

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Acálita Godinho de Oliveira

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM NÍVEL DE
POVOAMENTO POR ÍNDICES DE COMPETIÇÃO**

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2022

ACÁLITA GODINHO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM NÍVEL DE
POVOAMENTO BASEADO NA COMPETIÇÃO ENTRE ÁRVORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso Bacharelado em Engenharia
Florestal do Instituto Federal de Minas
Gerais – *Campus* São João Evangelista, para
obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Florestal.

Orientador: Bruno Oliveira Lafetá

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2022



INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Minas Gerais

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O48m Oliveira, Acálita Godinho de.

Modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento baseado na competição entre árvores. / Acálita Godinho de Oliveira. – 2022.

24f.: il.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2022.

1. *Clutter*. 2. Índice de competição. 3. Mensuração. 4. *Prognose*.
I. Oliveira, Acálita Godinho de. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* São João Evangelista. III. Título.

CDD 585.2

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

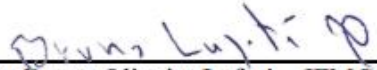
ACÁLITA GODINHO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM NÍVEL DE
POVOAMENTO POR ÍNDICES DE COMPETIÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso Bacharelado em Engenharia
Florestal do Instituto Federal de Minas
Gerais – *Campus* São João Evangelista, para
obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Florestal.

Orientador: Bruno Oliveira Lafetá

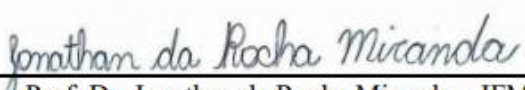
Aprovado em: 22 / 12 / 2022 pela banca examinadora



Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá – IFMG (Orientador)



Prof. Dr. Ivan da Costa Ilhéu Fontan – IFMG



Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda – IFMG



Prof. Dr. Diego dos Santos Vieira – UFVJM

RESUMO

Investigações científicas sobre a modelagem do crescimento e produção florestal são necessárias na busca de menor esforço amostral e acurácia da previsão do rendimento lenhoso. O objetivo do presente trabalho foi avaliar alternativas para a modelagem do crescimento e a produção em nível de povoamento baseado na competição entre árvores, tendo como referência o modelo de Clutter. Os dados foram provenientes de 34 parcelas permanentes mensuradas anualmente de 24 a 72 meses de idade, distribuídas aleatoriamente em quatro unidades de manejo florestal. Foram calculados a estimativa média por parcela de cinco índices de competição independentes da distância para a modelagem em nível de povoamento. A substituição de índices de local por índices de competição contribuiu favoravelmente com a qualidade preditiva e realismo biológico dos sistemas de equações simultâneos selecionados para estimativa volumétrica futura, tornando-os adaptáveis a várias condições de competitividade. Conclui-se que índices de competição independentes da distância são potenciais variáveis preditoras substitutivas ao índice de local, especialmente, diante restrições para a medição da altura de fustes dominantes ou ocorrência de eventuais inconsistências biológicas e estatísticas em algum dos seus submodelos.

Palavras-chave: Clutter; Índice de competição; Mensuração; Prognose.

ABSTRACT

Scientific investigations on the forest prognosis are necessary in the search for less sampling effort and accuracy in forecasting woody yield. This work aimed to evaluate alternatives for modeling of growth and yield in stand level based on competition between tree, using Clutter's model as a reference. Data came from 34 permanent plots measured annually from 24 to 72 months of age, randomly distributed in four forest management units. Mean estimate per plot of five distance-independent competition indices was calculated for stand level modeling. Replacements of location indices by competition indices favorably contributed to the predictive quality and biological realism of the simultaneous equation systems selected for future volumetric estimation, making them adaptable to various competitive conditions. It is concluded that distance-independent competition indices are potential predictive variables to substitute the location index, especially in view of restrictions for measuring height of dominant stems or occurrence of eventual biological and statistical inconsistencies in any of its submodels.

Keywords: Clutter; Competition index; Measurement; Prognosis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
2.1 Caracterização da área de estudo.....	10
2.2 Descrição dos dados e análise estatística.....	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4. CONCLUSÕES	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1. INTRODUÇÃO

Os projetos florestais se caracterizam por amplos períodos entre os investimentos iniciais e a receita futura, conferindo-lhes grande expectativa sobre o volume a ser colhido (PENIDO et al., 2020). A acurácia do prognóstico do estoque de madeira é essencial para a assertividade do planejamento e atendimento da demanda industrial de madeira (SCOLFORO et al., 2019; DANTAS et al., 2020; PENIDO et al., 2020).

Florestas são consideradas sistemas biológicos dinâmicos que estão em contínua mudança estrutural, cuja produção é uma resposta da interação de aspectos genéticos, ambientais e silviculturais (SALEKIN et al., 2020). Os Modelos de Crescimento e Produção (MCP) surgem como alternativa para a projeção dessas mudanças e descrição quantitativa de ecossistemas equiâneos. Todavia, o prognóstico sobre o comportamento do rendimento lenhoso em resposta à aspectos competitivos ainda não estão completamente elucidados e continua sendo um desafio fundamental para modeladores.

Os MCP podem ser classificados de acordo com o detalhamento de informações desejadas e a disponibilidade de dados dendrométricos. As três principais categorias são destinadas para povoamento, distribuição diamétrica ou árvores individuais (CAMPOS; LEITE, 2017). O modelo em nível de povoamento mais difundido no Brasil é o de Clutter (1963), ajustado originalmente para parcelas estabelecidas em povoamentos de *Pinus taeda* L. Trata-se de um sistema de equações simultâneas formado por dois submodelos matemáticos, um para a projeção de área basal e outro para volume. Além disso, apresenta particularidades relacionadas à consistência para área basal e de compatibilidade entre o crescimento e a produção (CAMPOS; LEITE, 2017; PENIDO et al., 2020).

O índice de local, variável preditora do modelo de Clutter (1963), denota o potencial produtivo pela média da altura de árvores dominantes em uma idade de referência, que crescem livres de competição por radiação luminosa no estrato superior da floresta (CAMPOS; LEITE, 2017). É uma variável fortemente correlacionada com o volume do povoamento, utilizada na modelagem para o diagnóstico e simulação de diferentes alternativas de manejo (KIMBERLEY; WATT, 2021). Entretanto, nem sempre a mensuração da altura dominante é contemplada em inventários florestais, uma vez que torna a amostragem em campo mais laboriosa e dispendiosa.

Adaptações em MCP são realizadas com frequência para ampliar a capacidade de generalização da modelagem para extensas áreas de cultivo (KIMBERLEY; WATT,

2021), incorporando especialmente variáveis ambientais, em adição ou substituição ao índice de local. A escolha de variáveis preditoras representativas do fenômeno a ser modelado aumenta a acurácia de equações e simplificam processos relacionados ao crescimento vegetal (SALEKIN et al., 2021). Variáveis preditoras que expressam a competição são úteis para a formulação de hipóteses biofísicas sobre o funcionamento do ecossistema e produtividade madeireira.

A competição entre árvores é um fenômeno de grande complexidade, mesmo entre indivíduos com mesma carga genética (KAHRIMAN et al., 2018; GAO et al., 2019; BIANCHI et al., 2020; SCHONS et al., 2020). A intensificação da competição consiste no aumento da demanda por recursos necessários para o crescimento e limitação da disponibilidade dos mesmos (OLIVEIRA et al., 2021; WEBER et al., 2018). O modo em que vegetais disputam tais recursos pode ser dividido em competição unilateral e bilateral. Unilateral se refere à competição por radiação luminosa, em que árvores maiores não são afetadas negativamente por aquelas vizinhas competidoras menores, enquanto que a competição bilateral considera que todos recursos de crescimento são disputados por todas as árvores, principalmente, água e nutrientes (SCHONS et al., 2020).

A capacidade competitiva de uma árvore pode ser resumida quantitativamente em um único valor, conhecido por índice de competição, que expressa o estresse imposto pela competição e a quantidade de recursos disponíveis para o vegetal (LAMBRECHT et al., 2019). Índices de competição podem ser classificados em independentes da distância, semi-independentes da distância e dependentes da distância. Índices de competição independentes da distância são os mais operacionalmente exequíveis e se diferenciam dos demais por não exigir dados da localização espacial e distância entre árvores (CURTO et al., 2020; FUKUMOTO et al., 2020). Neste caso, a estimativa de competição é proveniente da relação de aspectos biométricos tradicionalmente coletados em inventários, entre a árvore para a qual o crescimento é explicado (árvore objetivo) e aquelas vizinhas competidoras contidas na unidade amostral (OLIVEIRA et al., 2021).

Mediante exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: I) índices de competição podem substituir com precisão informações de índice local na modelagem do crescimento e produção florestal; II) índices de competição podem ser usados de forma complementar à índices de local em prognoses de volume lenhoso. O objetivo do presente trabalho foi avaliar alternativas para a modelagem do crescimento e a produção em nível de povoamento baseado na competição entre árvores, tendo como referência o modelo de Clutter (1963).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado com dados originários de plantações clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, instalados no arranjo espacial $3,0 \times 2,5$ m na região central mineira do estado de Minas Gerais – Brasil (Figura 1). A área de estudo possui clima do tipo Cwa pelo sistema de classificação internacional de Köppen (ALVAREZ et al., 2013), constituída por quatro unidades de manejo florestal (UMF) conforme descrição apresentada na Tabela 2.

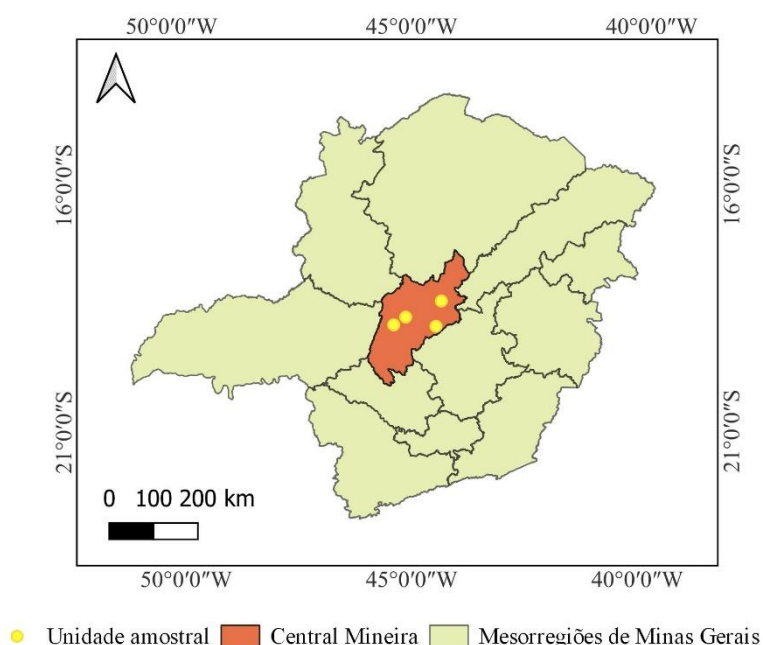


Figura 1: Mapa da região central mineira – MG

Tabela 1. Localização e caracterização das Unidades de Manejo Florestal (UMF) instaladas com *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região central do estado de Minas Gerais – Brasil.

UMF	Área (ha)	Longitude (m)	Latitude (m)	Precipitação (mm)	Temperaturas (°C)	Tipo de solo
1	87,91	459437	7903580	1259	22,7	LV
2	42,74	554991	7900318	1043	23,4	LVA
3	77,21	567041	7957427	1043	23,4	LVA
4	85,57	486435	7921081	1189	23,0	LV

Latitude e longitude em coordenadas UTM, Datum Sirgas 2000, zona 23 S. LV = Latossolo Vermelho. LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo.

2.2 Descrição dos dados e análise estatística

O inventário florestal foi conduzido nas idades de 24, 36, 48, 60 e 72 meses de acordo com a rotina operacional da empresa florestal, sendo lançadas aleatoriamente 11 parcelas permanentes na UMF1, 6 parcelas na UMF2, 10 parcelas na UMF3 e 7 parcelas na UMF4. A área útil de cada parcela foi de 400 m². Mensurou-se o diâmetro com casca à altura do peito (*DAP* – à altura de 1,30 m do solo, cm) de todos os fustes. Em cada parcela, tomaram-se a altura total (*H*, m) das 15 primeiras árvores e de quatro árvores dominantes (*Hd*, m), conforme conceito de Assmann (1970), equivalente a uma árvore dominante a cada 100 m².

O modelo hipsométrico de Campos et al. (1984) foi ajustado para a estimativa da altura daqueles fustes que tiveram somente o *DAP* medido. As estimativas de volume com casca foram obtidas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall (1933) linearizado. Empregou-se equações volumétricas específicas para cada UMF, fornecida pela empresa florestal e disponíveis em Penido et al. (2020). As estimativas do índice do sítio (*S*) foram obtidas pelo método da curva-guia (CLUTTER et al., 1983), considerando idade-índice igual a 72 meses.

Calcularam-se cinco índices de competição independentes da distância conhecidos no setor florestal (Tabela 2). Os índices *IC1* e *IC2* representam a competição bilateral e assumem que os recursos de crescimento são disputados por todas as árvores vizinhas competidoras. Os demais índices, (*IC3* a *IC5*) assumem como árvores competidoras aquelas de diâmetro maior que a árvore objetivo e, portanto, representam a competição unilateral, ou seja, árvores maiores não são afetadas por aquelas vizinhas menores. A média dos índices de competição foi quantificada em nível parcela para a modelagem do crescimento e produção florestal.

Tabela 2. Índices de competição calculados para as árvores de eucalipto.

Índice	Expressão	Interpretação
----- Competição bilateral -----		
<i>IC1</i>	$IC_1 = \sum_{j=1}^n \frac{DAP_j}{DAP_i}$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.

IC2	$IC_2 = \frac{DAP_i^2}{DAP_j^2}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.
----- Competição unilateral -----		
IC3	$IC_3 = \sum_{i=1}^{nj} g_j / DAP_i$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.
IC4	$IC_4 = \frac{DAP_i}{DAP_{max}}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.
IC5	$IC_5 = \frac{DAP_i}{Dd}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.

Em que: $\overline{DAP}$ = média de DAP das árvores de setor (cm); q = diâmetro médio quadrático (cm); DAP_{max} = DAP da árvore mais grossa; Dd = média do diâmetro de árvores dominantes; g_j = área basal das árvores competidoras (m²/ha) com DAP maior que o DAP da árvore-objetivo; i = i-ésima árvore-objetivo e; j = j-ésima árvore competidora.

O modelo de Clutter (1963) foi ajustado na forma original e conforme três propostas de adaptação para a sua formulação matemática. As propostas 1 a 3 envolveram a substituição da medição do índice de local por um índice de competição somente no primeiro submodelo (estimativa de área basal), unicamente no segundo submodelo (estimativa volumétrica) e em ambos os submodelos, respectivamente. A substituição do índice de local pelo índice de competição do primeiro submodelo manteve a particularidade de consistência biológica. Esta particularidade define que a estimativa de área basal projetada para a mesma idade resulte em valores idênticos aos observados. Desse modo, tiveram-se as seguintes relações funcionais:

Modelo original de Clutter (1963):

$$\begin{cases} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + Ln(\varepsilon) \\ Ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2} \right) + \beta_2 S + \beta_3 Ln(B_2) + Ln(\varepsilon) \end{cases}$$

Proposta 1:

$$\begin{cases} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) IC + Ln(\varepsilon) \\ Ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2} \right) + \beta_2 S + \beta_3 Ln(B_2) + Ln(\varepsilon) \end{cases}$$

Proposta 2:

$$\begin{cases} \ln(B_2) = \ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \ln(\varepsilon) \\ \ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2} \right) + \beta_2 IC + \beta_3 \ln(B_2) + \ln(\varepsilon) \end{cases}$$

Proposta 3:

$$\begin{cases} \ln(B_2) = \ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) IC + \ln(\varepsilon) \\ \ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2} \right) + \beta_2 IC + \beta_3 \ln(B_2) + \ln(\varepsilon) \end{cases}$$

Em que:

S = índice de local (m);

B₁ e B₂ = áreas basais presente e futura (m² ha⁻¹), respectivamente;

I₁ e I₂ = idades presente e futura (meses), respectivamente;

V₂ = volume com casca futuro (m³ ha⁻¹);

IC = índice de competição na idade presente;

α₀ e α₂ = parâmetros do modelo de área basal; e

β₀... β₃ = parâmetros do modelo volumétrico.

Cada proposta de adaptação do modelo de Clutter (1963) foi submetida à cinco ajustamentos, um por índice de competição. As estimativas dos parâmetros de modelagem foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados em dois estágios, com auxílio do programa Eviews 5.0 (IHS Global, 2004).

Foram selecionados quatro sistemas de equações simultâneas para as análises gráficas subsequentes, o próprio modelo de Clutter (1963) ajustado e uma por proposta de adaptação da sua formulação original. A seleção dos sistemas de equações simultâneas mais acurados se pautou nas seguintes medidas de acurácia: significância dos parâmetros de regressão pelo teste *t*; menor raiz quadrada do erro médio (RQEM), menor média das diferenças absolutas (MDA) e maior coeficiente de correlação de Pearson (*r_{YŶ}*). Ademais, foram realizadas inspeção gráfica dos resíduos percentuais e da projeção volumétrica a

partir de 24 meses de idade por UMF. A fim de se avaliar a capacidade preditiva dos sistemas de equações selecionados além do período inventariado, a média dos volumes com casca, ponderada pela área das UMF's, aos 24, 36, 48 e 60 meses de idade foram projetados até 120 meses.

Para diagnóstico de efeito estatístico, empregou-se 5% de significância em todas as análises. Estas análises foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.1.1 (R CORE TEAM, 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um ponto que deve ser observado para o ajuste do modelo de Clutter (1963) é a necessidade da informação do índice de local, obtido convencionalmente pelo método da curva-guia (CLUTTER et al., 1983). Este método se baseia no estabelecimento de uma relação funcional para a estimativa da altura dominante em função da idade e a posterior, dedução da equação para o cálculo de índice de local:

$$Ln(Hd) = 3,6910 - 24,8927 \left(\frac{1}{I}\right); RQEM = 2,7129 \text{ m}; MDA = 2,2822 \text{ m e } r_{Y\hat{Y}} = 0,87^*;$$

$$Ln(S) = Ln(Hd) - (-24,8927) \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{72}\right)$$

As aplicações do modelo de Clutter (1963) e suas propostas de adaptação devem ser vistas com bastante cautela, considerando a dimensão, sinais e significância dos parâmetros que integram cada submodelo do sistema de equações simultâneas. Verificou-se a ocorrência de valor negativo no parâmetro relacionado ao índice de local nos submodelos ajustados para a estimativa de área basal. Isso, provavelmente, foi consequência da pequena variação apresentada pela capacidade produtiva nos dados do experimento. O parâmetro α_1 foi negativo mesmo substituindo S por $Ln(B_1)$, $Ln(B_1)^2$ ou Hd , resultando em inconsistência biológica; esperam-se maiores áreas basais com a melhoria da qualidade de sítio (KIMBERLEY; WATT, 2021; CASAS et al., 2022). Assim, optou-se pela remoção do termo $\left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)S$ do submodelo e o seu reajuste, segundo o preconizado por Campos e Leite (2017). Esse mesmo procedimento, também, foi aplicado para o submodelo de área basal da segunda proposta.

Embora tenham sido estabelecidas 16 sistemas de equações simultâneas para a modelagem do crescimento e produção florestal, apenas 6 sistemas de equações exibiram todos os parâmetros estatisticamente significativos pelo teste t ($p \leq 0,05$). Estes sistemas

de equações e suas medidas de acurácia estão discriminados na Tabela 3. A qualidade da maioria dos ajustes foi satisfatória, com baixos valores de RQEM e MDA, além de coeficientes de correlação relativamente altos ($> 0,95$). Estes resultados são indícios de que as variáveis independentes utilizadas nas modelagens têm influência naquelas dependentes (PENIDO et al., 2020).

Tabela 3. Sistemas de equações simultaneas selecionadas para a estimativa do crescimento e produção dos povoamentos de eucalipto.

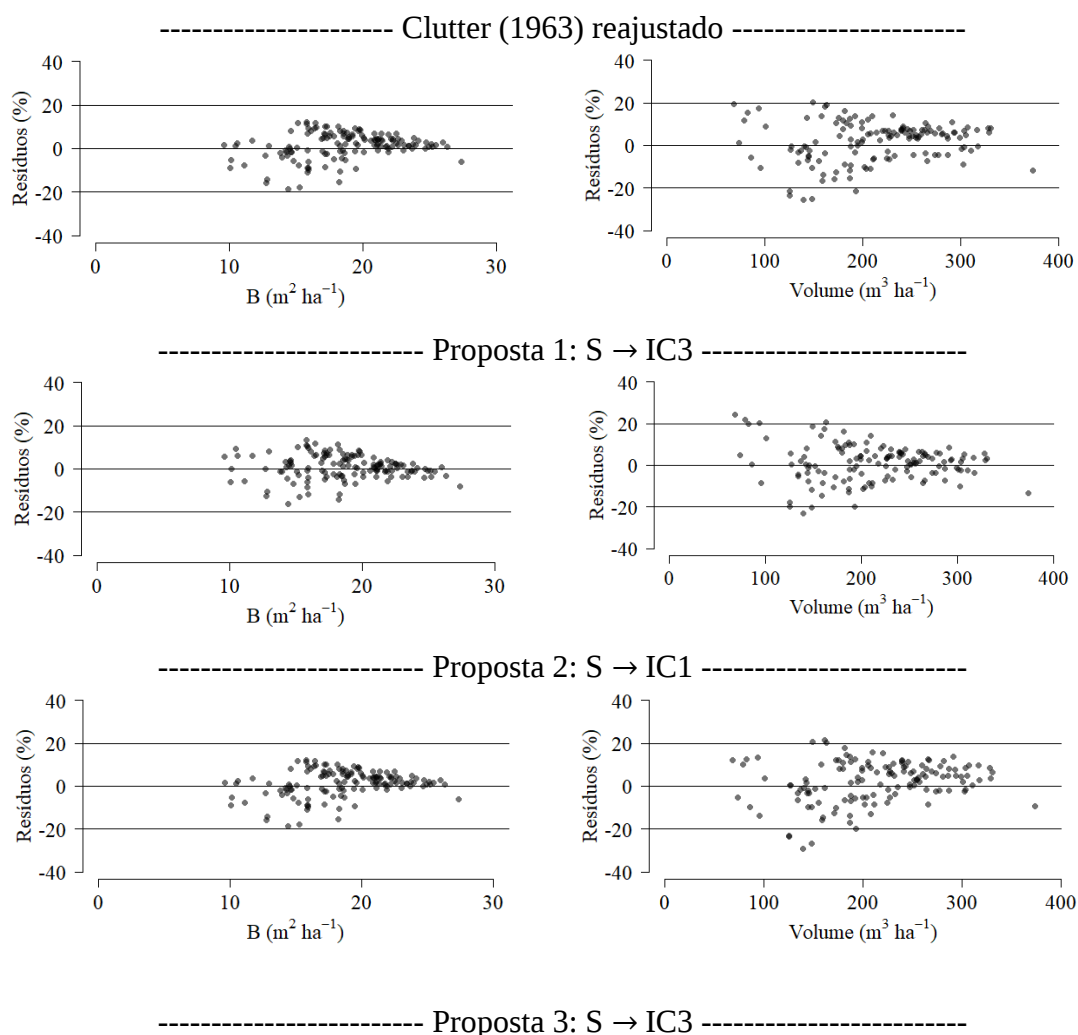
Sistemas de equações	RQEM	MDA	$r_{Y\hat{Y}}$
----- Clutter (1963) reajustado -----			
$\left\{ \begin{array}{l} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,6360 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \\ Ln(V_2) = 1,8850 - 13,6154 \left(\frac{1}{I_2} \right) + 0,0134 S + 1,1379 Ln(B_2) \end{array} \right.$	0,8742 15,7098	1,0736 18,0839	0,97 0,97
----- Proposta 1: S $\rightarrow$ IC3 -----			
$\left\{ \begin{array}{l} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 4,0351 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) - 31,9257 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) IC_3 \\ Ln(V_2) = 1,8572 - 13,3070 \left(\frac{1}{I_2} \right) + 0,0130 S + 1,1496 Ln(B_2) \end{array} \right.$	0,7645 12,8235	0,9573 15,5587	0,97 0,97
----- Proposta 2: S $\rightarrow$ IC1 -----			
$\left\{ \begin{array}{l} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,6360 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \\ Ln(V_2) = 1,5523 - 5,8404 \left(\frac{1}{I_2} \right) - 0,0063 IC_1 + 4,4350 Ln(B_2) \end{array} \right.$	0,8742 16,0514	1,0736 19,1076	0,97 0,97
----- Proposta 2: S $\rightarrow$ IC3 -----			
$\left\{ \begin{array}{l} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,6360 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \\ Ln(V_2) = 1,0850 - 13,1363 \left(\frac{1}{I_2} \right) - 30,6560 IC_3 + 1,6901 Ln(B_2) \end{array} \right.$	0,8742 20,5704	1,0736 25,5148	0,97 0,95
----- Proposta 2: S $\rightarrow$ IC5 -----			
$\left\{ \begin{array}{l} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,6360 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \\ Ln(V_2) = 31,6766 + 144,6477 \left(\frac{1}{I_2} \right) - 48,2043 IC_5 + 4,2905 Ln(B_2) \end{array} \right.$	0,8742 1005,1843	1,0736 3831,7804	0,97 0,12
----- Proposta 3: S $\rightarrow$ IC3 -----			
$\left\{ \begin{array}{l} Ln(B_2) = Ln(B_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 4,0351 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) - 31,9257 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) IC_3 \\ Ln(V_2) = 1,2557 - 8,2727 \left(\frac{1}{I_2} \right) - 8,4170 IC_3 + 1,4924 Ln(B_2) \end{array} \right.$	0,7645 14,2176	0,9573 17,5044	0,97 0,96

S = índice de local. IC₁ a IC₅ = índices de competição independentes da distância. RQEM = raiz quadrada do erro médio. MDA = média das diferenças absolutas. $r_{Y\hat{Y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson. Todos os parâmetros e coeficientes de correlação foram significativos pelo teste t ($p \leq 0,05$).

O sinal do parâmetro β_1 , associado ao inverso da idade, foi negativo em todos os ajustes, exceto quando se adotou o IC5 para substituir o índice de local do submodelo volumétrico da Proposta 2. Esta combinação de proposta e índice de competição geraram estimativas enviesadas de volume (altos valores de RQEM e MDA) e, portanto, foi eliminada das análises gráficas subsequentes. É conveniente enfatizar que valores

negativos para o β_1 são imprescindíveis para o realismo biológico das estimativas da produção do povoamento, pois não há expectativa de redução natural do estoque de crescimento até a idade técnica de colheita florestal (RESENDE et al., 2018; SALEKIN et al., 2020; FARIAS et al., 2021; CASAS et al., 2022).

O sistema de equações simultâneas mais acurado referente às propostas de 1 a 3, contiveram, em pelo menos um submodelo, os índices de competição IC3, IC1 e IC3 como variável preditora substitutiva ao índice de local, respectivamente. Esses sistemas de equação exibiram as melhores estatísticas de acurácia ou próximas ao do modelo de Clutter (1963) reajustado, sendo então, submetidos à análise de inspeção gráfica de resíduos percentuais (Figura 2).



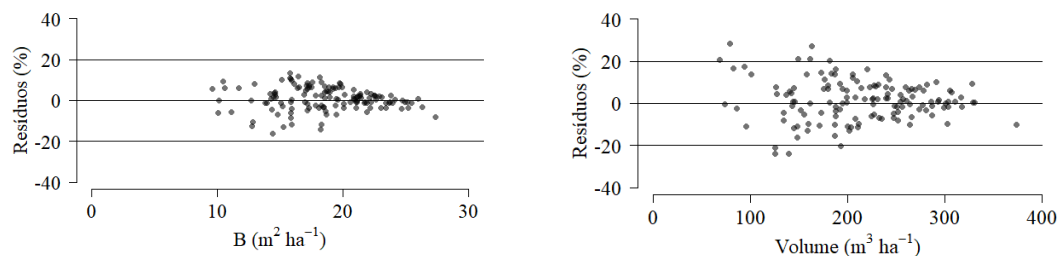


Figura 2. Representações gráficas dos resíduos percentuais para a estimativa de área basal à esquerda e volume à direita, empregando os sistemas de equações simultâneas selecionados para a modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento florestal.

Todos os parâmetros associados aos índices de competição IC1 e IC3 foram negativos (Tabela 3), condizentes biologicamente com a sua interpretação (Tabela 2); menores valores expressam ambientes menos competitivos e mais recursos disponíveis para o crescimento vegetal. Outro aspecto a se considerar é que a capacidade competitiva de árvores se intensifica face às diferenças nas taxas de crescimento individuais dentro de um povoamento ao longo do tempo (SOARES et al., 2020; BHANDARI et al., 2021). A variabilidade do volume individual dos fustes dentro das parcelas tendeu assintoticamente ao aumento nas UMF's, com coeficientes de variação de 21,58% aos 24 meses, de 23,11% aos 36 meses, de 25,26% aos 48 meses, de 25,98% aos 60 meses e 26,15% aos 72 meses.

Os erros das estimativas variaram de -18,48 a 13,42% para área basal e de -29,33 a 28,20% para o volume com casca (Figura 2). Esses valores estão em consonância ao verificado para plantações de eucalipto não desbastadas por Azevedo et al. (2016); Penido et al. (2020); Farias et al. (2021) e Casas et al. (2022). A substituição do índice de local por IC3 (propostas 1 e 3) promoveu, em termos médios, a redução da dispersão de resíduos percentuais, confirmado por valores de RQEM e MDA (Tabela 3) inferiores ao modelo de Clutter (1963) reajustado.

Os resíduos percentuais se concentraram mais próximo ao eixo das abscissas com o aumento das estimativas volumétricas, evidenciando que, em alguns casos; índices de competição podem substituir com acurácia a informação do índice de local no modelo de Clutter (1963). Dentre os índices de competição testados, constatou-se que o IC3 foi o mais adequado como variável preditora para a estimativa do submodelo de área basal. Ressalta-se que a expressão do índice de competição IC3 também considera informações de dominância expressa em área basal, porém restrita às árvores competidoras nas parcelas (competição unilateral), o que pode ter contribuído para qualidade preditiva dos submodelos de área basal das propostas 1 e 3.

Os volumes das UMF's aos 24 meses de idade foram projetados até 72 meses, apresentando comportamento sigmoidal, na forma de S. (Figura 3). As amplitudes de variação do volume observado nas parcelas de cada UMF abrangeram as curvas de produção ao longo do intervalo inventariado. As estimativas volumétricas da proposta 2, que utilizou IC1 como variável preditora substitutiva ao índice de local, aproximaram mais daquelas obtidas com o modelo de Clutter (1963) reajustado, o que pode ser justificado, em parte, pela parametrização do mesmo submodelo de área basal.

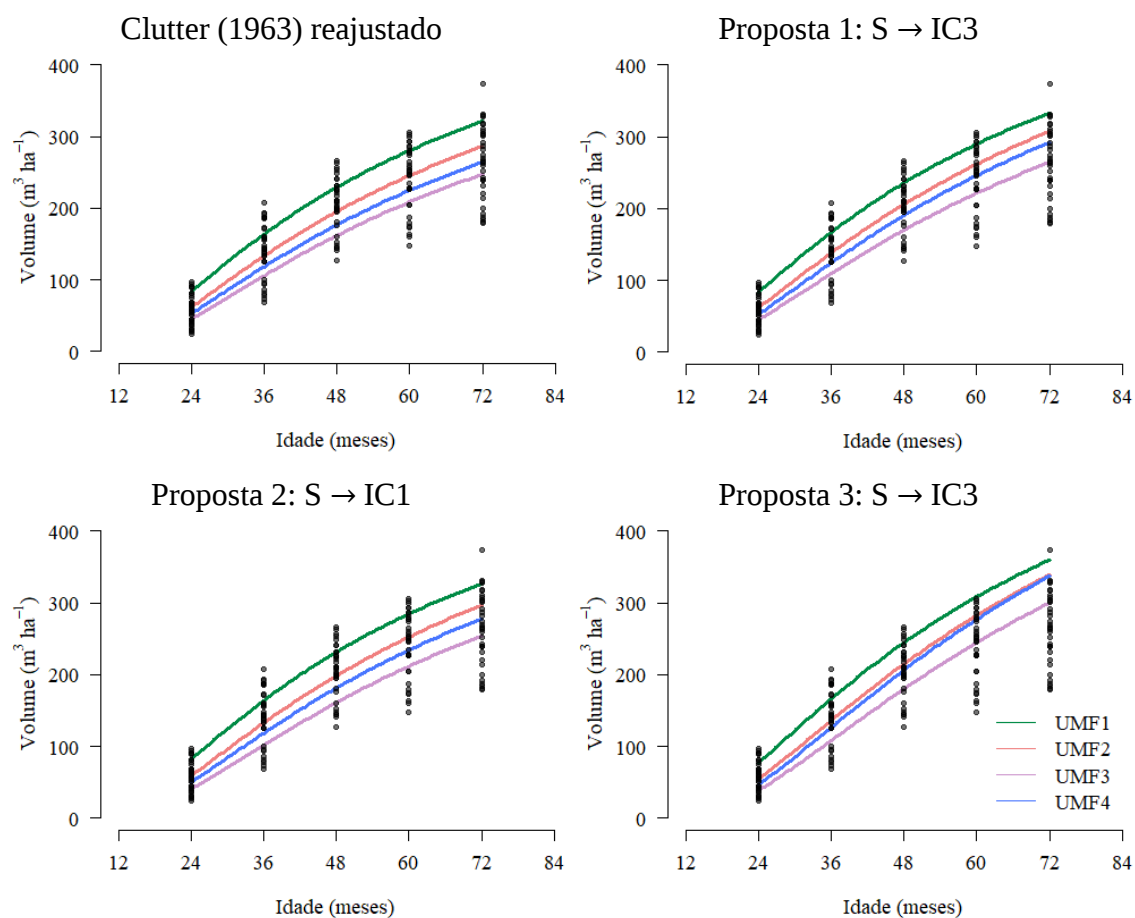


Figura 3. Projeções volumétricas por unidade de manejo florestal (UMF) a partir de 24 meses de idade, empregando os sistemas de equações simultaneas selecionados para a modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento florestal.

Uma leve tendência à superestimação volumétrica foi observada nas maiores idades com a aplicação do modelo de Clutter (1963) reajustado (Figuras 3 e 4). Fato que corrobora com os resultados obtidos por Demolinari et al. (2007); Azevedo et al. (2016) e Farias et al. (2021). De acordo com Gonçalves et al. (2016), a superestimativa do volume em idades avançadas é uma característica estatística inerente ao próprio modelo.

Deste modo, indica-se que projeções além do período inventariado sejam realizadas a partir da última idade amostrada para a minimização de superestimativas do volume.

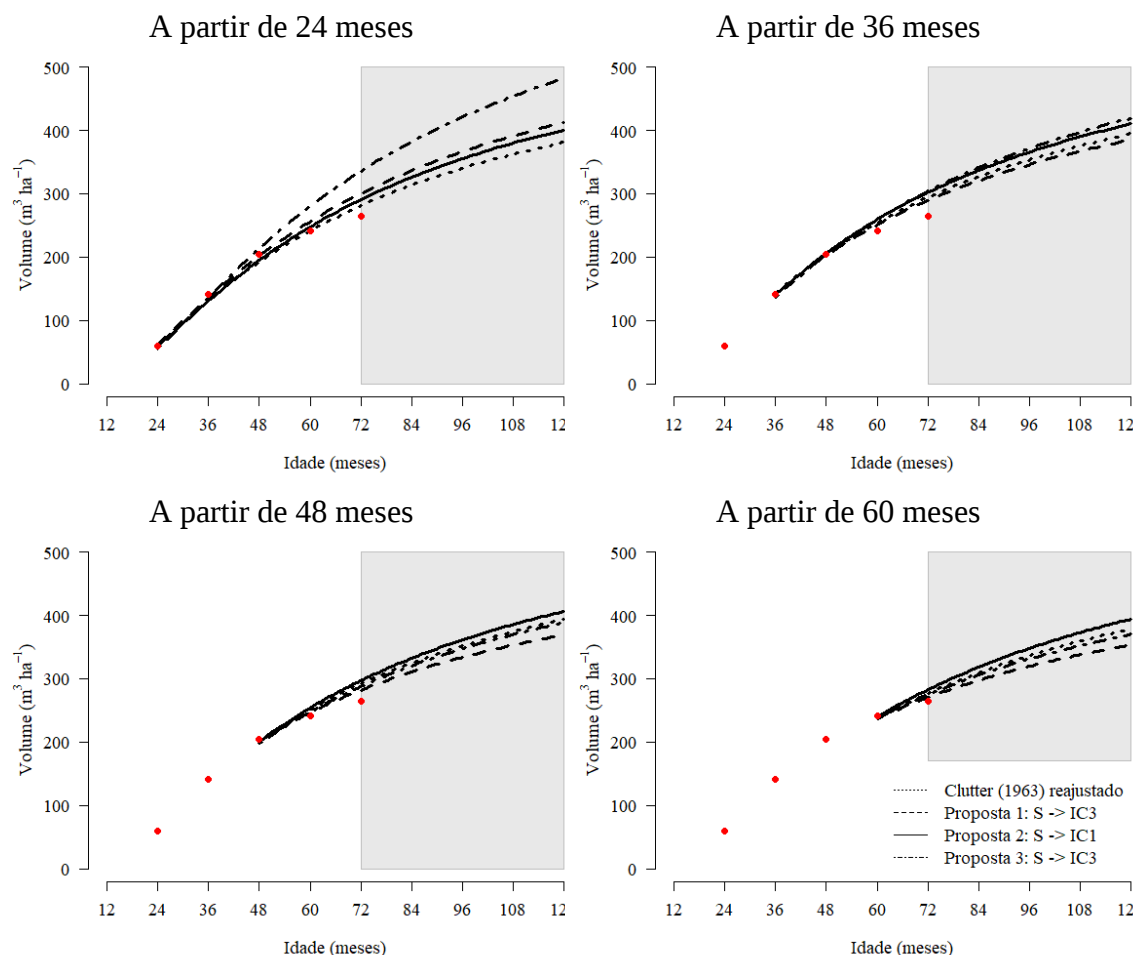


Figura 4. Projeções volumétricas para todas as unidades de manejo florestal a partir de 24, 36, 48 e 60 meses de idade, empregando os sistemas de equações simultaneas selecionados para a modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento florestal. Pontos vermelhos = média de volume ponderada pela área das unidades de manejo florestal, Polígono cinza = volume projetado além do período inventariado.

Todos os sistemas de equações aumentaram a acurácia da estimativa volumétrica com a diminuição do horizonte de projeção, especialmente, naquele selecionado para a proposta 3 (Figura 4). A substituição do índice de local por IC3 em todos os submodelos (proposta 3) demonstrou assertividade notável para as projeções da produção a partir de 48 e 60 meses idade. As diferenças dessas projeções em relação à média ponderada pela

área das UMF's aos 72 meses foram de 9,02% e 4,02%, respectivamente. Tais diferenças foram menores do que a do próprio Clutter (1963) reajustado, de 10,63% e 4,85% para a mesma sequência.

A incorporação do índice de competição IC3 pela proposta 1 se mostrou uma alternativa promissora de prognose para as ocasiões de ajuste do modelo de Clutter (1963), cujo valor de α_1 do submodelo de área basal seja negativo ou não significativo. A combinação dos índices de local e de competição (proposta 1) aumentou a flexibilidade de aplicação da modelagem, promovendo a análise da produção de sítios com diferentes capacidades produtivas e intensidades de competição.

A substituição de índices de local por índices de competição contribuiu favoravelmente com a qualidade preditiva e realismo biológico dos sistemas de equações simultâneos selecionados para estimativa volumétrica futura, tornando-os adaptáveis a várias condições de competitividade. No que se refere à projeção de volume ponderado pela área das UMF's de 60 a 120 meses de idade, os sistemas de equações selecionados para as propostas 1 a 3 exibiram diferenças relativas baixas em comparação ao modelo de Clutter (1963) reajustado, de -6,75%, 4,03% e -2,30%, respectivamente.

A modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento baseado na competição entre árvores se revelou uma eficiente ferramenta de prognose. O entrave operacional no uso do modelo de Clutter (1963) abrange a coleta de dados, requerendo a identificação de fustes dominantes e medição de sua altura. Os sistemas de equações selecionados para as propostas 2 e 3 promoveram a redução do esforço amostral em campo, dispensando a medição da altura dominante e o pré-processamento para a estimativa do índice de local.

A seleção e aplicação apropriadas de um modelo de prognóstico volumétrico são essenciais para a obtenção de estimativas não enviesadas do estoque futuro de crescimento. Informações médias da competitividade de fustes dentro de parcelas viabilizaram a modelagem em nível de povoamento. Os resultados obtidos fornecem subsídios relevantes para o desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a prognose biométrica em nível de povoamento, adotando índices de competição como variáveis preditoras.

4. CONCLUSÕES

Índices de competição independentes da distância são potenciais variáveis preditoras substitutivas ao índice de local no Modelo de Clutter (1963), especialmente, diante restrições para a medição da altura de fustes dominantes ou ocorrência de eventuais inconsistências biológicas e estatísticas em algum dos seus submodelos. Os índices de competição IC1 e IC3 mostraram maior eficiência para a modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento.

A substituição do índice de local por índices de competição em todos os submodelos de Clutter (1963) podem gerar superestimativas de volume para amplos horizontes de projeção do estoque de crescimento, sobretudo, tendo como referência a idade de 24 meses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York: Pergamon, 1970. 506p.
- AZEVEDO, G. B.; OLIVEIRA, E. K. B.; AZEVEDO, G. T. O.; BUCHMANN, H. M.; MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantio de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.
- BHANDARI, S. K.; VANEKLAAS, E. J.; MCCAW, L.; MAZANEC, R.; WHITFORD, K.; RENTON, M. Individual tree growth in jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest is explained by size and distance of neighbouring trees in thinned and non-thinned plots. **Forest Ecology and Management**, v. 494, 119364, 2021.
- BIANCHI, S.; HUUSKONEN, S.; SIIPILEHTO, J.; HYNYNEN, J. Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 1-7, 2020.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. 636p.
- CAMPOS, J. C. C.; RIBEIRO, J. O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento**: Minas Gerais. Brasília, DF: IBDF, 1984. 126p.
- CASAS, G. G.; FARDIN, L. P.; SILVA, S.; OLIVEIRA NETO, R. R. O.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, R. V.; DOMICIANO, C. A. R.; LOPES, L. S. S.; CRUZ, J. P.; REIS, T. L.; LEITE, H. G. Improving yield projections from early ages in eucalypt plantations with the Clutter model and artificial neural networks. **Science & Technology**, v. 30, n. 2, p. 1257-1272, 2022.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for Loblolly Pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, 354-371, 1963.
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- CURTO, R. D. A.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; CANETTI, A.; NETTO, S. P. Effectiveness of competition indices for understanding growth in an overstocked stand. **Forest Ecology and Management**, v. 477, p. 118472, 2020.

- DANTAS, D.; CALEGARIO, N.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; CARVALHO, S. P. C.; ISAAC JÚNIOR, M. A.; MELO, E. A. Multilevel nonlinear mixed-effects model and machine learning for predicting the volume of *Eucalyptus* spp. trees. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 48-57, 2020.
- DEMOLINARI, R. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 503-512, 2007.
- FARIAS, A. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Quantile regression: prediction of growth and yield for a eucalyptus plantation in northeast Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 983-989, 2021.
- FUKUMOTO, K.; NISHIZONO, T.; KITAHARA, F.; HOSODA, K. Evaluation of individual distance-independent diameter growth models for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) trees under multiple thinning treatments. **Forests**, v. 11, n. 3, p. 1–13, 2020.
- GAO, H.; CHEN, D.; SUN, X.; ZHANG, S. Modelling outer inner crown profiles based on tree status and cardinal direction in relation to competition for *Larix kaempferi* plantations in northeast China. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 1, p. 1412-1424, 2019.
- GONÇALVES, J. C.; CARVALHO, S. P. C.; OLIVEIRA, A. D.; GOMIDE, L. R. Comparação dos modelos prognósticos de Clutter e da função logística. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 311-317, 2016.
- IHS GLOBAL. EvIEWS 5: quantitative micro software. Version 5. Irvine: IHS Global, 2004.
- KAHRIMAN, A.; SAHIN, A.; SÖNMEZ, T.; YAVUZ, M. A novel approach to selecting a competition index: the effect of competition on individual tree diameter growth of Calabrian pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, n. 10, p. 1217-1226, 2018.
- KIMBERLEY, M. O.; WATT, M. S. A novel approach to modelling stand-level growth of an even-aged forest using a volume productivity index with application to new zealand-grown coast redwood. **Forests**, v. 12, n. 9, 1155, 2021.
- LAMBRECHT, F. R.; BALBINOT, R.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; CANETTI, A. Competição em floresta natural de araucária na região noroeste do Rio Grande do Sul - Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 131-138, 2019.

- OLIVEIRA, E. K. B.; REZENDE, A. V.; MAZZEI, L.; MURTA JÚNIOR, L. S.; CASTRO, R. V. O.; OLIVEIRA, M. V. N.; BARROS, Q. S. Competition indices after reduced impact logging in the Brazilian Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 281, 111898, 2021.
- PENIDO, T. M. A.; LAFETÁ, B. O.; NOGUEIRA, G. S.; ALVES, P. H.; GORGENS, E. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Modelos de crescimento e produção para a estimativa volumétrica em povoamentos comerciais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3340, 2020.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2021.
- RESENDE, R. T.; SOARES, A. A. V.; FORRESTER, D. I.; MARCATTI, G. E.; SANTOS, A. R.; TAKAHASHI, E. K.; SILVA, F. F.; GRATTAPAGLIA, D.; RESENDE, M. D. V.; LEITE, H. G. Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. **Forest Ecology and Management**, v. 410, p. 76-83, 2018.
- SALEKIN, S.; MASON, E. G.; MORGENROTH, J.; MEASON, D. F. A preliminary growth and yield model for *Eucalyptus globoides* Blakely plantations in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 50, n. 2, p. 1-15 2020.
- SALEKIN, S.; MASON, E. G.; MORGENROTH, J.; BLOOMBERG, M.; MEASON, D. F. Hybrid height growth and survival model for juvenile *Eucalyptus globoides* (Blakely) and *E. bosistoana* (F. Muell) in New Zealand. **Forest Ecology and Management**, v. 490, 119074, 2021.
- SCHONS, C. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANTOS, T. L.; NASCIMENTO, R. G. M. Índices de competição em nível de árvore individual para espécies da floresta ombrófila mista. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3275, 2020.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L. Eucalyptus growth and yield system: linking individual-tree and stand-level growth models in clonal eucalypt plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 1-16, 2019.
- SOARES, A. A. V.; SCOLFORO, H. F.; FORRESTER, D. I.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C. Exploring the relationship between stand growth, structure and growth dominance in *Eucalyptus* monoclonal plantations across a continent-wide

environmental gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, 118340, 2020.

WEBER, V. P.; FINGER, C. A. G.; COSTA, E. A.; ZIMMERMANN, A. P. L.; LONGHI, R. V. Modelagem linear generalizada para descrever o incremento em área transversal de árvores individuais de imbuia. **Floresta**, v. 48, n. 1, p. 123-132, 2018.