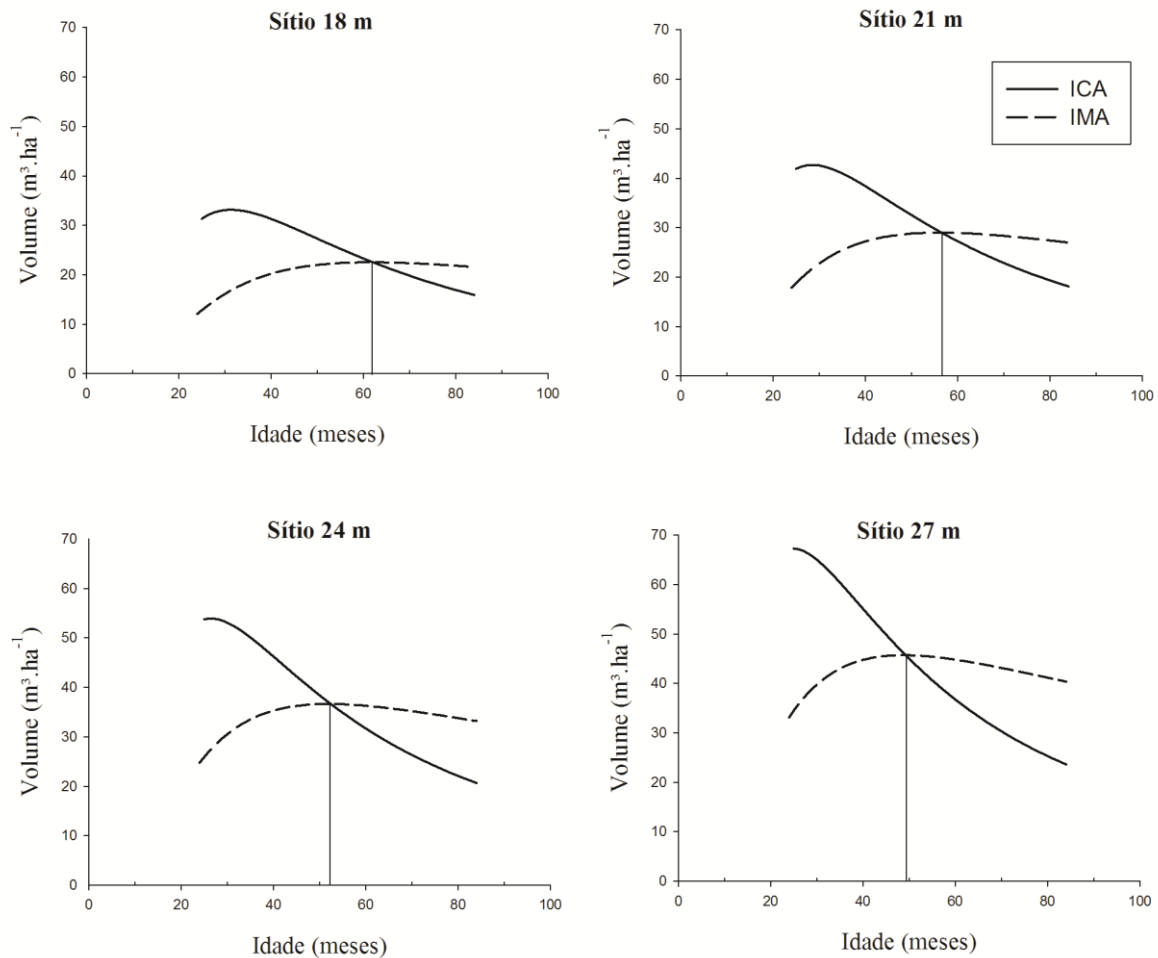


Figura 12. Estimativa do incremento médio anual (IMA – linha cinza) e incremento corrente anual (ICA – linha preta) para os sítios 18, 21, 24, e 27 para eucaliptos na região de Bocaiúva, MG.

A ITC do modelo 3-PG foi acima do estimado para o sítio 18 que foi próximo aos 65 meses. Como o modelo realiza estimativas médias, o sítio de produção do modelo devia ser próximo ao sítio de produção média estimado pelo modelo de Clutter (Figura 13). Segundo PINKARD e BATTAGLIA (2001), a modelagem processual deve ser utilizada em conjunto com a modelagem empírica para aumentar a quantidade de informações sobre a cultura e otimizar as atividades de manejo. Dessa forma, outros parâmetros influenciam diretamente na estimativa do IMA e do ICA do modelo, como o parâmetro ASW (available soil water) e textura que devem ser ajustados ou parametrizados a fim de obter melhores estimativas com o modelo 3-PG.

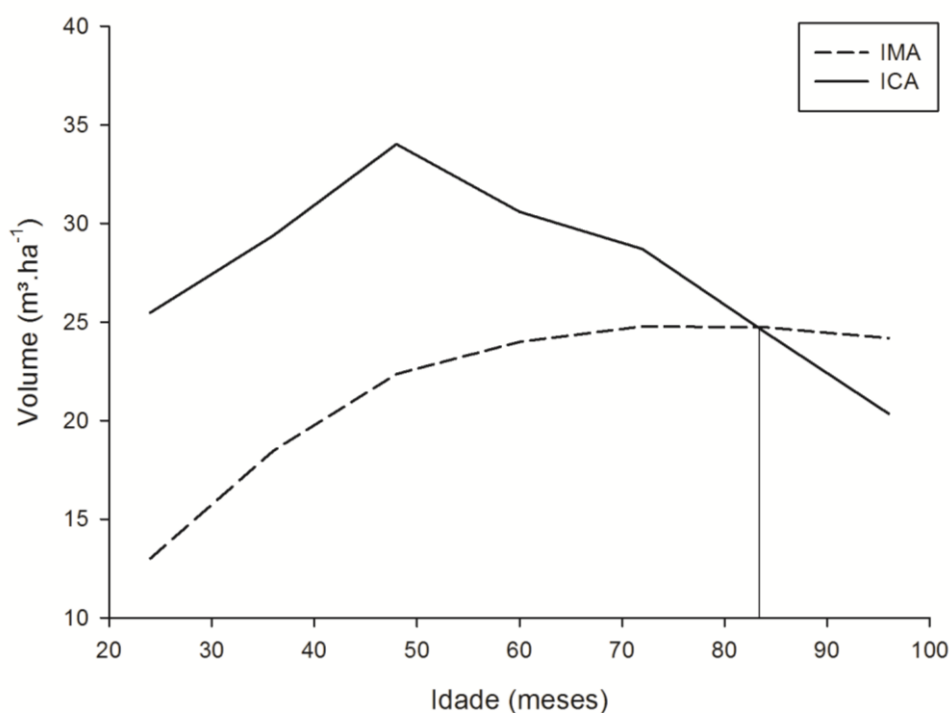


Figura 13. Incremento médio anual (IMA – linha cinza) e incremento corrente anual (ICA – linha preta) estimados pelo modelo 3-PG para eucaliptos na região de Bocaíuva, MG.

4. CONCLUSÃO

A modelagem baseada em processos mostra-se uma ferramenta importante, que pode complementar a modelagem tradicional, auxiliando no planejamento e manejo de plantios florestais.

O parâmetro FR, relativo a fertilidade do solo, demonstrou que sua variação pode estar diretamente relacionada com os sítios de produção, sendo necessário estudos mais detalhados sobre esse e outros parâmetros a fim de melhorar essas estimativas e facilitar a caracterização de novas áreas de expansão, quanto a capacidade produtiva.

O 3-PG, por meio de estimativas médias pontuais, mostrou-se que pode ser aplicado como ferramenta na estimativa do pico do IMA para determinada região, demonstrando que os demais sítios de produção variam acima e abaixo dessas estimativas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T. R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. 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, p. 1730-1740, 2010.
- BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H. M.; BARROS, N. F.; DIAS, S. C. M. 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.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 605 p.
- COOPS, N. C.; WARING, R. H.; HILKER, T. Prediction of soil properties using a process-based forest growth model to match satellite-derived estimates of leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 126, p. 160-173, 2012.
- DURÃES, M. C. O.; SALES, N. L. P.; NETO, S. D.; FIGUEIREDO, M. A. P. Levantamento florístico do estrato arbóreo de três fragmentos de floresta ciliar como subsídio à recomposição da vegetação do rio Cedro, Montes Claros – MG. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 47-58, 2014.
- DYE, P.J.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantation stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 197-218, 2004.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 2009-228, 1997.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H.; COOPS, N. C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v. 172, n. 2-3, p. 199-214, 2003.
- PINKARD, E. A.; BATTAGLIA, M. Using hybrid models to develop silvicultural prescriptions for *Eucalyptus nitens*. **Forest Ecology and Management**, v. 154, n. 1-2, p. 337-345, 2001.
- 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**, n. 2, v. 64, n. 1-3, p. 111- 122, 2001.

CONCLUSÃO GERAL

O modelo 3-PG mostra-se ferramenta potencial para auxiliar nas atividades silviculturais em empresas florestais. Por meio de parâmetros obtidos da literatura para região de interesse e com a parametrização de parâmetros alométricos, pode-se obter estimativas confiáveis de variáveis dendrométricas como DAP, altura, volume e IMA.

Para região norte de Minas Gerais, pode-se utilizar normais climatológicas para alimentar o 3-PG e realizar estimativas do potencial de produtividade de novas áreas, devendo-se observar possíveis subestimativas ou superestimativas das variáveis dendrométricas em função de variações climáticas que influenciam o crescimento das árvores.

A análise dos moduladores ambientais de déficit de pressão de vapor (fDPV) e de água no solo (fAS) mostraram que tem influência considerável no desenvolvimento do plantio, principalmente fAS que demonstrou forte restrição nos meses julho, agosto e setembro, em que há baixa precipitação e temperaturas moderadas, em relação aos outros meses.

Por meio da modelagem baseada em processos, pode-se realizar estimativas médias do crescimento e produção para áreas com plantios e áreas potencialmente produtoras. Dentre as variáveis consideradas pelo 3-PG, o parâmetro Fertility Rating (FR) demonstrou boa relação com a produtividade de possíveis sítios de produção, podendo ser utilizado para classificação de índice de sítio (SI). Porém, há necessidade de outros estudos para aprimorar a mensuração dessa variável em campo e sua extrapolação para demais áreas por meio de variáveis de fácil mensuração.

Como o modelo 3-PG realiza estimativas médias de variáveis dendrométricas para região, a idade técnica de corte (ITC) estimada pelo 3-PG apresentou valores próximos aos dos sítios médios estimados pela modelagem tradicional, sendo que os demais sítios apresentaram variações de produtividade acima e abaixo em relação ao 3-PG. Dessa forma, o 3-PG pode ser utilizado como ferramenta complementar a modelagem tradicional, auxiliando na tomada de decisão.