

DUBERLÍ GEOMAR ELERA GONZÁLES

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E ESPACIALIZAÇÃO DA
CAPACIDADE PRODUTIVA DE PLANTIOS DE BOLAINA (*Guazuma crinita*
Mart.) NA AMAZÔNIA CENTRAL PERUANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

E39m
2018
Elera Gonzáles, Duberlí Geomar, 1983-
Modelagem do crescimento e espacialização da capacidade
produtiva de plantios de bolaina (*Guazuma crinita* Mart.) na
Amazônia central peruana / Duberlí Geomar Elera Gonzáles. –
Viçosa, MG, 2018.
ix, 53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 46-53.

1. *Guazuma crinita*. 2. Árvores - Crescimento. 3. Florestas -
Manejo . 4. Produtividade. 5. Reflorestamento. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.9176168

DUBERLÍ GEOMAR ELERA GONZÁLES

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E ESPACIALIZAÇÃO DA
CAPACIDADE PRODUTIVA DE PLANTIOS DE BOLAINA (*Guazuma
crinita* Mart.) NA AMAZÔNIA CENTRAL PERUANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

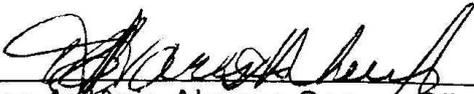
APROVADA: 20 de julho de 2018.



Helio Garcia Leite



Daniel Henrique Breda Binoti



Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro
(Orientador)

Para minha mãe Amelia (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família, que mesmo estando longe sempre me apoiaram na minha formação profissional, em especial aos meus irmãos Marcos, James e Kelvin, a minhas tias Eufemia e Martha.

À Universidade Federal de Viçosa, pela constante formação de profissionais de alto nível e pela oportunidade que brindam a cada período aos estrangeiros.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e ao pessoal administrativo, agradeço por cada ajuda oferecida.

À empresa Reforestadora Amazônica S.A. pela disponibilidade dos dados que permitiram a realização desse trabalho e que constituem um grande aporte para o setor florestal peruano.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa no segundo ano de mestrado a qual permitiu a finalização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro, que desde um primeiro momento disponibilizou-se em me brindar sua orientação e apoio na consecução do meu mestrado. Além da excelente amizade e bom trato recebido.

Ao Prof. Helio Garcia Leite, pelas constantes ajudas no desenvolvimento dessa dissertação e em todos os trabalhos feitos durante a minha estadia no mestrado. Obrigado por essas constantes dicas e tira-dúvidas e o mais importante pela amizade e conselhos pessoais e profissionais.

A todos os professores do DEF.

Ao Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho, pela amizade, ensinamentos e dicas no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos e amigas do Laboratório SIGMA – DEF: Nero, Lucas, Pedro, Renata, Rodrigo, Brener, Ingrid, Eduardo, Rafael, pelo constante apoio e por fazer desse espaço um excelente lugar de aprendizado, pela ótima amizade e por me fazer sentir como em casa.

Aos meus amigos do DEF: Jadson, Agust, Ivaldo, Epifania, Gabi, Fernanda, Thales, Lucas, Julia, Catia, pelos gratos momentos e por fazer da vida mais simples, divertida e original, obrigado pela ótima amizade.

Às amizades criadas no DEF, na UFV e em Viçosa nestes dois anos, sempre à disposição de ajudar e compartilhar bons momentos.

Aos amigos da republica Abdoulaye, Leonaro, Lucas, Fabiano, Alassane, Alison, Ingrid e em especial a Joashlenny, por ter me acolhido e pelo constante apoio profissional e pessoal.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado! Muchas Gracias!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Descrição e importância da espécie.....	5
3.2 Produtividade florestal.....	6
4 MATERIAL E MÉTODOS	8
4.1 Localização.....	8
4.2 Dados.....	9
4.3 Modelagem do crescimento.....	9
4.3.1 Modelos hipsométricos	9
4.3.2 Modelos volumétricos	11
4.3.3 Modelagem da capacidade produtiva	13
4.3.4 Modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento.....	16
4.4 Espacialização da capacidade produtiva	17
4.5 Avaliação de modelos.....	18
5 RESULTADOS.....	21
5.1 Altura individual das árvores	21
5.2 Volume individual das árvores.....	25
5.3 Capacidade produtiva.....	29
5.4 Produção em nível de povoamento	34
5.5 Capacidade produtiva.....	36
6 DISCUSSÕES.....	40
6.1 Modelagem do crescimento	40
6.2 Espacialização da capacidade produtiva	43
7 CONCLUSÕES	45
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ocorrência natural de <i>Guazuma crinita</i> Mart.....	6
Figura 2. Localização da área de estudo.	8
Figura 3. Sequência de procedimentos e análises desde a preparação dos dados até a obtenção dos resultados.	20
Figura 4. Altura total: valores observados (Ht) versus estimados (\widehat{Ht}).....	22
Figura 5. Altura total: resíduos versus valores estimados.....	23
Figura 6. Altura total: distribuição dos erros relativos percentuais.	24
Figura 7. Volume individual: valores observados (V) versus estimados (\widehat{V}).....	26
Figura 8. Volume individual: resíduos versus valores estimados (\widehat{V}).....	27
Figura 9. Volume individual: distribuição dos erros relativos percentuais.	28
Figura 10. Curvas de índices de local em função da Hd (esquerda) e do $dapd$ (direita) para as três equações apresentadas na Tabela 8.	30
Figura 11. Área Basal (acima) e Volume (embaixo): valores observados versus estimados, para os dois modelos de Clutter ajustados.	35
Figura 12. Métricas dos modelos testados na espacialização da capacidade produtiva.	36
Figura 13. Espacialização da capacidade produtiva de plantios de <i>G. crinita</i>	37
Figura 14. Classes da capacidade produtiva de plantios de <i>G. crinita</i>	38
Figura 15. Desvio padrão (SD) das predições da capacidade produtiva.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatísticas dos dados do IFC.....	9
Tabela 2. Estatísticas dos dados utilizados na modelagem da altura total das árvores	10
Tabela 3. Modelos hipsométricos avaliados	10
Tabela 4. Estatísticas dos dados utilizados na modelagem do volume individual das árvores.....	12
Tabela 5. Modelos de volumétricos avaliados	13
Tabela 6. Modelos para estimação do diâmetro e a altura dominante	14
Tabela 7. Equações para cálculo do índice de local em função da Hd e $dapd$	15
Tabela 8. Equações para calcular Hd e $dapd$ para cada modelo de S	16
Tabela 9. Estimativas de parâmetros dos modelos hipsométricos	21
Tabela 10. Métricas estatísticas dos modelos hipsométricos	22
Tabela 11. Estimativas de parâmetros dos modelos volumétricos.....	25
Tabela 12. Métricas estatísticas dos modelos volumétricos.....	26
Tabela 13. Estimativas de parâmetros dos modelos da <i>curva-guia</i>	29
Tabela 14. Métricas estatísticas dos modelos da <i>curva-guia</i>	29
Tabela 15. Limites de Hd para as três classes de local estabelecidos.....	32
Tabela 16. Limites de $dapd$ para as três classes de local estabelecidos.....	33
Tabela 17. Estimativas de parâmetros para os 2 modelos de Clutter.....	34
Tabela 18. Métricas estatísticas para os 2 modelos de Clutter.....	34
Tabela 21. Métricas estatísticas dos modelos de regressão utilizados na predição espacial da capacidade produtiva	36

RESUMO

GONZÁLES, Duberli Geomar Elera, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Modelagem do crescimento e espacialização da capacidade produtiva de plantios de bolaina (*Guazuma crinita* Mart.) na Amazônia central peruana.** Orientador: Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro.

Nos últimos quinze anos, plantios comerciais de *Guazuma crinita* Mart. (bolaina) têm sido implementados na Amazônia central peruana. No entanto, a realidade florestal do país indica que ainda há grandes lacunas no conhecimento sobre o manejo da espécie. O objetivo deste estudo foi modelar o crescimento e espacializar a capacidade produtiva de plantios de *Guazuma crinita* Mart. na Amazônia central peruana. Dados do inventário florestal contínuo (IFC), efetuado entre 2010 e 2016 em plantios comerciais, foram utilizados. Modelos hipsométricos, volumétricos, de índice de local em função da altura dominante (Hd) e diâmetro dominante ($dapd$) e, dois modelos de crescimento em nível de povoamento foram ajustados. O índice de local foi utilizado para estimar, espacializar e classificar capacidade produtiva na área de estudo, a través do uso de algoritmos de inteligência artificial. O modelo selecionado para estimar a altura individual das árvores resultou em: $LnHt = 1,495483 - 5,596162dap^{-1} + 0,128607Ln(dap.I) + 0,394984Lndapd$, no entanto os seis modelos ajustados geraram ajustes semelhantes e satisfatórios ($r^2 > 0,88$). Para estimar o volume individual das árvores a equação $LnV = -9,222158 + 2,096362Lndap + 0,604339Ln(Ht)$ com $r^2 = 0,9756$ foi selecionada. O modelo de Schumacher foi adotado para modelar o crescimento médio da Hd e $dapd$ e classificar a capacidade produtiva dos plantios de *G. crinita* em função ao índice de local. O ajuste dos modelos de Clutter gerou um $r^2 = 0,80$ para a Área Basal futura (B_2) e $r^2 = 0,87$ para o Volume futuro (V_2). Os resultados do ajuste dos modelos em nível de povoamento indicam que existe um efeito significativo e consistente da capacidade produtiva na área basal e que a relação funcional $Y = f(I, S, B)$ é adequada para os dados utilizados. O algoritmo *Random Forest* foi selecionado para espacializar a capacidade produtiva de *G. crinita* em função de: ano do plantio, coordenadas de localização das parcelas, NDVI e banda 5 da imagem LANDSAT-8 (2016), as bandas 2 e 5 da imagem LANDSAT-5 (2007), altitude e a distância vertical à rede de hídrica.

ABSTRACT

GONZÁLES, DuberlÍ Geomar Elera, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. **Modeling of growth and spatialization of the productive capacity of bolaina (*Guazuma crinita* Mart.) plantations on Peruvian central Amazon.** Adviser: Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro.

The last fifteen years, commercial plantations of *Guazuma crinita* Mart. (bolaina) were implemented in the central Peruvian Amazon. However, the country's forest reality indicates that there are still large gaps in knowledge about this species management. The objective of this study was to model the growth and spatialize the productive capacity of *Guazuma crinita* Mart. plantations in Peruvian central Amazon. Data from continuous forest inventory (IFC), conducted between 2010 and 2016 on commercial plantations, were used. Hypsometric and volumetric models, site index models as a function of dominant height (Hd) and dominant diameter ($dapd$), and two growth models at stand level were adjusted. With artificial intelligence algorithms, site index was used to estimate, spatialize and classify productive capacity in the study area. The selected model to estimate individual tree height resulted in: $LnHt = 1.495483 - 5.596162dap^{-1} + 0.128607Ln(dap.I) + 0.394984Lndapd$, however the six models generated similar and satisfactory adjustments ($r^2 > 0.88$). To estimate the individual tree volume, equation $LnV = -9.222158 + 2.096362Lndap + 0.604339Ln(Ht)$ with $r^2 = 0.9756$ was selected. The Schumacher model was adopted to estimate to Hd and $dapd$ average growth and to classify the productive capacity of *G. crinita* plantations as a function of site index. The fitted Clutter models generated a $r^2 = 0.80$ for the future Basal Area (B_2) and $r^2 = 0.87$ for the future Volume (V_2). The growth models at stand level results indicate that there is a significant and consistent effect of productive capacity (site index) on basal area and the functional relationship $Y = f(I, S, B)$ is adequate for the data used. The Random Forest algorithm was selected to spatialize the productive capacity of *G. crinita* as a function of: planting year, plot location coordinates, NDVI and band 5 of LANDSAT-8 image (2016), bands 2 and 5 of LANDSAT-5 image (2007), altitude and vertical distance to the channel network.

1 INTRODUÇÃO

No Peru, os primeiros esforços significativos de reflorestamento se deram com a introdução de pinus e eucaliptos (EVANS, 1992; GUARIGUATA et al., 2017). Entre os anos 1970 e 1980, iniciou-se o projeto florestal Porcón (Cajamarca), que atualmente se estende por 11.000 hectares reflorestados principalmente com pinus e eucaliptos, e a criação do Instituto Nacional Florestal e de Fauna (INFOR), que prioriza-se a execução de projetos florestais para consumo local e conservação de florestas, sendo plantados mais de 262.997 ha (GUARIGUATA et al., 2017; INRENA, 1997). Nas décadas de 1990 e 2000 os projetos florestais foram incentivados por instituições como a “Asociación Civil para la Investigación y Desarrollo Forestal – ADEFOR” e o “Fondo de Promoción del Desarrollo Forestal – FONDEBOSQUE” (DGFFS, 2011).

Desde a década de 80, o interesse científico na elaboração de estratégias apropriadas para fornecer múltiplos serviços ecossistêmicos é cada vez maior, a fim de atender à crescente demanda econômica por alta produtividade de madeira (KELTY, 2006; PAQUETTE e MESSIER, 2010). Pesquisas enfatizaram as vantagens potenciais das espécies arbóreas nativas em vez das exóticas (ERSKINE et al., 2006; PIOTTO et al., 2010), por terem maiores efeitos positivos no meio ambiente, prover serviços tradicionais aos proprietários de terras locais e exigir menos investimento financeiro (PLATH et al., 2011).

Plantações de espécies madeireiras nativas estabelecidas em pastagens antigas são uma estratégia potencial para reduzir a pressão madeireira nas florestas naturais remanescentes nos trópicos. O plantio de árvores nativas é, no entanto, percebido como uma atividade de risco devido ao conhecimento limitado de seu desempenho (PLATH et al., 2011) e porque os benefícios das plantações madeireiras só são alcançados a longo prazo (DAGANG e NAIR, 2003; GÜNTER et al., 2009).

Na Amazônia peruana as espécies mais utilizadas em plantios florestais são *Guazuma crinita* Mart., *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum. e *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (GUARIGUATA et al., 2017). A *G. crinita* tem um mercado nacional estabelecido, tratando-se de manejo florestal com elevado potencial para se tornar sustentável, contemplando a produção, processamento e comercialização por pequenos produtores (PUTZEL et al., 2013). A madeira para

serraria com ciclo de corte de 11 a 12 anos, alimenta os mercados internos em expansão com materiais de construção de baixo custo (PUTZ e ROMERO, 2015).

A *G. crinita* é uma espécie de rápido crescimento (IIAP, 2009; UGARTE et al., 2009), com uma taxa inicial de até 3 m por ano (MARUYAMA et al., 1997) e, elevada abundância natural, pois se beneficia com a abertura de grandes clareiras na floresta (IIAP, 2009). Esta espécie possui bom desempenho tanto em povoamentos adensados de até 1200 árvores por hectare (< 3 anos), quanto em povoamentos mais abertos de até 500 árvores por hectare ($dap \geq 25$ cm) após o desbaste, visando à produção de madeira para serraria (RUIZ PÉREZ e ARNOLD, 1995).

A realidade florestal peruana indica que ainda há grandes lacunas no conhecimento sobre a espécie como: seleção genética, a produção de mudas, o manejo florestal, o desenvolvimento de produtos, etc. Grande parte do fracasso das plantações promovidas pelo Governo é devida à falta de atenção dada à seleção das espécies em função da capacidade produtiva do local, à má qualidade das mudas e à ausência de planos adequados de prevenção contra incêndios, pragas ou invasões (GUARIGUATA et al., 2017).

O conceito de capacidade produtiva refere-se a uma estimativa quantitativa do potencial de um local para produzir biomassa vegetal (madeira ou outro produto) para determinada espécie ou clone (CAMPOS e LEITE, 2017; SKOVSGAARD e VANCLAY, 2013). Está baseado na noção de “site” que geralmente designa e resume as características biofísicas locais de um ambiente florestal (CAMPOS e LEITE, 2017). O potencial produtivo de um local também é denominado "qualidade do local" (ASSMANN, 1970). Indicadores baseados no incremento médio anual de volume por hectare de um talhão, por exemplo, em uma determinada idade fixa ou seu máximo durante o período do ciclo produtivo, são utilizados como medidas típicas da produtividade do local (ASSMANN, 1970; SKOVSGAARD e VANCLAY, 2013).

Na maioria dos casos, os silvicultores têm de lidar com dados brutos e multidimensionais que são fortemente não-lineares, além de não atender aos pressupostos dos procedimentos estatísticos convencionais (RECKNAGEL, 2001). Ferramentas de inteligência artificial (IA) têm sido cada vez mais adotadas nos últimos 20 anos para superar problemas relacionados à falta de suposições estatísticas. Outras vantagens das IA's é serem capazes de lidar com a não normalidade, a não

linearidade e a colinearidade em um sistema (NUNES e GÖRGENS, 2016). Diversas pesquisas aplicadas à área florestal e especificamente ao modelamento espacial da produtividade, que empregam algoritmos de inteligência artificial têm sido desenvolvidas nos últimos anos (EVANS e CUSHMAN, 2009; LEITE et al., 2011; PENG e WEN, 1999; WEISKITTEL et al., 2011).

No presente estudo são geradas informações inéditas acerca do crescimento de *G. crinita* em plantios comerciais na Amazônia central Peruana, além disso, por meio do uso de inteligência artificial e sistemas de informação geográfica foi gerado um modelo para espacializar a capacidade produtiva de plantios florestais da espécie.

2 OBJETIVO

Modelar o crescimento e espacializar a capacidade produtiva de plantios comerciais de *Guazuma crinita* Mart. na região da Amazônia central Peruana.

Entre os objetivos específicos tem-se:

- Ajustar modelos hipsométricos para estimação da altura das árvores;
- Ajustar modelos volumétricos para cálculo do volume das árvores;
- Construir curvas de índice de local para classificação da capacidade produtiva dos plantios na área de estudo;
- Ajustar um modelo de crescimento e produção para a estimação da produtividade, em termos de área basal e volume de madeira por hectare, aos 8 anos de idade;
- Selecionar variáveis biofísicas que influenciam na capacidade produtiva dos plantios florestais de *G. crinita*;
- Ajustar e selecionar modelos de regressão e predição para a estimação da capacidade produtiva de *G. crinita* considerando as variáveis biofísicas mais significativas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descrição e importância da espécie

A *G. crinita* é encontrada na região Neotropical, desde a América Central até a Amazônia brasileira e boliviana, em altitudes de até 1500 m acima do nível do mar (Figura 1). É uma espécie abundante na Amazônia peruana, em locais com precipitação pluviométrica constante e bem distribuída, embora ocorra também em áreas com uma estação seca definida (REYNEL et al., 2003).

G. crinita é uma espécie heliófita e pioneira que ocorre em solos muito ricos em nutrientes, nas margens de rios e córregos (KVIST e NEBEL, 2001; PARODI e FREITAS, 1990; UGARTE et al., 2009), em florestas secundárias, em ravinas e em áreas não propensas a inundações (IIAP, 2009). Sua abundância é maior em proximidade de estradas e áreas com perturbação antropogênica. Áreas preparadas para culturas agrícolas constituem locais ideais para a espécie (PUTZEL et al., 2013).

Em geral, a *G. crinita* cresce em solos siltosos até arenosos, muitas vezes de baixa fertilidade e às vezes, em solos com alta quantidade de rochas, não tolerando inundações permanentes (REYNEL et al., 2003).

A alta comercialização internacional de madeiras valiosas, incentivou o uso local e facilitou a abertura do mercado nacional para madeira de *G. crinita*, utilizada principalmente na fabricação de casas de baixo custo (PUTZEL et al., 2013), embalagens, palets, moveis e rodapés. Entre os anos 2004 e 2009 a produção de madeira roliça de *G. crinita* teve um incremento de até 500% (IIAP, 2009). Em 2011, segundo estatísticas oficiais do Ministério de Agricultura, *G. crinita* destacou-se entre as 20 principais espécies madeireiras comercializadas no Peru (PUTZEL et al., 2013).

No final da década de 1990 e início de 2000, nas regiões de Huánuco e Ucayali, diversas empresas tem desenvolvido plantios comerciais de *G. crinita* com espaçamentos iniciais de 3 x 3 m (1111 árvores ha⁻¹), com o objetivo de obter madeira para serraria em ciclos de 8 a 10 anos. Atualmente, novos usos como: mourões e postes tratados, madeira estrutural e elaboração de moveis de alta qualidade para se comercializar no mercado nacional estão sendo explorados. Na atualidade *G. crinita* é a espécie de com a maior área plantada na Amazônia central Peruana.

As informações quantitativas e qualitativas de povoamentos florestais, utilizadas em estudos de mensuração e manejo florestal, são obtidas a partir do inventário florestal (CAMPOS e LEITE 2017). O inventário é a base para o planejamento do uso dos recursos florestais (OLIVEIRA, 2011) e possibilita estimar o volume e outras variáveis com a precisão desejada e custo que viabilizem a produção (MELLO et al., 2006). Os objetivos do inventário são estabelecidos de acordo com a utilização da área, podendo ser recreação, reserva florestal, manutenção da vida silvestre, reflorestamento comercial, entre outros. Em florestas para fins madeireiros, o inventário florestal visa determinar ou estimar variáveis como, área basal, volume, qualidade do fuste, estado fitossanitário, classe de copa e potencial de crescimento da espécie florestal (OLIVEIRA, 2011).

A movimentação de máquinas, equipe de colheita e transporte florestal, assim como equipe de silvicultura, é definida por meio das informações de produtividade de cada povoamento florestal (DINIZ, 2007). O potencial produtivo de um local é a capacidade que um determinado local possui de produzir madeira e/ou outros produtos (CAMPOS e LEITE 2017), e está diretamente relacionado com características ambientais (climáticas e edáficas), que atendam às exigências ecológicas de uma determinada espécie ou genótipo (KEOGH, 2009), bem como a fatores relacionados ao manejo e a gestão (SKOVSGAARD e VANCLAY, 2008). O clima condiciona a possibilidade de adaptação e de cultivo, enquanto o solo regula o nível de produção (GOLFARI et al., 1978).

Os sistemas de suporte à decisão que incorporam o potencial produtivo do local são imprescindíveis na escolha de locais apropriados (sites) ao cultivo de espécies florestais (DIAS et al., 2005). O uso de geotecnologias como sistemas de informações geográficas (SIG), sensoriamento remoto (SR) e ferramentas de análise espacial (estatística espacial e geoestatística) são imprescindíveis para a condução de estudos que envolvem muitas variáveis ambientais e suas interrelações (ORTIZ et al., 2006).

O estudo das relações entre a capacidade produtiva de povoamentos florestais e de atributos biofísicos como o solo e o relevo, isto é, do potencial produtivo e das principais limitações à produção de uma determinada área ou região, torna-se essencial quando se tem como objetivo o manejo racional da floresta e do ambiente, visando a produtividade sustentável ótima (ORTIZ et al., 2006).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização

Os plantios florestais de *G. crinita*, cujos dados são utilizados neste estudo, estão localizados entre os paralelos 9°22'0,32" e 9°41'52,60" S e os meridianos 74°51'03,18" e 75°02'33,18" O, entre os territórios dos distritos de Puerto Inca e Yuyapichis, na província de Puerto Inca, região Huánuco, na Amazônia central peruana (Figura 2). A zona dos plantios apresenta altitudes que variam entre 180 e 500 m, temperatura média anual de 27°C, umidade relativa média anual de 85%. A precipitação anual varia entre 2.000 a 3.000 mm, com maior intensidade de chuvas entre os meses de novembro a março. Segundo a classificação de zonas de vida de Holdridge (1967), os plantios se encontram numa região compreendida por floresta úmida tropical (bh-T), floresta muito úmida tropical (bmh-T) e floresta muito úmida tropical transicional (bmh-TT).

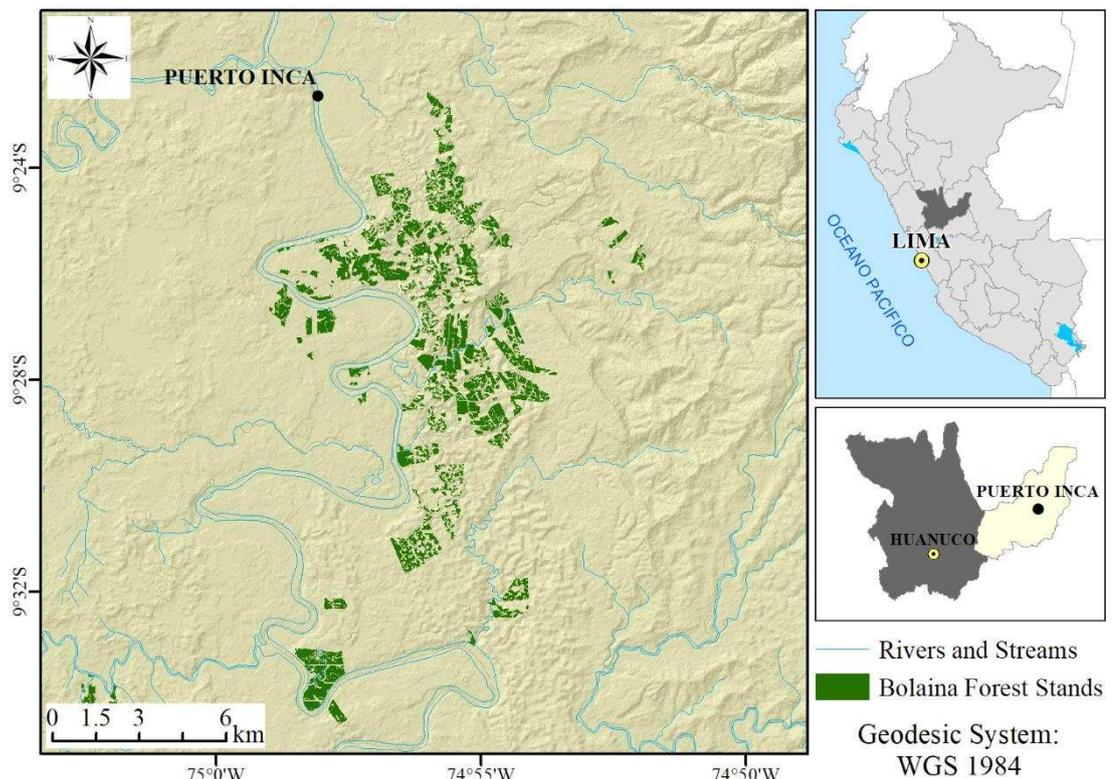


Figura 2. Localização da área de estudo.

4.2 Dados

Dados de crescimento provenientes das medições de parcelas de inventário florestal contínuo (IFC) efetuadas no período de 2010 a 2016 foram utilizados. O banco de dados continha, para cada uma das 690 parcelas, informações do código de talhão, número, área e coordenadas geográficas da parcela, data do plantio, idade, número de árvores por parcela, diâmetro medido a 1,3 m de altura (*dap*) e *dap* dominante (*dapd*) (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas dos dados do IFC

Variável	Mín.	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máx.	
Idade (anos)	403	866	948	954	1057	1509	
≤ 2	<i>dap</i>	0,5	5,4	7,6	7,7	9,9	19,0
	<i>dapd</i>	3,9	8,0	10,6	10,2	12,2	16,7
2 a 4	<i>dap</i>	0,6	10,2	12,5	12,3	14,7	26,6
	<i>dapd</i>	5,2	14,9	16,3	16,3	18,0	24,0
4 a 6	<i>dap</i>	2,0	12,4	15,5	15,3	18,3	30,7
	<i>dapd</i>	12,1	18,7	20,3	20,0	21,7	26,6
> 6	<i>dap</i>	3,7	15,5	18,9	18,4	21,7	31,4
	<i>dapd</i>	14,4	22,0	23,7	23,1	24,7	28,8

4.3 Modelagem do crescimento

4.3.1 Modelos hipsométricos

Informações de inventário florestal realizado no primeiro trimestre de 2016 foram selecionadas para a modelagem da altura individual das árvores. Dados de 5.470 árvores com informações de *dap*, *dapd*, altura total (*Ht*) e idade (*I*) foram utilizados para esse propósito. Essas informações correspondem a 632 parcelas distribuídas em toda a área de estudo. Um hipsômetro SUUNTO foi utilizado para medir as alturas de até 9 árvores por parcela. As estatísticas dos dados utilizados são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Estatísticas dos dados utilizados na modelagem da altura total das árvores

Estatística	<i>I</i> (anos)	<i>dap</i> (cm)	<i>dapd</i> (cm)	<i>ht</i> (m)
Mínimo	0,800	1,30	6,70	1,80
1° Quartil	3,200	11,10	16,80	12,70
Mediana	4,200	15,60	19,60	16,80
Média	4,30	15,39	19,41	16,43
3° Quartil	5,50	19,50	22,60	20,50
Máximo	8,10	30,80	27,80	30,00

A base de dados utilizada foi dividida em dados de ajuste (65 %) e validação (35 %). Seis modelos hipsométricos foram testados (Tabela 3) e a altura total das árvores foi estimada pela relação $Ht = f(dap, dapd, I)$.

Tabela 3. Modelos hipsométricos avaliados

N°	Modelo	Equação
1	$LnHt = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \beta_2 Ln(dap.I) + \beta_3 I + \varepsilon$	Eq. 1
2	$LnHt = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \beta_2 Ln(dap.I) + \beta_3 Lndapd + \varepsilon$	Eq. 2
3	$LnHt = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \beta_2 LnI + \beta_3 Lndapd + \varepsilon$	Eq. 3
4	$Ht = \frac{\beta_0}{1 + \exp\left(\frac{\beta_1 - Ln(dapd.I) * dap}{\beta_2}\right)} + \varepsilon$	Eq. 4
5	$Ht = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \beta_2 dapd^{-1} + \beta_3 Ln(dapd.I) + \varepsilon$	Eq. 5
6	$LnHt = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \beta_2 Ln(dapd.I) + \varepsilon$	Eq. 6

Fonte: Adaptado de Campos e Leite (2017)

em que

Ht = altura total da árvore, em m.

dap = diâmetro medido a 1,3 m de altura, em cm.

$dapd$ = dap dominante, em cm, calculado em função da média dos diâmetros das 100 maiores árvores em um hectare.

I = idade do plantio, em anos.

β_i = parâmetros dos modelos ($i = 0,1,2,3$).

ε = erro aleatório.

4.3.2 Modelos volumétricos

Dados de cubagem rigorosa de 399 árvores foram utilizados para modelar o volume do fuste. A base de dados era composta por informações da idade, dap , Ht e volume (V), obtidas de árvores procedentes de desbastes e colheitas realizadas nos plantios da área de estudo no ano 2016. A medição do dap foi feita com as árvores em pé; em seguida as árvores foram colhidas e cortadas em seções de 2,5 m de comprimento. As medições dos dois diâmetros de cada seção foram feitas e o volume calculado aplicando-se a fórmula de Smalian (Eq. 7), exceto a última tora (extremidade superior), cujo volume foi calculado com a fórmula do Tronco de Cone (Eq. 8). O volume total da árvore foi igual à soma dos volumes de todas as toras da árvore. As estatísticas dos dados utilizados são apresentadas na Tabela 4.

$$V_i = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) L = \frac{\pi}{80.000} (d_1^2 + d_2^2) \cdot L \quad \text{Eq. 7}$$

$$V_n = \frac{(g_1 + \sqrt{g_1 * g_2} + g_2) L}{3} = \frac{\pi}{120.000} (d_1^2 + d_1 \cdot d_2 + d_2^2) \cdot L \quad \text{Eq. 8}$$

em que

$V_{i,n}$ = volume da tora i e da última tora n respectivamente, em m^3 .

g_i = área seccional, dada por $g_i = \frac{\pi d_i^2}{40.000}$, em m^2 .

d_i = diâmetro inicial (1) e final (2) de cada tora, em cm.

L = comprimento de cada tora, em m.

Tabela 4. Estatísticas dos dados utilizados na modelagem do volume individual das árvores

Estatística	<i>I</i> (anos)	<i>dap</i> (cm)	<i>Ht</i> (m)	<i>V</i> (m^3)
Mínimo	3,200	4,70	6,15	0,006889
1° Quartil	3,700	12,20	14,75	0,090268
Mediana	6,500	15,90	17,75	0,187813
Média	5,834	16,28	18,03	0,236811
3° Quartil	6,500	20,15	21,26	0,325790
Máximo	8,400	29,10	28,15	0,835943

Para a modelagem do volume das árvores, a base de dados contendo as informações das 399 árvores foi dividida em dados de ajuste das equações (70 %) e validação (30%). Seis modelos volumétricos foram testados (Tabela 5). O volume do fuste das árvores foi estimado pela relação $V = f(dap, Ht)$.

Tabela 5. Modelos de volumétricos avaliados

Nº	Modelo	Equação
1	$V = \beta_0 dap^2 Ht + \varepsilon$	Eq. 9
2	$LnV = \beta_0 + \beta_1 Lndap + \beta_2 Ln(Ht) + \varepsilon$	Eq. 10
3	$V = \beta_0 dap^{\beta_1} + \varepsilon$	Eq. 11
4	$V = \beta_0 + \beta_1 dap^2 Ht + \varepsilon$	Eq. 12
5	$V = \beta_0 + (dap^2 Ht)^{\beta_1} + \varepsilon$	Eq. 13
6	$V = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \beta_3 Ht + \varepsilon$	Eq. 14

Fonte: Campos e Leite (2017); Soares et al. (2012).

em que

V = altura total da árvore, em m.

Ht = altura total da árvore, em m.

dap = diâmetro medido a 1,3 m de altura, em cm.

β_i = parâmetros dos modelos ($i = 0,1,2,3$).

ε = erro aleatório.

4.3.3 Modelagem da capacidade produtiva

Com a aplicação do melhor modelo hipsométrico e volumétrico na base de dados do IFC, as alturas e os volumes individuais de todas as árvores foram estimadas. A base de dados foi então complementada com o cálculo da área seccional (AS) das árvores e a altura dominante (Hd) de cada parcela. A variável Hd foi calculada como a média das Ht das 100 maiores árvores em um hectare; o número de árvores dominantes foi definido por uma regra de três entre a área da parcela e 10.000 m². Finalmente as informações por parcela foram calculadas.

O índice de local foi utilizado para classificar a capacidade produtiva, por representar um método direto de classificação (CAMPOS e LEITE, 2017; SOARES et al., 2012). Modelos de regressão envolvendo a relação do *dapd* e *Hd* com a idade foram ajustados, em que as equações resultantes representam a curva média de índices de local, também denominada de *curva-guia*. Para o ajuste das equações da *curva-guia* em função do *dapd* e *hd*, dados de 499 parcelas contendo de 3 a 8 medições e com idades variando entre 0,9 e 8,1 anos foram utilizados. A base de dados foi dividida em dados de ajuste das equações (65%) e validação (35%). A separação desses dados levou em consideração a seleção completa de parcelas com suas respectivas medições. Os modelos de Schumacher (Eq. 15), Chapman-Richards (Eq. 16) e Logístico (Eq. 17) foram testados (Tabela 6).

Tabela 6. Modelos para estimação do diâmetro e a altura dominante

Nº	Modelo	Equação
1	$Ln(Hd) \text{ ou } Ln(dapd) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I}\right) + \varepsilon$	Eq. 15
2	$Hd \text{ ou } dapd = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 I})^{\beta_2} + \varepsilon$	Eq. 16
3	$Hd \text{ ou } dapd = \frac{\beta_0}{1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - I}{\beta_2}\right)}} + \varepsilon$	Eq. 17

Fonte: Campos e Leite (2017).

em que

Hd = altura dominante por parcela, em m.

dapd = diâmetro dominante por parcela, em cm.

I = idade do plantio, em anos.

β_i = parâmetros dos modelos ($i = 0,1,2$).

ε = erro aleatório.

Após o ajuste das equações da *curva-guia* para *dapd* e *Hd* (Tabela 6) e considerando a definição de índice de local (BURKHART e TOMÉ, 2012; WEST, 2015), em que a altura dominante é igual ao índice de local quando a idade (*I*) do povoamento é igual à idade-índice (*I_i*), as equações apresentadas na Tabela 7 foram utilizadas para calcular um índice de local para cada equação ajustada (6 no total) e para cada uma das parcelas que compõem a base de dados do IFC. Uma idade-índice de 7 anos foi estabelecida.

Tabela 7. Equações para cálculo do índice de local em função da *hd* e *dapd*

Nº	Fórmula	Equação
1	$LnS_i = Ln(y) - \beta_1 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_i} \right)$	Eq. 18
2	$S_i = y \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 I_i}}{1 - e^{-\beta_1 I}} \right)^{\beta_2}$	Eq. 19
3	$S_i = \frac{y \left(1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - I}{\beta_2} \right)} \right)}{\left(1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - I_i}{\beta_2} \right)} \right)}$	Eq. 20

em que

y = *Hd* por parcela, em m ou *dapd* por parcela, em cm.

S_i = índice de local (*i* = 1,2,3,4,5,6).

I = idade do plantio, em anos.

I_i = idade índice (7 anos).

β_i = parâmetros dos modelos (*i* = 1,2).

As equações apresentadas na Tabela 8 foram utilizadas para calcular a *Hd* e o *dapd* para cada índice de local (*S*). Valores de *S* entre 16 e 26 m foram definidos e curvas entre 1 e 8 anos foram construídas.

Tabela 8. Equações para calcular *Hd* e *dapd* para cada modelo de *S*

Nº	Fórmula	Equação
1	$Ln(y) = LnS + \beta_1 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_i} \right)$	Eq. 21
2	$y = S \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 \cdot I}}{1 - e^{-\beta_1 \cdot I_i}} \right)^{\beta_2}$	Eq. 22
3	$y = \frac{S \left(1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - I_i}{\beta_2} \right)} \right)}{\left(1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - I}{\beta_2} \right)} \right)}$	Eq. 23

em que

$y = Hd$ por parcela, em m ou $dapd$ por parcela, em cm.

S_i = índice de local ($i = 1,2,3,4,5,6$).

I = idade do plantio, em anos.

I_i = idade índice (7 anos).

β_i = parâmetros dos modelos ($i = 1,2$).

Em seguida, a partir da seleção da melhor equação de índice de local (para *Hd* e *dapd*), tabelas com os limites de alturas dominantes (Tabela 15) e diâmetros dominantes (Tabela 16Tabela 15) para cada classe de local e para as idades de 1 a 8 anos foram geradas.

4.3.4 Modelagem do crescimento e produção em nível de povoamento

Para estimar o crescimento e produção em nível de povoamento, o modelo de Clutter (Eq. 24) foi ajustado, tendo-se empregado o método dos mínimos quadrados em dois estágios. O ajuste do modelo foi realizado no R, versão 3.4.4 (R CORE TEAM, 2018), pacote “*systemfit*” (HENNINGSEN e HAMANN, 2007). Ao final, um

modelo em nível de povoamento para os dois melhores índices de local (S) gerados (1 S em função da Hd e 1 S em função do $dapd$) foi ajustado.

$$\begin{cases} \ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right) + \beta_2 S_i + \beta_3 \ln B_2 + \ln \varepsilon \\ \ln(B_2) = \ln B_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S_i + \ln \varepsilon \end{cases} \quad \text{Eq. 24}$$

em que

I_1 = idade atual ou corrente, em anos.

I_2 = idade futura, em anos.

B_1 = área basal inicial ou corrente, em $m^2 \text{ ha}^{-1}$.

B_2 = área basal futura, em $m^2 \text{ ha}^{-1}$.

V_1 = volume atual ou corrente, em $m^3 \text{ ha}^{-1}$.

V_2 = volume futura, em $m^3 \text{ ha}^{-1}$.

S_i = índice de local na idade atual para os 2 melhores índices de local calculados, ($i = 1,2$).

β_i e α_i = parâmetros do modelo a serem estimados.

ε = erro aleatório.

4.4 Espacialização da capacidade produtiva

O melhor modelo de índice de local ajustado para as variáveis $dapd$ e Hd (Eq. 18, Eq. 19, Eq. 20) foi selecionado para efetuar a espacialização da capacidade produtiva na área de estudo em função de variáveis biofísicas. Um modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC) com uma resolução espacial de 30 m foi gerado e, a partir dele, diferentes variáveis do terreno foram derivadas fazendo uso do software SAGA – módulo análise de terreno (CONRAD et al., 2015). O conjunto de variáveis biofísicas foi complementado com dados espectrais e dados do

zoneamento ecológico-econômico (ZEE) do departamento de Huánuco, Peru. Imagens de satélite dos anos 2007 (antes do estabelecimento dos plantios) e 2016 (depois da última medição dos plantios) dos sensores Landsat 5 e Landsat 8, respectivamente, foram obtidas e, a partir delas, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi calculado para as duas imagens. Finalmente a base de dados para espacialização foi preparada com 77 possíveis variáveis explicativas, incluídos o ano e mês de plantio, além das coordenadas de localização das parcelas. Todas as 77 variáveis foram geradas em formato raster.

O pacote “*labgeo*” (FILHO, n.d.) do software R (R CORE TEAM, 2018) foi utilizado para a seleção do melhor modelo que permita especializar a produtividade de *G. crinita* na área de estudo. Esse procedimento seguiu os seguintes passos: (1) extração dos valores das 77 possíveis variáveis explicativas em função da localização das parcelas, (2) eliminação das variáveis explicativas altamente correlacionadas, (3) partição da base de dados em treino (75%) e validação (25%), (4) ranqueamento e seleção das variáveis explicativas de maior importância a serem utilizadas na modelagem, (5) aplicação de quatro modelos de regressão: *Cubist*, *Stochastic Gradient Boosting* (gbm), *Linear Regression* (lm) e *Random Forest* (rf), nos dados de treino; (6) avaliação da performance dos quatro modelos nos dados de validação e seleção do melhor modelo, (7) aplicação do modelo selecionado para a predição do valor do índice de local para cada pixel do raster na área de estudo (*esse passo foi repetido 50 vezes, de modo que a cada repetição a base de dados era dividida em dados de treino e validação*), e (8) cálculo da média e desvio padrão dos 50 rasters gerados.

4.5 Avaliação de modelos

A seleção dos melhores modelos de regressão e predição utilizados neste estudo foi realizada a través da avaliação da raiz quadrada do erro quadrático médio (Eq. 25), coeficiente de determinação (Eq. 26), erro absoluto médio (Eq. 27) e dos erros relativos percentuais (Eq. 28), calculados a partir da aplicação dos modelos nos dados de validação. Além da avaliação das métricas mencionadas, realizou-se uma avaliação dos gráficos de valores observados *versus* valores preditos, erros *versus* valores preditos e a distribuição de frequências dos erros relativos percentuais.

- Raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Eq. 25}$$

- Coeficiente de determinação (r^2)

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Eq. 26}$$

- Erro absoluto médio (*MAE*)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad \text{Eq. 27}$$

- Erro relativo porcentual (*ER%*)

$$ER\% = \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. 28}$$

em que

y_i = valor observado.

\hat{y}_i = valor estimado pelo modelo.

n = número de observações utilizadas na validação.

Um resumo da metodologia aplicada no presente trabalho é apresentado no fluxograma detalhado na Figura 3.

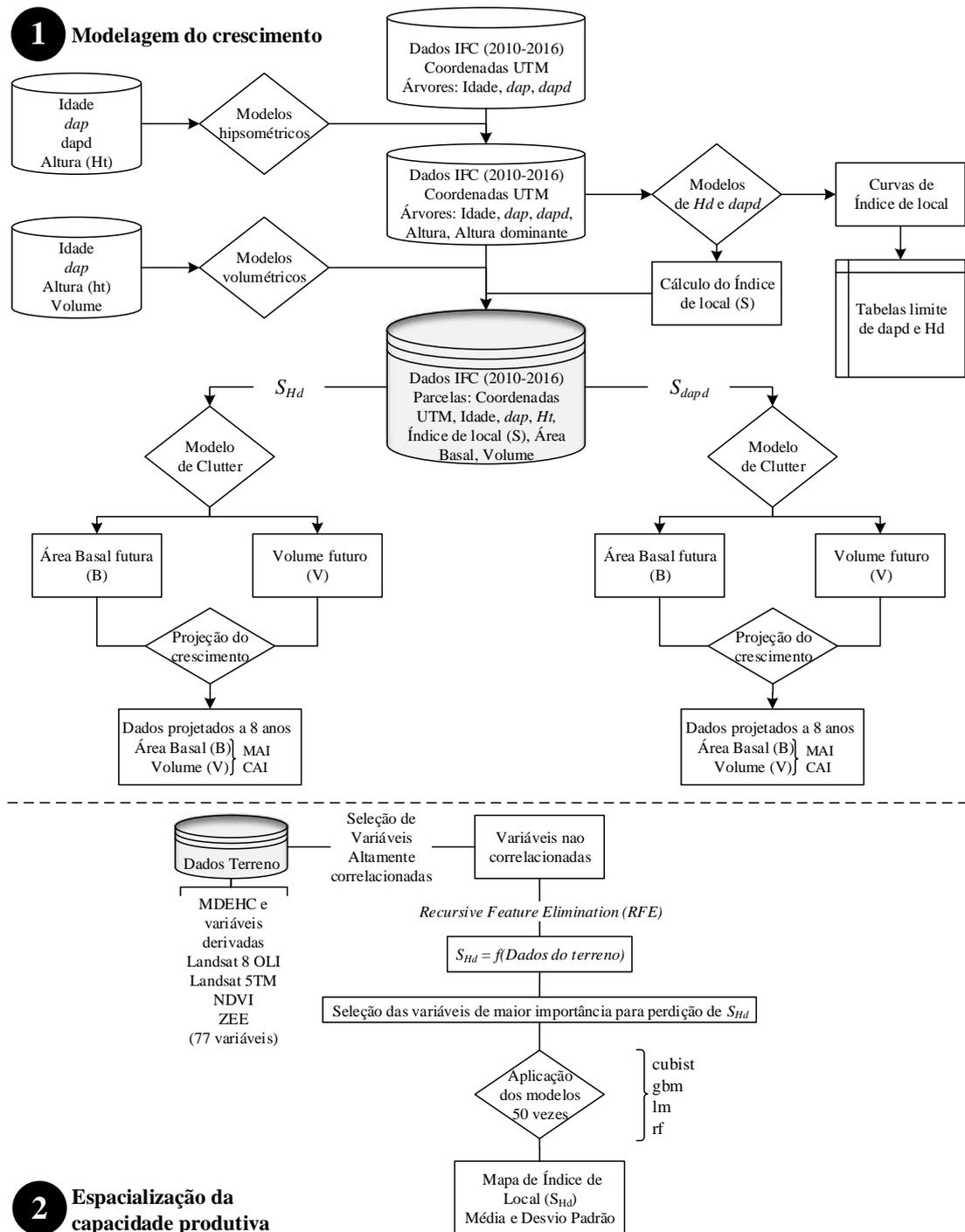


Figura 3. Sequência de procedimentos e análises desde a preparação dos dados até a obtenção dos resultados.

5 RESULTADOS

5.1 Altura individual das árvores

A seguir são apresentados as estimativas dos modelos para estimação da altura individual das árvores (Tabela 9), as métricas estatísticas ou medidas de precisão (Tabela 10), gráficos de valores observados versus preditos (Figura 4) e gráficos de resíduos versus valores estimados (Figura 5), obtidos com a aplicação dos modelos nos dados de validação.

Tabela 9. Estimativas de parâmetros dos modelos hipsométricos

Nº	Equação	β_0	β_1	β_2	β_3
1	Eq. 1	1,344731	-2,364122	0,449058	-0,051821
2	Eq. 2	1,495483	-5,596162	0,128607	0,394984
3	Eq. 3	1,857086	-7,226357	0,117817	0,434833
4	Eq. 4	25,45011	45,82786	29,96022	
5	Eq. 5	3,105629	-7,208420	-5,991199	0,118974
6	Eq. 6	2,415039	-7,558966	0,210682	

Tabela 10. Métricas estatísticas dos modelos hipsométricos

Nº	Equação	<i>RMSE</i>	r^2	<i>MAE</i>
1	Eq. 1	1,9136	0,8818	1,4874
2	Eq. 2	1,8501	0,8895	1,4365
3	Eq. 3	1,8688	0,8873	1,4525
4	Eq. 4	1,9271	0,8804	1,5208
5	Eq. 5	1,8652	0,8879	1,4561
6	Eq. 6	1,8994	0,8836	1,4819

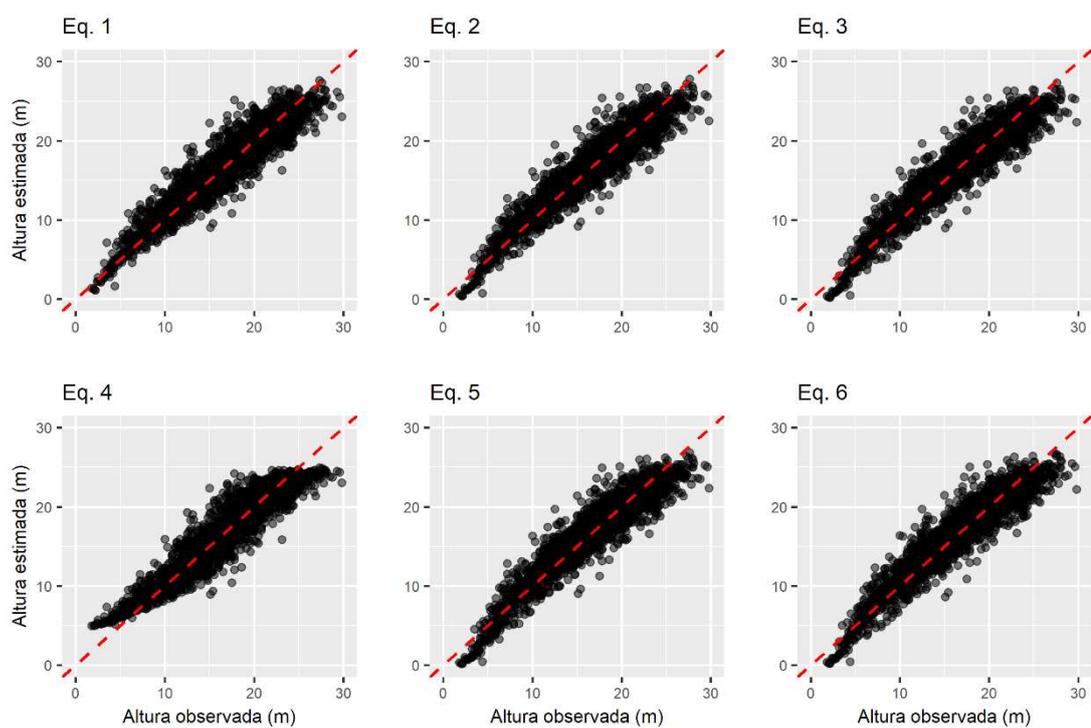


Figura 4. Altura total: valores observados (H_t) versus estimados (\widehat{H}_t).

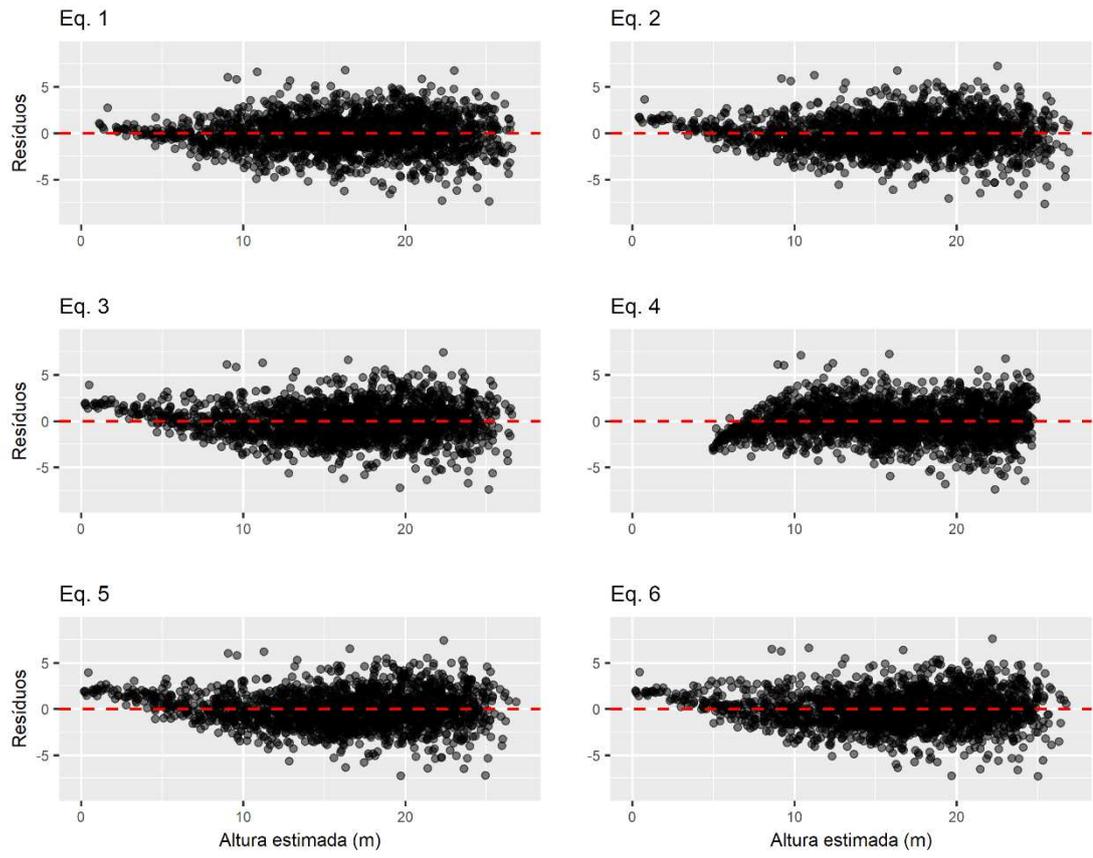


Figura 5. Altura total: resíduos versus valores estimados.

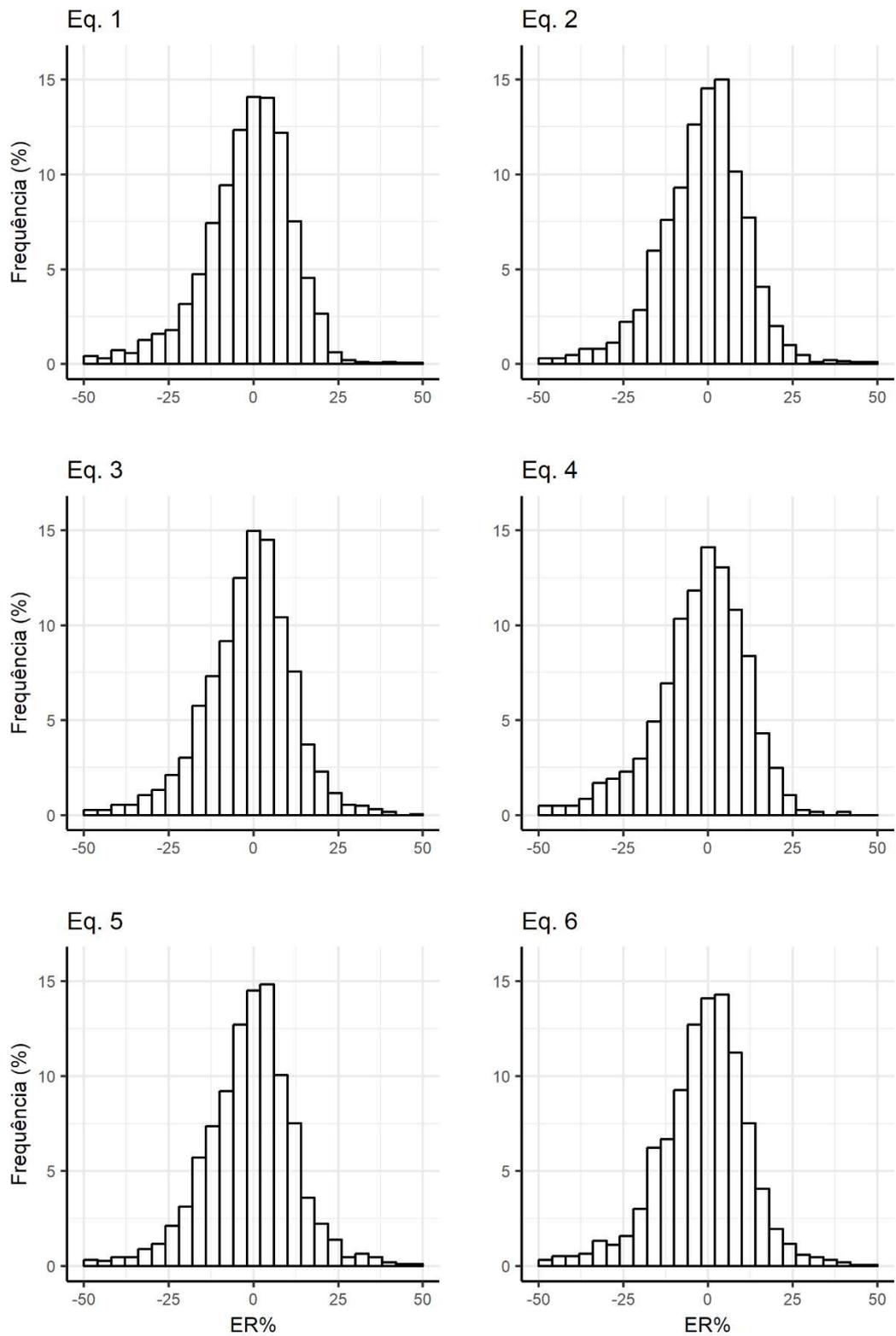


Figura 6. Altura total: distribuição dos erros relativos percentuais.

A maioria dos modelos apresentou ajustes satisfatórios. Segundo a avaliação das métricas calculadas e dos gráficos gerados, o modelo 2 (Eq. 2) foi selecionado como o melhor para estimar a altura individual das árvores, resultando em:

$$\ln Ht = 1,495483 - 5,596162dap^{-1} + 0,128607\ln(dap.I) + 0,394984Lndapd$$

$$Ht = e^{1,495483-5,596162dap^{-1}+0,128607\ln(dap.I)+0,394984Lndapd} \quad \text{Eq. 29}$$

$$RMSE = 1,8501; r^2 = 0,8895; MAE = 1,4365$$

A expressão matemática do melhor modelo hipsométrico (Eq. 29) foi utilizada para calcular a altura de todas as árvores nos dados do IFC.

5.2 Volume individual das árvores

A modelagem do volume individual das árvores gerou as estimativas dos seis modelos testados (Tabela 11) e o melhor modelo foi selecionado pela avaliação das métricas estatísticas (Tabela 12), dos gráficos de valores observados versus preditos (Figura 7) e dos gráficos de resíduos versus valores estimados (Figura 8), obtidos com a aplicação dos modelos nos dados de validação.

Tabela 11. Estimativas de parâmetros dos modelos volumétricos

Nº	Equação	β_0	β_1	β_2	β_3
1	Eq. 9	$3,868 \times 10^{-5}$			
2	Eq. 10	-9,222158	2,096362	0,604339	
3	Eq. 11	$2,209 \times 10^{-4}$	2,442150		
4	Eq. 12	$1,284 \times 10^{-2}$	$3,738 \times 10^{-5}$		
5	Eq. 13	$7,114 \times 10^{-5}$	0,934805		
6	Eq. 14	$1,376 \times 10^{-2}$	$-2,317 \times 10^{-2}$	$1,443 \times 10^{-3}$	$9,830 \times 10^{-3}$

Tabela 12. Métricas estatísticas dos modelos volumétricos

Nº	Equação	<i>RMSE</i>	r^2	<i>MAE</i>
1	Eq. 9	0,031295	0,9722	0,020875
2	Eq. 10	0,028307	0,9756	0,019820
3	Eq. 11	0,038940	0,9537	0,026015
4	Eq. 12	0,030161	0,9722	0,020717
5	Eq. 13	0,029508	0,9733	0,019838
6	Eq. 14	0,030522	0,9715	0,021731

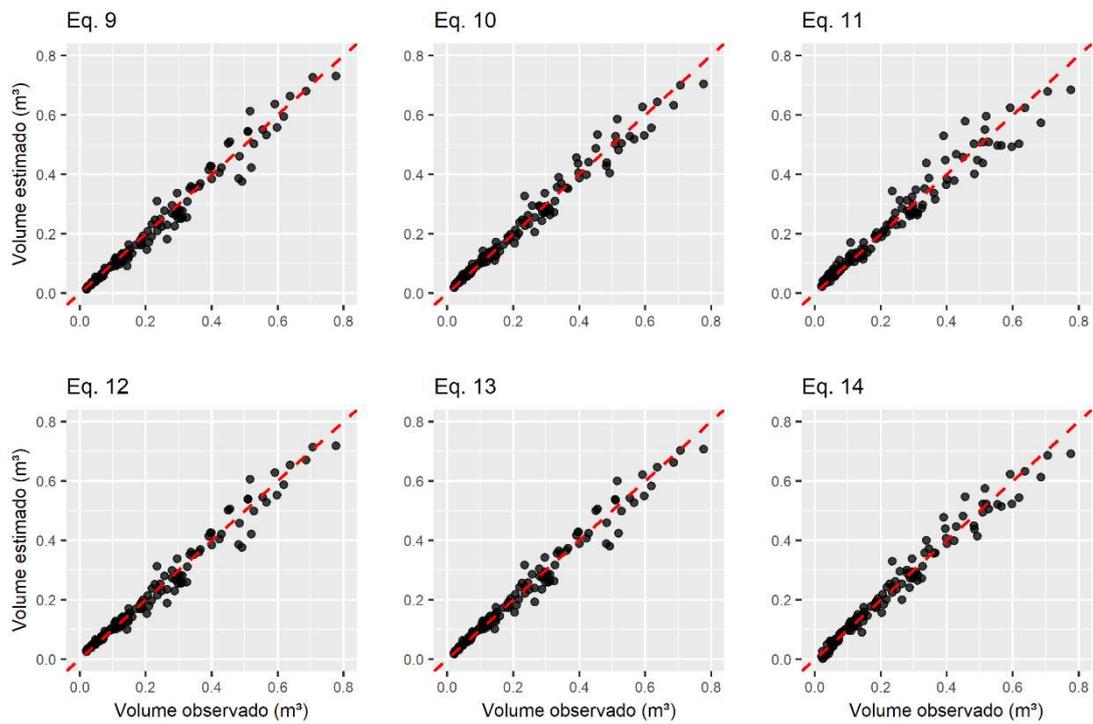


Figura 7. Volume individual: valores observados (V) versus estimados (\hat{V}).

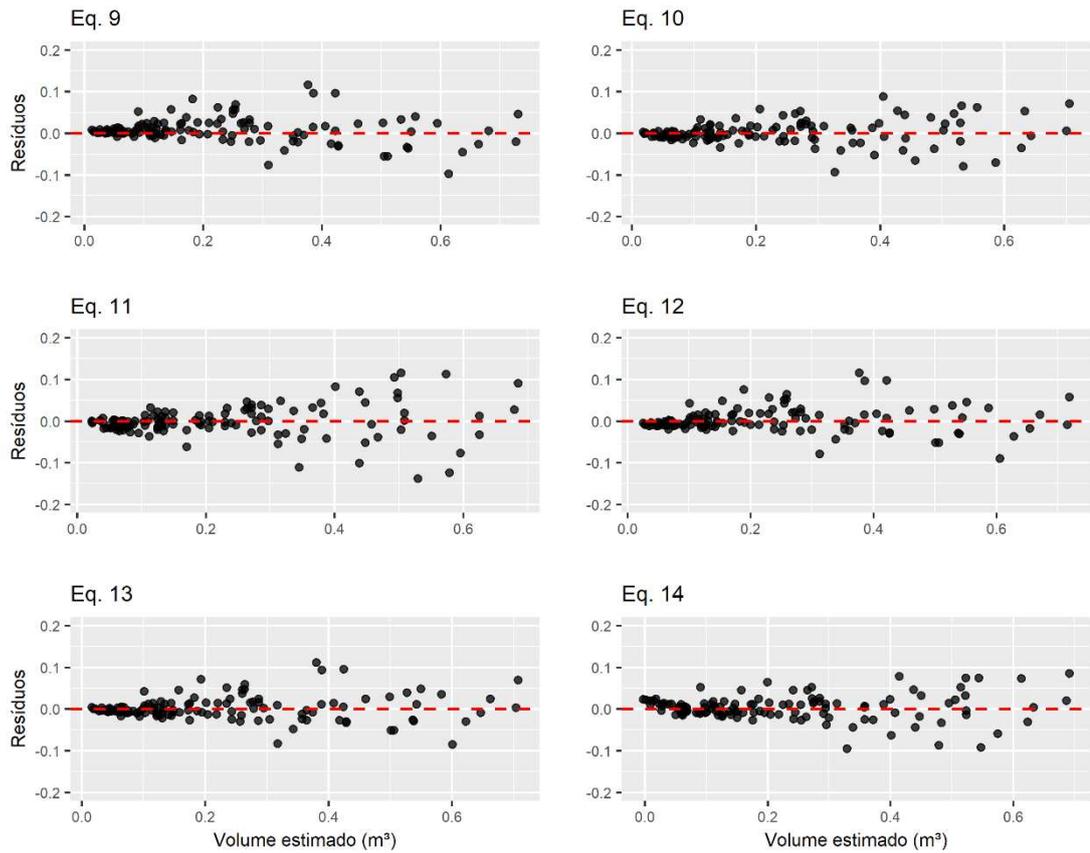


Figura 8. Volume individual: resíduos versus valores estimados (\hat{V}).

Os seis modelos testados geraram um r^2 acima de 0.95, resultando em boas estimativas do volume individual das árvores. O modelo volumétrico N° 2 (Eq. 10) foi selecionado, resultando em:

$$\ln V = -9,222158 + 2,096362 \ln d_{ap} + 0,604339 \ln(Ht)$$

$$V = e^{-9,222158 + 2,096362 \ln d_{ap} + 0,604339 \ln(Ht)} \quad \text{Eq. 30}$$

$$RMSE = 0,028307; r^2 = 0,9756; MAE = 0,019820$$

A expressão matemática definida pela seleção do melhor modelo volumétrico (Eq. 30) foi utilizada para calcular o volume individual das árvores de cada uma das parcelas contidas nos dados do IFC.

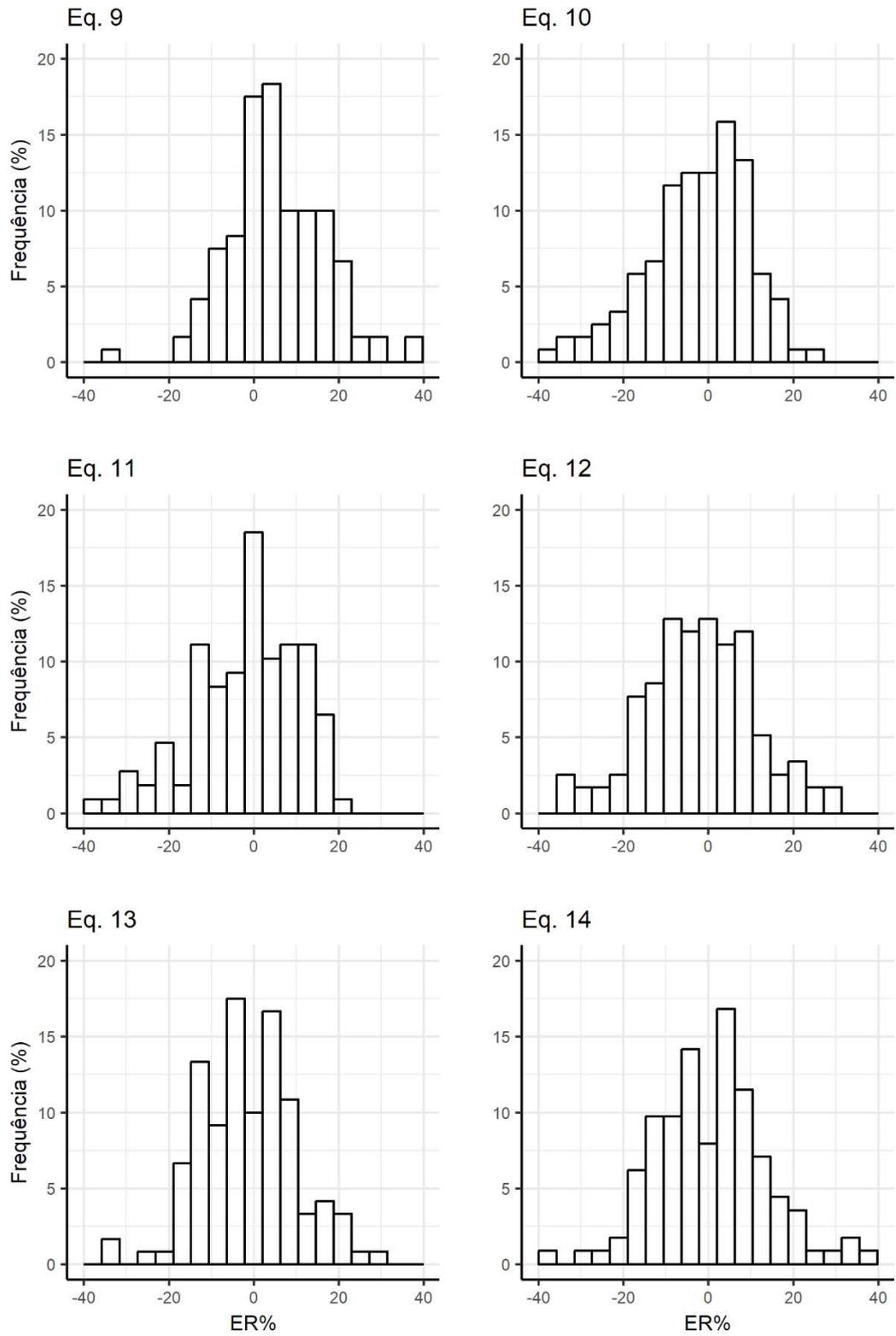


Figura 9. Volume individual: distribuição dos erros relativos porcentuais.

5.3 Capacidade produtiva

Os coeficientes dos três modelos testados para o ajuste da curva de crescimento médio (*curva-guia*) da altura dominante e diâmetro dominante são apresentados na Tabela 13 e suas correspondentes métricas estatísticas na Tabela 14.

Tabela 13. Estimativas de parâmetros dos modelos da *curva-guia*

N°	Equação	Variável	β_0	β_1	β_2
1	Eq. 15	<i>hd</i>	3,351114	-1,691912	
2	Eq. 16	<i>hd</i>	26,083628	0,336886	1,084281
3	Eq. 17	<i>hd</i>	22,911523	1,984703	1,315690
1	Eq. 15	<i>dapd</i>	3,314682	-1,448956	
2	Eq. 16	<i>dapd</i>	26,684621	0,295511	0,887997
3	Eq. 17	<i>dapd</i>	23,299769	1,776652	1,427745

Tabela 14. Métricas estatísticas dos modelos da *curva-guia*

N°	Equação	Variável	<i>RMSE</i>	r^2	<i>MAE</i>
1	Eq. 15	<i>hd</i>	1,7529	0,8784	1,3468
2	Eq. 16	<i>hd</i>	1,7511	0,8833	1,3177
3	Eq. 17	<i>hd</i>	1,8246	0,8688	1,4180
4	Eq. 15	<i>dapd</i>	2,0554	0,8155	1,5808
5	Eq. 16	<i>dapd</i>	2,0302	0,8261	1,5282
6	Eq. 17	<i>dapd</i>	2,0690	0,8135	1,6058

Curvas de índice de local em função de Hd e $dapd$ foram construídas sendo definida uma idade índice (I_i) de 7 anos, com índice de local variando entre 16 e 26 m e amplitudes classe de 2 m (Figura 10).

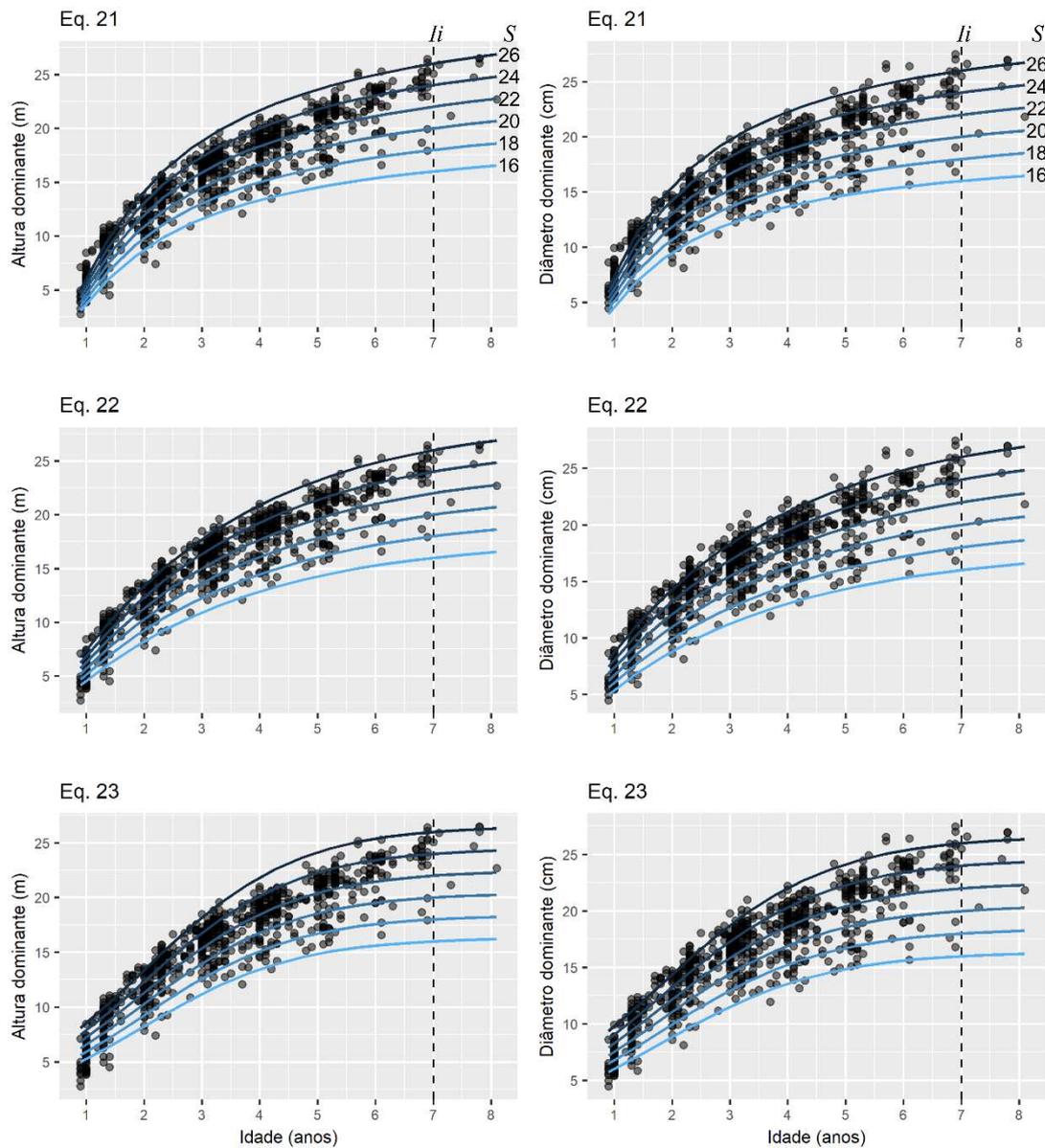


Figura 10. Curvas de índices de local em função da Hd (esquerda) e do $dapd$ (direita) para as três equações apresentadas na Tabela 8.

O modelo de Schumacher (Eq. 15) foi selecionado como o melhor para estimar o crescimento médio da Hd e $dapd$. As equações para cada variável foram definidas por:

$$\ln(Hd) = 3,351114 - 1,691912 \left(\frac{1}{I}\right) \rightarrow Hd = e^{3,351114 - 1,691912 \left(\frac{1}{I}\right)} \quad \text{Eq. 31}$$

$$\ln(dapd) = 3,314682 - 1,448956 \left(\frac{1}{I}\right) \rightarrow dapd = e^{3,314682 - 1,448956 \left(\frac{1}{I}\right)} \quad \text{Eq. 32}$$

Em concordância com a metodologia da *curva-guia*, a Eq. 18, cujas expressões matemáticas são mostradas a seguir, poderá ser utilizada para calcular o índice de local de um plantio quando se tenham disponíveis os valores de *Hd* e *dapd*.

$$\ln S = \ln(Hd) + 1,691912 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right) \rightarrow S = e^{\ln(Hd) + 1,691912 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right)} \quad \text{Eq. 33}$$

$$\ln S = \ln(dapd) + 1,448956 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right) \rightarrow S = e^{\ln(dapd) + 1,448956 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right)} \quad \text{Eq. 34}$$

As equações de índice de local (Eq. 33 e Eq. 34) foram as utilizadas para calcular o índice de local em função da *Hd* (S_{Hd}) e do *dapd* (S_{dapd}) para cada parcela utilizada neste estudo.

Por outro lado, quando as informações prévias disponíveis forem os valores do índice de local e o objetivo seja conhecer a *Hd* ou *dapd* do plantio, as expressões Eq. 35 e Eq. 36 poderão ser utilizadas.

$$\ln Hd = \ln(S) - 1,691912 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right) \rightarrow Hd = e^{\ln(S) - 1,691912 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right)} \quad \text{Eq. 35}$$

$$\ln dapd = \ln(S) - 1,448956 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right) \rightarrow dapd = e^{\ln(S) - 1,448956 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right)} \quad \text{Eq. 36}$$

As expressões Eq. 35 e Eq. 36 foram utilizadas para gerar tabelas com os limites de alturas dominantes (Tabela 15) e diâmetros dominantes (Tabela 16) para cada índice de local. Três classes de índice de local (I, II e III) com dois valores de *S* para cada classe, foram estabelecidos. O valor central para cada *S* foi assim definido: Classe I,

$S = 24$ e 26 (crescimento alto); Classe II, $S = 20$ e 22 (Crescimento médio) e Classe III, $S = 16$ e 18 (Crescimento baixo).

Tabela 15. Limites de hd para as três classes de local estabelecidos

Idade	Classe I					
	24			26		
1	5,7	-	6,0	6,1	-	6,5
2	12,8	-	13,8	13,9	-	14,9
3	16,9	-	18,2	18,3	-	19,7
4	19,4	-	20,9	21,0	-	22,6
5	21,0	-	22,7	22,8	-	24,6
6	22,2	-	24,0	24,1	-	26,0
7	23,1	-	25,0	25,1	-	27,0
8	23,8	-	25,8	25,9	-	27,8
Idade	Classe II					
	20			22		
1	4,7	-	5,1	5,2	-	5,6
2	10,6	-	11,6	11,7	-	12,7
3	14,0	-	15,3	15,4	-	16,8
4	16,0	-	17,6	17,7	-	19,3
5	17,4	-	19,1	19,2	-	20,9
6	18,4	-	20,2	20,3	-	22,1
7	19,1	-	21,0	21,1	-	23,0
8	19,7	-	21,6	21,7	-	23,7
Idade	Classe III					
	16			18		
1	3,7	-	4,1	4,2	-	4,6
2	8,4	-	9,4	9,5	-	10,5
3	11,0	-	12,4	12,5	-	13,9
4	12,7	-	14,2	14,3	-	15,9
5	13,7	-	15,5	15,6	-	17,3
6	14,5	-	16,3	16,4	-	18,3
7	15,1	-	17,0	17,1	-	19,0
8	15,6	-	17,5	17,6	-	19,6

Tabela 16. Limites de *dapd* para as três classes de local estabelecidos

Idade	Classe I					
	24			26		
1	7,0	-	7,5	7,6	-	8,0
2	14,0	-	15,1	15,2	-	16,3
3	17,7	-	19,1	19,2	-	20,6
4	19,9	-	21,5	21,6	-	23,2
5	21,3	-	23,1	23,2	-	24,9
6	22,3	-	24,2	24,3	-	26,1
7	23,1	-	25,0	25,1	-	27,0
8	23,7	-	25,6	25,7	-	27,7

Idade	Classe II					
	20			22		
1	5,8	-	6,3	6,4	-	6,9
2	11,6	-	12,7	12,8	-	13,9
3	14,6	-	16,0	16,1	-	17,6
4	16,4	-	18,1	18,2	-	19,8
5	17,6	-	19,4	19,5	-	21,2
6	18,5	-	20,3	20,4	-	22,2
7	19,1	-	21,0	21,1	-	23,0
8	19,6	-	21,5	21,6	-	23,6

Idade	Classe III					
	16			18		
1	4,6	-	5,1	5,2	-	5,7
2	9,2	-	10,3	10,4	-	11,5
3	11,6	-	13,0	13,1	-	14,5
4	13,0	-	14,6	14,7	-	16,3
5	13,9	-	15,7	15,8	-	17,5
6	14,6	-	16,4	16,5	-	18,4
7	15,1	-	17,0	17,1	-	19,0
8	15,5	-	17,4	17,5	-	19,5

5.4 Produção em nível de povoamento

Aplicando o modelo de Clutter (1963) ajustado a partir dos dois valores de índice de local gerados (Eq. 33 e Eq. 34), obtiveram-se as estimativas e respectivas métricas estatísticas, apresentadas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17. Estimativas de parâmetros para os 2 modelos de Clutter

Nº	S	α_0	α_1	β_0	β_1	β_2	β_3
1	S_{Hd}	2,725633	0,023321	1,947527	-1,284900	0,022468	1,033951
2	S_{dapd}	2,541577	0,031548	1,928663	-1,331229	0,025566	1,020707

Tabela 18. Métricas estatísticas para os 2 modelos de Clutter

Nº	S	B_2			V_2		
		<i>RMSE</i>	r^2	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	r^2	<i>MAE</i>
1	S_{Hd}	1,8028	0,8037	1,3576	17,2003	0,8699	13,1861
2	S_{dapd}	1,7969	0,8050	1,3528	17,2697	0,8700	13,1573

Os gráficos dos valores observados versus estimados, tanto para a área basal futura (B_2) quanto para o volume futuro (V_2), são apresentados na Figura 11.

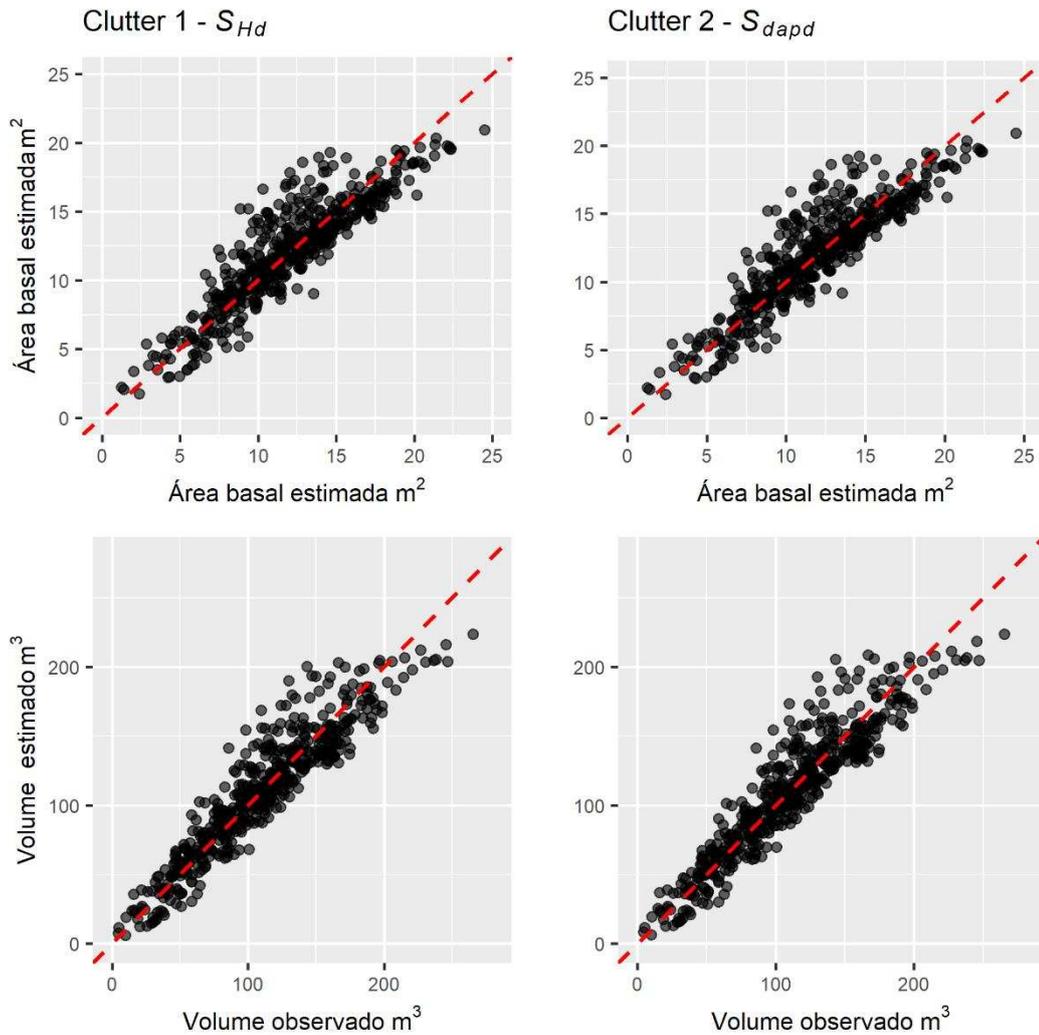


Figura 11. Área Basal (acima) e Volume (embaixo): valores observados versus estimados, para os dois modelos de Clutter ajustados.

Não foram observadas diferenças significativas entre os ajustes dos dois modelos em nível de povoamento. O sistema de equações do modelo de (Clutter, 1963) utilizando S_{Hd} resultou em:

$$\begin{cases} \ln(V_2) = 1,947527 - 1,284900 \left(\frac{1}{I_2}\right) + 0,022468S + 1,033951 \ln B_2 \\ \ln(B_2) = \ln B_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 2,725633 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + 0,023321 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S \end{cases} \quad \text{Eq. 37}$$

5.5 Capacidade produtiva

O índice de local calculado a partir da altura dominante (Eq. 33) foi selecionado para ser espacializado na área de estudo. Nove variáveis foram utilizadas para essa finalidade. A consistência dos dados espaciais gerados e as métricas estatísticas (Tabela 19 e Figura 12, respectivamente) determinadas pela aplicação dos modelos nos dados de validação permitiram concluir que o algoritmo de regressão de aproximação de função *Random Forest* foi o melhor para espacializar a capacidade produtiva de *G. crinita*.

Tabela 19. Métricas estatísticas dos modelos de regressão utilizados na predição espacial da capacidade produtiva

Nº	Modelo	RMSE	r^2	MAE
1	Cubist	2,1108	0,2945	1,4955
2	gbm	2,0948	0,2949	1,5175
3	lm	2,2760	0,1627	1,6952
4	rf	2,0472	0,3209	1,4537

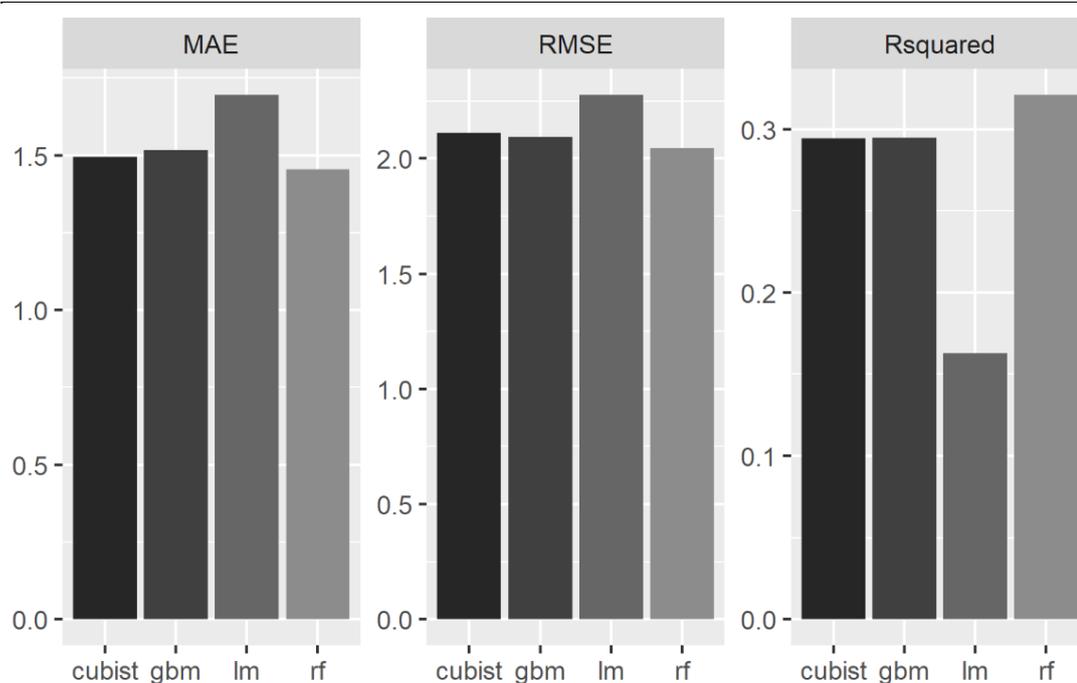


Figura 12. Métricas dos modelos testados na espacialização da capacidade produtiva.

Com a seleção do melhor modelo para espacialização, mapas da capacidade produtiva dos plantios (Figura 13 e Figura 14) e do desvio padrão das predições (Figura 15) foram gerados.

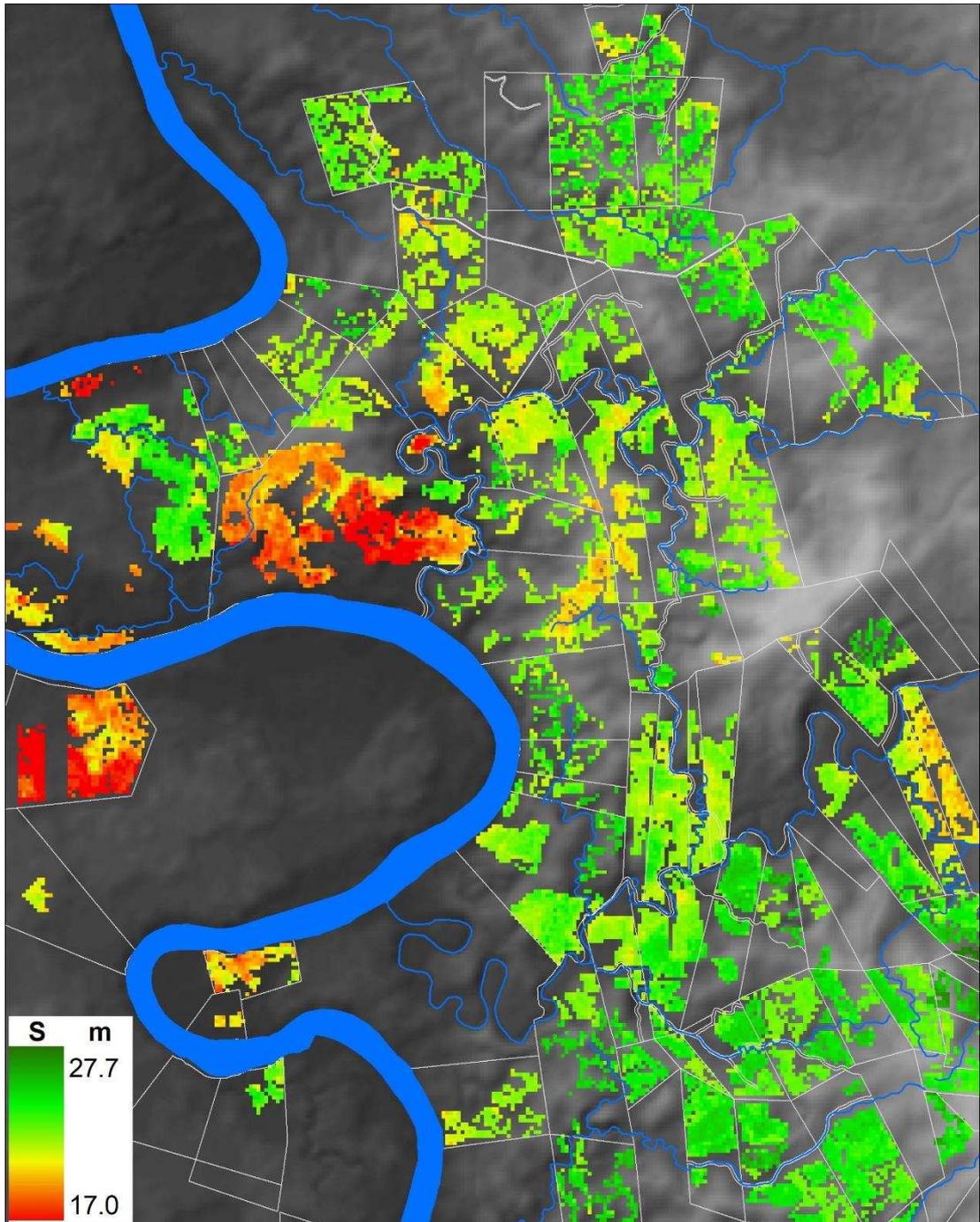


Figura 13. Espacialização da capacidade produtiva de plantios de *G. crinita*.

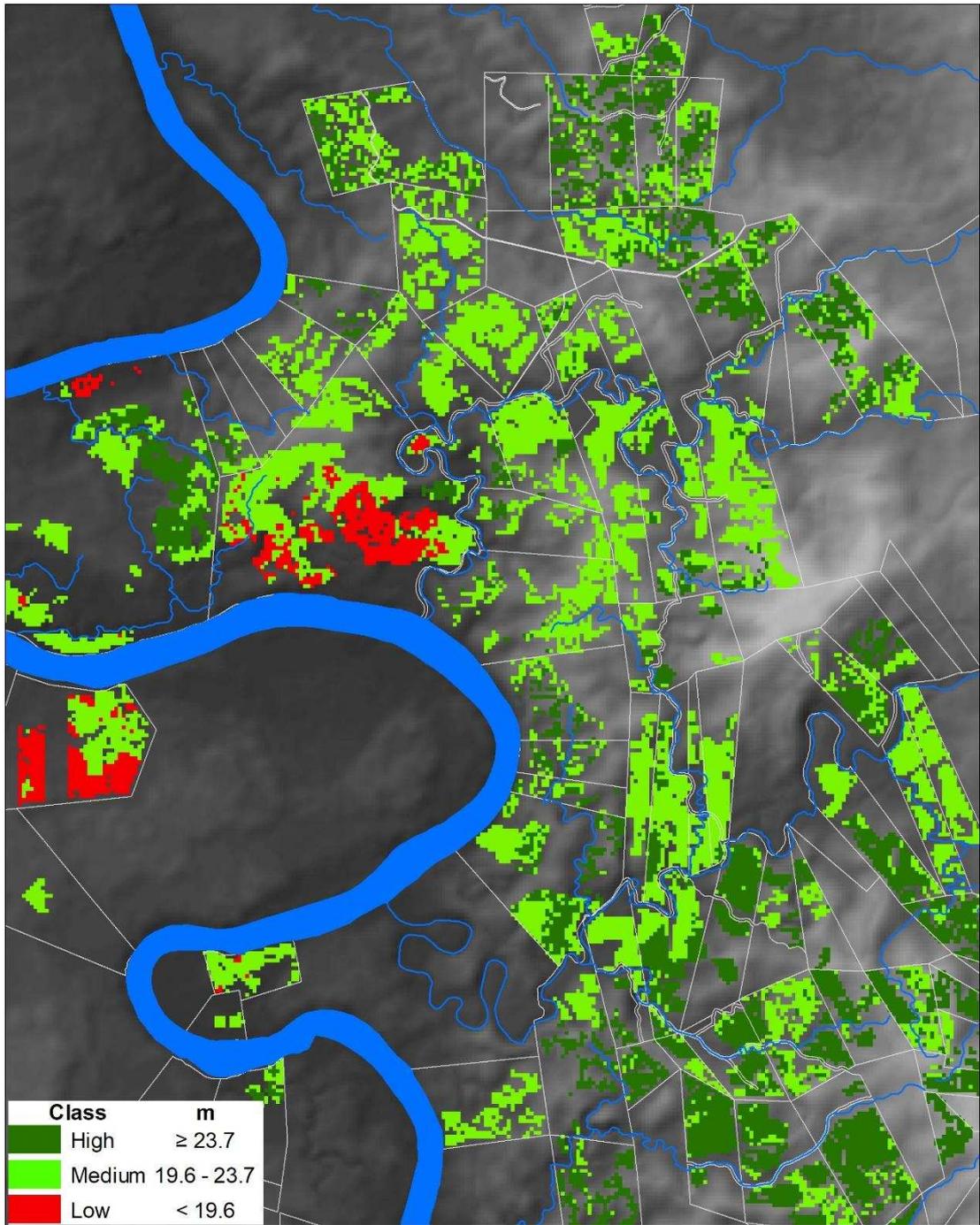


Figura 14. Classes da capacidade produtiva de plantios de *G. crinita*.

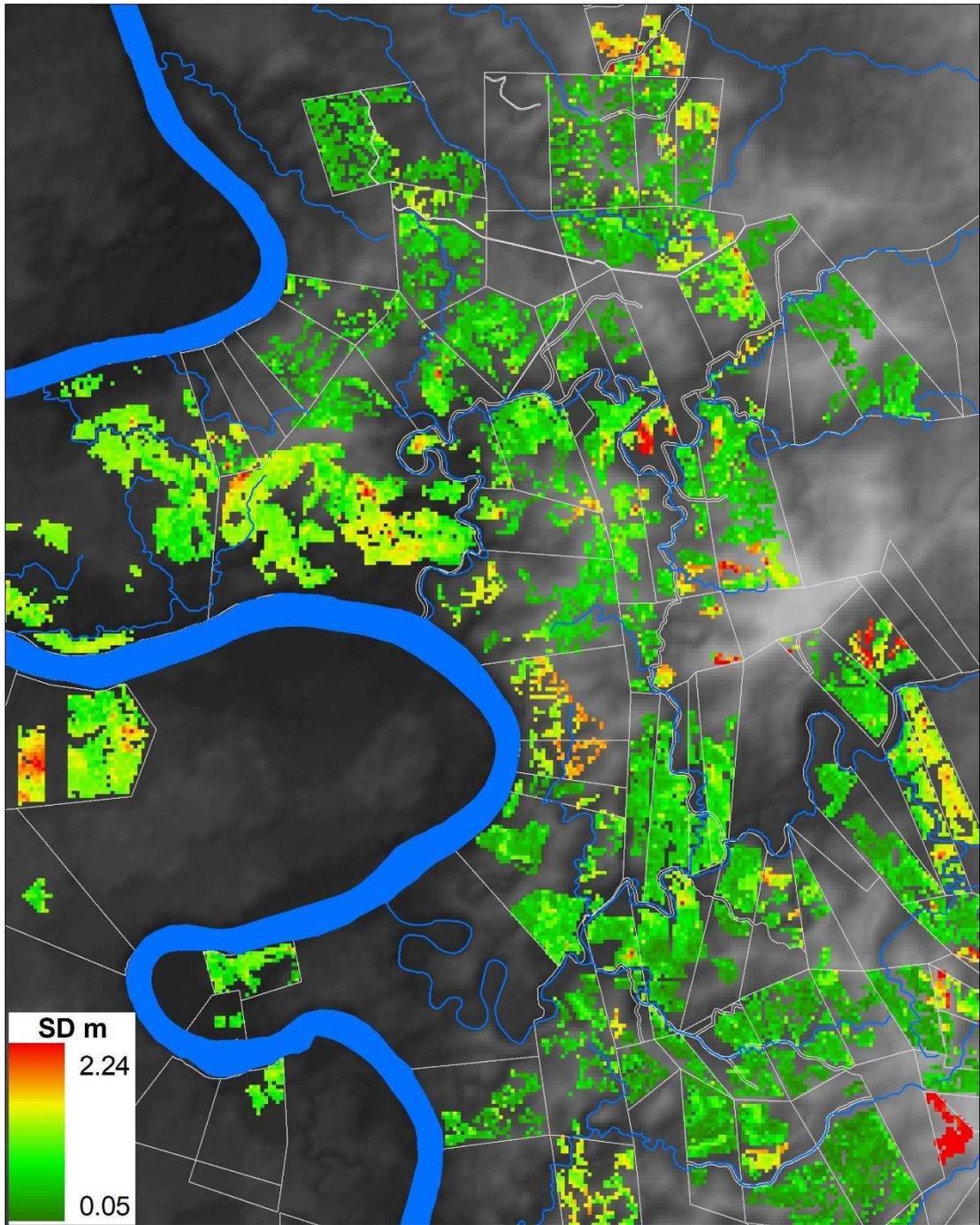


Figura 15. Desvio padrão (SD) das previsões da capacidade produtiva

6 DISCUSSÕES

6.1 Modelagem do crescimento

Os seis modelos testados produziram ajustes semelhantes e satisfatórios quanto à altura total das árvores. Isso pode ser explicado porque as relações algébricas são semelhantes, isto é, eles apresentam a mesma relação funcional $Ht = f(dap, dapd, I)$. A aplicação dos modelos nos dados de validação gerou um $r^2 > 0,88$. Resultados similares na modelagem do crescimento na altura total (Ht) de espécies nativas em plantios puros na Costa Rica e Panamá foram obtidos (REDONDO-BRENES, 2007; REDONDO-BRENES e MONTAGNINI, 2006; O'BRIEN et al., 1995), de plantios experimentais de *Paratecoma peroba* Kuhl, *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur. e *Aspidosperma polyneurom* M. Arg. (SOARES et al., 2011) e outros desenvolvidos em diversos sistemas de plantio (ARAÚJO, 2015; AZEVEDO et al., 2011; SANTOS et al., 2012; TONINI et al., 2008).

A estratégia de adicionar as variáveis $dapd$ e I nos modelos hipsométricos testados procurou melhorar o ajuste, modelando a variabilidade no crescimento das árvores em sítios e idades distintas em que os dados foram coletados. A inclusão de variáveis do povoamento, como altura dominante, índice de local e idade, pode resultar em estimativas da altura mais precisas (CAMPOS e LEITE, 2017), permitindo diferenciar altura total de árvores do mesmo dap , em locais com diferentes capacidades produtivas (LEITE e ANDRADE, 2003) e ainda com idades diferentes. Modelos do tipo $Ht = f(dap, Hd, I)$ são frequentemente utilizados em inventários florestais contínuos (CALDEIRA et al., 2002; CAMPOS e LEITE, 2017; SEAN et al., 1995).

O ajuste dos modelos hipsométricos apresentados nesse estudo contribuem para a execução de inventários pelos manejadores florestais de *G. crinita* na região central peruana. A altura total é utilizada como *input* para o cálculo de outras variáveis de importância no manejo florestal, como as equações de taper e de volume (CAMPOS e LEITE, 2017). Além disso, a estimação da altura em função de variáveis conhecidas ou de maior facilidade de medição são empregadas com o intuito de obter inventários florestais menos onerosos e para avaliar o crescimento e a produção dos plantios (COSTA, 2016).

A Eq. 29 foi selecionada para calcular a altura individual das árvores por ter alcançado um leve ganho nas métricas calculadas ($r^2 = 0,8895$, $RMSE = 1,8501$ e $M = 1,4365$), apresentar uma adequada distribuição de resíduos (Figura 5) e apropriada distribuição de frequências dos erros relativos percentuais (Figura 6), sem tendências de superestimar ou subestimar as alturas. Embora, todas as equações de $Ht = f(dap, dapd, I)$ geradas neste estudo poderiam ser utilizadas na estimação das alturas individuais de *G. crinita* submetidas a manejo em plantios florestais.

Os principais modelos volumétricos (CAMPOS e LEITE, 2017; CUNHA, 2004; SOARES et al., 2012) foram utilizados para estimar o volume individual das árvores de *G. crinita*. A aplicação dos seis modelos testados (Tabela 5) resultou em $r^2 > 0,95$, com destaque para o modelo de Schumacher e Hall (1933) (Eq. 10) que obteve um $r^2 = 0,9756$ sendo selecionado para calcular os volumes de todas as árvores nos dados do IFC. Os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados para plantios experimentais de *G. crinita* na região Ucayali, com um $r^2 = 0,99$ para modelagem do volume comercial (GUERRA et al., 2008).

Estudos da modelagem do volume individual de árvores nativas do trópico em plantios florestais e agroflorestais com resultados similares foram obtidos para *Cordia alliodora* (Ruiz e Pav.) Oken (SOMARRIBA e BEER, 1987), *Paratecoma peroba* Kuhlm., *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur., *Aspidosperma parvifolium* A.CD., *Tabebuia serratifolia* (Vahl.) Nich., *Aspidosperma polyneurom* M. Arg., *Pterigota brasiliensis* Fr. All. e *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (SOARES et al., 2011), *Ocotea porosa* (Nees e Mart.) Barroso (SANTOS et al., 2012), *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum. (ARAÚJO, 2015), espécies nativas da região central do estado do Rio Grande do Sul (SELLE e VUADEN, 2010), espécies florestais da Amazônia brasileira (MOURA, 1994) e para diversas formações florestais do estado de Minas Gerais e outros estados do Brasil (SOARES et al., 2012).

Todos os parâmetros foram significativos ($p < 0,001$) e as métricas estatísticas resultaram em valores semelhantes (Tabela 14) para os três modelos utilizados no ajuste da curva média de Hd e $dapd$ (Tabela 6). Esses resultados sugerem que os três modelos sejam adequados para modelar a capacidade produtiva de *G. crinita*. No entanto, a análise estatística para exatidão não permite determinar com certeza a construção de curvas de índice de local que representem adequadamente a distribuição

dos dados observados (CAMPOS e LEITE, 2017), para o caso do nosso estudo, dados de Hd e $dapd$ dos plantios.

A classificação da capacidade produtiva por índice de local é um método prático, quantitativo e consistente de avaliação da qualidade do local (CAMPOS e LEITE, 2017). A geração de gráficos de curvas de crescimento de Hd e $dapd$ para índices de local predefinidos juntamente com os dados observados (Figura 10) facilitou a escolha dos modelos testados no presente trabalho. A adoção do modelo de Schumacher (Eq. 15) resultou na construção de curvas anamórficas de Hd e $dapd$ para seis valores de índice de local predefinidos (16, 18, 20, 22, 24, 28 e 28). Essas curvas foram posteriormente utilizadas para classificar a capacidade produtiva dos plantios de *G. crinita*.

As curvas de crescimento construídas a partir do uso das equações Eq. 33 e Eq. 34 e, as tabelas de limites de Hd (Tabela 15) e $dapd$ (Tabela 16), constituem resultados inéditos e aportes de grande utilidade e importância para pesquisas que visam contribuir no manejo de plantios de *G. crinita* em nível comercial.

Os valores de r^2 obtidos pelo ajuste do modelo Clutter (1963) com S_{Hd} e S_{dapd} foram praticamente iguais, tanto para a equação da área basal (B_2) quanto para o volume (V_2) por hectare ($r^2 = 0,80$ e $r^2 = 0,87$ respectivamente). Esse resultado indica a viabilidade de utilizar S_{Hd} ou S_{dapd} na classificação da capacidade produtiva. Estudos que determinam a eficiência do uso do $dapd$ para classificar a capacidade produtiva em plantios de eucalipto tem sido abordados por Leite et al. (2011) e Villanueva et al. (2018). A obtenção das equações de crescimento e produção em nível de povoamento (Eq. 37) fornece uma maneira concisa e conveniente de expressar as relações de crescimento e rendimento (VANCLAY, 1995). A partir delas é possível a construção de tabelas de produção, muito importantes para efeito de manejo florestal (CAMPOS e LEITE, 2017).

Os dois modelos de crescimento e produção em nível de povoamento ajustados, foram consistentes para estimar os dados por hectare da área basal futura (B_2) e volume futuro (V_2), em plantios comerciais de *G. crinita*. Devido aos possíveis erros causados pela não-independência de parâmetros entre equações no modelo (BRAVO-OVIEDO et al., 2004), por serem dados provenientes de medições sucessivas (SULLIVAN e

CLUTTER, 1972), a consistência dos parâmetros α_1 (positivo) do termo $\left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)S_1$ e de β_1 (negativo) em $\beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right)$ da equação (Eq. 37) foram verificados.

Os resultados indicaram que, para os modelos de Clutter (1963) ajustados, existe um efeito significativo e consistente da capacidade produtiva na área basal e que a relação funcional é adequada para os dados utilizados (CAMPOS e LEITE, 2017).

6.2 Espacialização da capacidade produtiva

A capacidade produtiva de *G. crinita*, estimada a partir do índice de local (Eq. 33), foi espacializada levando em consideração nove variáveis selecionadas. Isso resultou na predição de um valor de índice de local para cada pixel dos plantios existentes na área de estudo (Figura 13). Os resultados foram então classificados segundo os limites de *Hd* para cada classe de sitio (Tabela 15), gerando-se um mapa com as classes da capacidade produtiva para a *G. crinita* (Figura 14). Esse mapa constitui uma ferramenta importante no planejamento e no manejo florestal (BRAGA, et al., 1999).

A enumeração dos fatores ambientais que influem no crescimento das árvores pode ser simples e fácil, a princípio (BRAGA et al., 1999). Entretanto, entender e avaliar o somatório das interações desses fatores e os seus efeitos sobre o crescimento da floresta, no complexo denominado sítio, pode ser difícil (BRAGA et al., 1999; SPURR e BARNES, 1973). Para nosso estudo, os quatro modelos de regressão estimaram valores do índice de local em função de: ano do plantio, a localização da parcela (coordenadas UTM), o NDVI e a banda 5 (*Near Infrared* – NIR) da imagem LANDSAT-8 (2016), as bandas 2 (*Green*) e 5 (*Shortwave Infrared* - SWIR 1) da imagem LANDSAT-5 (2007), a altitude (MDEHC) e a distância vertical à rede de hídrica. A configuração do modelo indica que a informação obtida para cada ponto ou unidade espacial tem caráter multidimensional, por ser estimada a partir de diferentes atributos do local (BRAGA et al., 1999; GAUCH e GAUCH, 1982).

Quatro variáveis, de um total de nove que explicam a terceira parte da variação ($r^2 = 0,33$) da capacidade produtiva para a área de estudo, referem-se a informações espectrais. A imagem do ano 2007 forneceu informação da área antes do estabelecimento dos plantios, o que leva a considerar a existência de vegetação

indicadora para a avaliação da capacidade produtiva (CAMPOS e LEITE, 2017). No caso da imagem 2016, as informações indicariam que os plantios tiveram um comportamento espectral diferenciado segundo a qualidade do local onde eles estão ocorrem, existindo portanto, possibilidades do uso de informação procedente de sensores remotos, tanto como auxílio na identificação de áreas potenciais para plantios de *G. crinita* quanto para obter informações durante o seu manejo, conforme inúmeros estudos em que essa tecnologia é usada (BARBOSA et al., 2014; BIKINDOU et al., 2012; PETRAKIS et al., 2018; TOMPPO et al., 2008; TOMPPO e HALME, 2004; WARING et al., 2006; WATT et al., 2015).

Diversos estudos que relacionam variáveis climáticas e do relevo (como altitude e distância vertical à rede hídrica) com a capacidade produtiva têm sido feitos (BRAGA et al., 1999; SOCHA, 2008; VÉGA e ST-ONGE, 2009; WEISKITTEL et al., 2011), comprovando o efeito significativo dessas variáveis. A importância de se incluir o MDEHC na modelagem da capacidade produtiva leva implícito outras variáveis como o relevo do terreno, a exposição à radiação solar incidente, que a por sua vez depende da declividade, inclinação e orientação do local (IQBAL, 1983).

Pelo conhecimento da área de estudo, ainda que os resultados da espacialização implicassem valores de r^2 variando entre 0,16 e 0,33 para regressão linear e *Random Forest* respectivamente, considerados como baixos quando comparados com estudos similares, pode-se dizer que os resultados do mapeamento da capacidade produtiva com o algoritmo *Random Forest* são condizentes com a realidade observada. O modelo selecionado poderá ser enriquecido com dados para uma área maior ou então testar variáveis que forneçam informação da variabilidade da capacidade produtiva num nível micro, como por exemplo variáveis do solo.

7 CONCLUSÕES

Modelos que permitem a estimação de altura e volume individual das árvores foram gerados e constituem importantes aportes ao conhecimento e manejo de *Guzuma crinita* Mart. (bolaina) em plantios comerciais na região da Amazônia central peruana.

Dados de alturas dominantes e diâmetros dominantes dos plantios poderão ser utilizados para classificar e mapear a capacidade produtiva de *G. crinita* que, juntamente ao modelo de Clutter gerado, são uma ferramenta de grande utilidade para a estimação da produção futura de plantios para os manejadores florestais da região.

Os resultados obtidos em termos de crescimento da espécie sugerem que *G. crinita* é uma árvore com bom desenvolvimento para ser utilizada em plantações comerciais, com taxas que atualmente podem atingir até $38 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ aos 8 anos de idade.

As variáveis espectrais, a localização, altitude e a distância vertical à rede hídrica foram as de maior importância na predição da capacidade produtiva dos plantios de *G. crinita*.

Foi gerado um modelo para especializar a capacidade produtiva dos plantios florestais de *G. crinita* na zona de estudo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, B. H. P. **Modelagem da altura, volume e afilamento do fuste de *Calycophyllum spruceanum* Benth. empregando regressão e redes neurais artificiais.** 2015. 52 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2015.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands.** Hungary. Pergamon Press. 1 ed. 1970. 505 p.
- AZEVEDO, G. B. de; OLIVEIRA SOUSA, G. T. de; SILVA, H. F.; BARRETO, P. A. B.; NOVAES, A. B. de. Seleção de modelos hipsométricos para quatro espécies florestais nativas em plantio misto no Planalto da Conquista na Bahia. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, 13 p. 2011.
- BARBOSA, J. M.; BROADBENT, E. N.; BITENCOURT, M. D. Remote Sensing of Aboveground Biomass in Tropical Secondary Forests: A Review. **International Journal of Forestry Research**, v. 2014, p. 1–14. 2014.
- BIKINDOU, F. D. A.; GOMAT, H. Y.; DELEPORTE, P.; BOUILLET, J-P.; MOUKINI, R.; MBEDI, Y.; NGOUAKA, E.; BRUNET, D.; SITA, S.; DIAZENZA, J-B.; VOUIDIBIO, J.; MARESCHAL, L.; RANGER, J.; SAINT-ANDRÉ, L. Are NIR spectra useful for predicting site indices in sandy soils under *Eucalyptus* stands in Republic of Congo?. **Forest Ecology and Management**, v. 266, p. 126–137. 2011.
- BRAGA, F. de A., BARROS, N. F., SOUZA, A. L. de, COSTA, L. M. da. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 23, n. 2, p. 291-298. 1999.
- BRAVO-OVIEDO, A.; RÍO, M. Del; MONTERO, G. Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 201, n. 2–3, p. 187–197. 2004.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands.** Springer. 2012. 547 p.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; SHEEREN, L. W.; BARICHELLO, L. R.; WATZLAWICK, L. F. Relação hipsométrica para *Acacia mearnsii* com

- diferentes idades. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 45, p. 57–68. 2002.
- CAMPOS, J.; LEITE, H. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa. UFV. 5 ed. 2017. 363 p.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354–371. 1963.
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991–2007. 2015.
- COSTA, E. A.; SCHRODER, T.; FINGER, C. A. G. Height-diameter relationships for *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) Kuntze in southern Brazil. **CERNE**, 22, n. 4, p. 493-500. 2016.
- CUNHA, U. S. Da. **Dendrometria e inventário florestal**. Manaus. Escola Agrotécnica Federal de Manaus (EAFM). 2004. 61 p.
- DAGANG, A. B. K.; NAIR, P. K. R. Silvopastoral research and adoption in Central America: Recent findings and recommendations for future directions. **Agroforestry Systems**, v. 59, n. 2, p. 149–155. 2003.
- DIRECCIÓN GENERAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE – DGFFS. **Perú forestal en números año 2010**. Lima, Perú. Ministerio de Agricultura. 2011. 87 p.
- DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. de. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 731-739. 2005.
- DINIZ, F. S. **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao inventário florestal**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2007.
- ERSKINE, P. D.; LAMB, D.; BRISTOW, M. Tree species diversity and ecosystem function: Can tropical multi-species plantations generate greater productivity?. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2–3, p. 205–210. 2006.
- EVANS, J. **Plantation forestry in the tropics: tree planting for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes**. Clarendon Press. Oxford. 2 ed. 1992.

404 p.

EVANS, J. S.; CUSHMAN, S. A. Gradient modeling of conifer species using random forests. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 5, p. 673–683. 2009.

FILHO, E. I. F. Labgeo: Collection of functions to fit models with emphasis in land use and soil mapping. R package version 0.3.8.2. n.d. URL <https://github.com/elpidiofilho/labgeo>.

GAUCH Jr., H. G. **Multivariate analysis in community ecology**. Cambridge University Press. 1982. 307 p.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado N° 11, Belo Horizonte, 1978. 47 p.

GUARIGUATA, M. R.; ARCE, J.; AMMOUR, T.; CAPELLA, J. L. **Las plantaciones forestales en Perú: Reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro**. Documento Ocasional 169. Bogor, Indonesia. CIFOR. 2017. 29 p.

GUERRA, W.; SOUDRE-ZAMBRANO, M.; CHOTA, M. Tabla de volumen comercial de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) de las plantaciones experimentales de Alexander Von Humboldt, Ucayali, Perú. **Folia Amazónica**, v. 17, n. 1–2, p. 47–58. 2008.

GÜNTER, S.; GONZALEZ, P.; ÁLVAREZ, G.; AGUIRRE, N.; PALOMEQUE, X.; HAUBRICH, F.; WEBER, M. Determinants for successful reforestation of abandoned pastures in the Andes: Soil conditions and vegetation cover. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 2, p. 81–91. 2009.

HENNINGSEN, A.; HAMANN, J. D. Systemfit: A package for estimating systems of simultaneous equations in R. **Journal of Statistical Software**, v. 23, n. 4, p. 1–40. 2007.

HOLDRIDGE, L. R. **Life Zone Ecology**. San Jose – CR. 1 ed. 1967. 206 p.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONÍA PERUANA – IIAP. **Evaluación económica de parcelas de regeneración natural y plantaciones de bolaina blanca, *Guazuma crinita*, en el departamento de Ucayali**. Avances Económicos, 11 ed. Iquitos, Perú. 2009. 51 p.

INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES – INRENA. **Compendio estadístico de la actividad forestal del Perú 1980 – 1996**. Lima, Perú. Ministerio de Agricultura. 1997. 100 p.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York. Academic Press. 1983. 390 p.

JONES, J. R. **Review and comparison of site evaluation methods**. USDA Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper RM-51. 1969. 27 p.

KELTY, M. J. The role of species mixtures in plantation forestry. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2–3, p. 195–204. 2006.

KEOGH, R. M. (2009). **The future of teak and the high grade tropical hardwood sector: solving the tropical hardwood crisis with emphasis on teak (*Tectona grandis* Linn f.)**. FAO. 2009. 47 p.

KVIST, L. P.; NEBEL, G. A review of Peruvian flood plain forests: ecosystems, inhabitants and resource use. **Forest Ecology and Management**, v. 150, n. 1, p. 3–26. 2001.

LATTA, G.; TEMESGEN, H.; ADAMS, D.; BARRETT, T. Analysis of potential impacts of climate change on forests of the United States Pacific Northwest. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 720–729. 2010.

LEITE, H.; CASTRO, R.; SILVA, A.; JÚNIOR, C.; BINOTI, D.; CASTRO, A. F.; BINOTI, M. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, v. 19, n. 2, p. 181–195. 2011.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. de. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 301–310. 2003.

LEITE, H. G.; DA SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F. H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 2, p. 263–269. 2011.

MARUYAMA, E.; KINOSHITA, I.; ISHII, K.; OHBA, K.; SAITO, A. Germplasm conservation of the tropical forest trees, *Cedrela odorata* L., *Guazuma crinita* Mart.,

and *Jacaranda mimosaeifolia* D. Don., by shoot tip encapsulation in calcium-alginate and storage at 12-25°C. **Plant Cell Reports**, v. 16, n. 6, p. 393–396. 1997.

MELLO, J. M. de; OLIVEIRA, M. S. de; BATISTA, J. L. F.; JÚNIOR, P. R. J.; JÚNIOR, H. K. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 251–260. 2006.

MOURA, J. DE. **Estudo da forma do fuste e comparação de métodos de estimativa volumétrica de espécies florestais da Amazônia brasileira**. 1994. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1994.

NUNES, M. H.; GÖRGENS, E. B. Artificial intelligence procedures for tree taper estimation within a complex vegetation mosaic in brazil. **Plos One**, v. 11, n. 5, e0154738. 2016. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154738>.

OLIVEIRA, L. T. de. **Aplicação do LIDAR no inventário de florestas plantadas**. 2011. 109 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras. 2011.

ORTIZ, J. L.; VETTORAZZI, C. A.; COUTO, H. T. Z. do; GONÇALVES, J. L. de M. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. **Scientia Forestalis**, v. 32, n. 72, p. 67–79. 2006.

PAQUETTE, A.; MESSIER, C. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 8, n. 1, p. 27–34. 2010.

PARODI, J. L.; FREITAS, D. Geographical aspects of forested wetlands in the lower Ucayali, Peruvian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 33/34, p. 157–168. 1990.

PENG, C.; WEN, X. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. AAAI Technical Report WS-99-07. 8 p. 1999.

PETRAKIS, R. E.; VILLARREAL, M. L.; WU, Z.; HETZLER, R.; MIDDLETON, B. R.; NORMAN, L. M. Evaluating and monitoring forest fuel treatments using remote sensing applications in Arizona, U.S.A. **Forest Ecology and Management**, v. 413, p. 48–61. 2018.

PIOTTO, D.; CRAVEN, D.; MONTAGNINI, F.; ALICE, F. Silvicultural and economic aspects of pure and mixed native tree species plantations on degraded

- pasturelands in humid costa rica. **New Forests**, v. 39, n. 3, p. 369–385. 2010.
- PLATH, M.; MODY, K.; POTVIN, C.; DORN, S. Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations: Small-scale effects on tree performance and insect herbivory. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 3, p. 741–750. 2011.
- PUTZ, F. E.; ROMERO, C. **Futures of tropical production forests**. Ocasional Paper 143. Bogor, Indonesia. CIFOR. 2015. 40 p.
- PUTZEL, L.; CRONKLETON, P.; LARSON, A.; Pinedo-vásquez, M.; Salazar, O.; Robin, S. Producción y comercialización de bolaina (*Guazuma crinita*), una especie amazónica de rápido crecimiento. Un llamado a la adopción de un marco de políticas. **Brief**, n. 25. CIFOR. 2013. 6 p. URL <http://www.cifor.org/cifor-library/briefs/>.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing (Version 3.4.4). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018. URL <https://www.R-project.org/>.
- RECKNAGEL, F. Applications of machine learning to ecological modelling. **Ecological Modelling**, v. 146, n. 1–3, p. 303–310. 2001.
- REDONDO-BRENES, A. Growth, carbon sequestration, and management of native tree plantations in humid regions of Costa Rica. **New Forests**, v. 34, n. 3, p. 253–268. 2007.
- REDONDO-BRENES, A.; MONTAGNINI, F. Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 232, n. 1–3, p. 168–178. 2006.
- REYNEL, C.; PENNINGTON, R. T.; PENNINGTON, T. D.; FLORES, C.; DAZA, A. **Árboles útiles de la Amazonía Peruana y sus usos**. Tarea Gráfica Educativa. Lima, Perú. 2003. 250 p.
- RUIZ PÉREZ, M.; ARNOLD, J. **Current issues in non-timber forest products research**. Proceedings of the Workshop “Research on NTFP” Hot Springs, Zimbabwe. 1995. 103 p.
- SANTOS, A. T. dos; MATTOS, P. P. de; BRAZ, E. M.; ROSOT, N. C. Equação de volume e relação hipsométrica para plantio de *Ocotea porosa*. **Pesquisa Florestal**

Brasileira, v. 32, n. 69, p13–21. 2012.

O'BRIEN, S. T.; HUBBELL, S. P.; SPIRO, P.; CONDIT, R.; FOSTER, R. B. Diameter, height, crown, and age relationship in eight neotropical tree species. **Ecology**, v. 76, n. 6, p. 1926–1939. 1995.

SELLE, G. L.; VUADEN, E. Crescimento de seis espécies nativas na região central do estado do Rio Grande do Sul. **Ambiência**, v. 6, n. 1, p. 169–192. 2010.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 81, n. 1, p. 13–31. 2008.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 86, n. 3, p. 305–315. 2013.

SOARES, C. P. B.; De PAULA Neto, F.; De SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa. UFV. 2 ed. 2012. 272 p.

SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE JUNIOR, H. U.; SILVA, G. F. Da; FIGUEIREDO, L. T. M. De. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039–1053. 2011.

SOCHA, J. Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 23, n. 3, p. 203–213. 2008.

SOMARRIBA, E. J.; BEER, J. W. Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, v. 18, n. 2, p. 113–126. 1987.

SPURR, S. H.; BARNES, B. V. **Forest ecology**. New York. Ronald Press. 2 ed. 1973. 575 p.

SULLIVAN, A. D.; CLUTTER, J. L. (1972). A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. **Forest Science**, v. 18, n. 1, p. 76–86. 1972.

TOMPPONEN, E.; HALME, M. Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in k-NN estimation: a genetic algorithm approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 1, p. 1–20. 2004.

TOMPPO, E.; OLSSON, H.; STÅHL, G.; NILSSON, M.; HAGNER, O.; KATILA, M. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 1982–1999. 2008.

TONINI, H.; JUNIOR, M. M. C. de O.; SCHWENGBER, D. Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 2, p. 151–158. 2008.

UGARTE, J.; WEBER, J.; SOTELO, C.; CORNELIUS, J. Domesticación participativa de especies forestales. Una estrategia para el desarrollo de mercado forestal. **Tecnología y Sociedad**, Año 16, n. 9, p. 31–41. 2009.

VANCLAY, J. K. Synthesis: Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. **Forest Science**, v. 41, n. 1, p. 7–42. 1995.

VÉGA, C.; ST-ONGE, B. Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 3, p. 951–959. 2009.

VILLANUEVA, J. B.; CASAS, G. G.; LEITE, H. G.; SANTOS, A. A.; JÚNIOR, C. A.; ALCÂNTARA, A. M. de. Análisis de la eficiencia del uso de los diámetros dominantes en la construcción de curvas de índice local con cinco métodos analíticos. **Naturaleza y Sociedad**, v. 1, n. 1, p. 9–15. 2018.

WARING, R. H.; MILNER, K. S.; JOLLY, W. M.; PHILLIPS, L.; MCWETHY, D. Assessment of site index and forest growth capacity across the Pacific and Inland Northwest U.S.A. with a MODIS satellite-derived vegetation index. **Forest Ecology and Management**, v. 228, n. 1–3, p. 285–291. 2006.

WATT, M. S.; DASH, J. P.; BHANDARI, S.; WATT, P. Comparing parametric and non-parametric methods of predicting Site Index for radiata pine using combinations of data derived from environmental surfaces, satellite imagery and airborne laser scanning. **Forest Ecology and Management**, v. 357, p. 1–9. 2015.

WEISKITTEL, A. R.; CROOKSTON, N. L.; RADTKE, P. J. Linking climate, gross primary productivity, and site index across forests of the western United States. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 41, n. 8, p. 1710–1721. 2011.

WEST, P. W. **Tree and Forest Measurement**. Heidelberg-Germany. Springer. 2015. 214 p.