











## EQUAÇÕES DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Guazuma crinita* Mart. EM PLANTIOS FLORESTAIS DA AMAZONIA PERUANA

Duberli Geomar Elera Gonzales<sup>1,2</sup>, José Víctor Valdez Campos<sup>3</sup>, Fernando Alain  
Incio Flores<sup>4</sup>, Lorena de Moura Melo<sup>1</sup>, Géssyca Fernanda de Sena Oliveira  
Mergulhão<sup>1</sup>, Fernando Alexander Delgado Monsalve<sup>5</sup>, Helio Garcia Leite<sup>6</sup>, Carlos  
Antônio Álvares Soares Ribeiro<sup>6</sup>

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. E-mail: duberelera@gmail.com; lorem.moura@gmail.com; eng.gessycasena@gmail.com

2 Universidad Nacional Autónoma de Chota, Chota, Peru.

3 Instituto Tecnológico de la Producción, Pucallpa, Ucayali, Peru. E-mail: jvaldez@itp.gob.pe

4 Universidad Nacional de Frontera, Sulana, Piura, Peru. E-mail: fincio@unf.edu.pe

5 Reforestadora Inca, Ucayali, Ucayali, Peru. E-mail: nando\_unc@hotmail.com

6 Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil. E-mail: hglete@gmail.com; caas.ribeiro@gmail.com

Autor correspondente: Duberli Geomar Elera Gonzales. E-mail: duberelera@gmail.com

### RESUMO

Quantificar e prever o potencial produtivo é uma questão central da modelagem do crescimento e rendimento de florestas plantadas. O objetivo deste trabalho foi ajustar modelos de índice de sítio para plantios comerciais de *Guazuma crinita* na Amazônia central peruana. Dados de 351 parcelas contendo de 3 a 8 medições com idades variando entre 0,9 e 8,1 anos e alturas dominantes de 2,7 até 27,3 m foram utilizados. Os modelos de Schumacher (1), Chapman-Ricards (2), Logístico (3) e de Hossfeld (4) foram testados e a curva média do índice de sítio para cada modelo foi gerada. Curvas de índice de sítio pelo método da curva-guia foram construídas com uma idade índice de 7 anos. Os quatro modelos ajustados resultaram em ajustes bons ( $0,87 < R_{aj}^2 < 0,89$ ) e altamente significativos. A equação  $Ln(H_D) = 3,331735 - 1,61602(1/I)$  sugere-se para estimar o crescimento médio de  $H_D$  em função da idade e a equação  $Ln(S) = Ln(H_D) + 1,61602\left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right)$  pode ser utilizada para calcular o índice de local de um plantio. As curvas de crescimento da altura dominante de *G. crinita* constituem uma ferramenta para conhecer o índice do local, avaliar a produtividade e prever o crescimento do volume em nível de povoamento na área de estudo.

**Palavras-chave:** Bolaina; curva-guia; manejo florestal; modelagem florestal; Peru

## SITE INDEX EQUATIONS FOR *Guazuma crinita* Mart. IN FOREST PLANTATIONS FROM PERU AMAZON

### ABSTRACT

Quantifying and predicting yield potential is a central issue in growth and yield modeling of planted forests. The aim of this work was to adjust site index models for commercial *Guazuma crinita* plantations in central Peruvian Amazon. Data from 351 plots containing 3 to 8 measurements with ages ranging from 0.9 to 8.1 years and dominant heights from 2.7 to 27.3 m were used. The Schumacher (1), Chapman-Ricards (2), Logistic (3), and Hossfeld (4) models were tested and the average site index curve for each model was generated. Site index curves by the guide-curve method were constructed at an index age of 7 years. The four fitted models resulted in good ( $0.87 < R_{aj}^2 < 0.89$ ) and highly significant fits. Equation  $Ln(H_D) = 3.331735 - 1.61602(1/I)$  is suggested to estimate the average growth of  $H_D$  as a function of age and equation  $Ln(S) = Ln(H_D) + 1.61602\left(\frac{1}{I} - \frac{1}{7}\right)$  can be used to calculate the site index of a plantation. The growth curves of the dominant height of *G. crinita* constitute a tool to know the site index, assess productivity, and predict stand-level volume growth in the study area.

**Key words:** Bolaina; guide-curve; forest management; forest modeling; Peru

### ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MENSURAÇÃO FLORESTAL



### INTRODUÇÃO

Os primeiros plantios florestais homogêneos no Peru datam de 1860, quando foi introduzido o eucalipto (*Eucalyptus globulus*) nos andes centrais (Guariguata *et al.*, 2017), ou seja, o país tem mais de 160 anos “manejando” plantios florestais, tempo similar do que outros países com maior extensão de florestas plantadas da região como Brasil ou Chile (Foelkel, 2005); no entanto, o desenvolvimento do setor de plantações florestais em Peru é ainda ínfimo.

De acordo com a FAO (2016) e Guariguata *et al.* (2017), a estagnação do desenvolvimento de florestas plantadas em Peru, deve-se à falta de manejo e monitoramento do crescimento dos plantios estabelecidos em maior quantidade desde o início da década de 1960. Reverter isto, é um dos maiores desafios dos silvicultores do País, especialmente quando plantios de espécies nativas e exóticas continuam a ser estabelecidas sem programas de monitoramento nenhum.

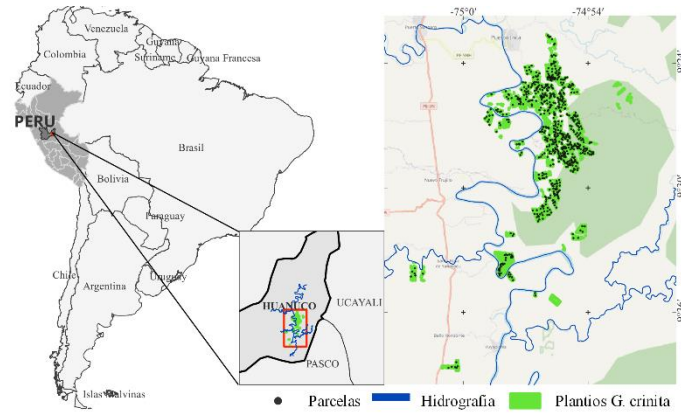
Quantificar e prever a produtividade florestal é questão central da modelagem do crescimento e rendimento, e crucial para manejar povoamentos florestais (Yue *et al.*, 2023). A medida mais comum da produtividade de um sítio florestal é o índice de sítio (IS) (Vissage *et al.*, 2019). Os melhores dados para determinar o IS e gerar curvas de IS de povoamentos florestais é constituída pelos inventários florestais (Campos & Leite, 2017), e a tomada de decisões do manejo estão diretamente afetadas pela disponibilidade dessas informações (Asrat *et al.*, 2020).

Um dos métodos mais utilizados para gerar curvas de índice de sítio é o método da *curva-guia*, que estima as alturas dominantes em função da idade dos plantios a partir funções de regressão (Campos & Leite, 2017). Para contribuir com informações cientificamente validas no desenvolvimento do setor de plantios florestais no País, o presente trabalho tem como objetivo ajustar modelos de índice de sítio para plantios de *Guazuma crinita* Mart., uma espécie nativa que faz parte de plantios comerciais na Amazônia peruana (Elera-Gonzáles, 2018; Casas *et al.*, 2022) e que, forma parte de uma importante cadeia de produção florestal nessa região.

### MATERIAL E MÉTODOS

*G. crinita* é uma espécie heliófita e pioneira em solos ricos em nutrientes, em margens de rios e córregos (Parodi & Freitas, 1990; Kvist & Nebel, 2001; Ugarte *et al.*, 2009), de florestas secundárias e áreas não propensas a inundações (Álvarez Gómez & Ríos Torres, 2009). Os plantios florestais de *G. crinita*, cujos dados são utilizados neste estudo, se localizam 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, na província de Puerto Inca, região Huánuco, na Amazônia central peruana; com amplitude de altitude de 180 a 500 m a.n.m., temperatura média anual de 27°C, umidade relativa média anual de 85% e precipitação anual de 2.000 a 3.000 mm, a maior intensidade de chuvas de novembro a março (Figura 1). A densidade inicial dos plantios foi de 1283 árvores por hectare, implantadas em sistema triangular y espaçamento 3 m x 3m.

## VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal



**Figura 1.** Localização da área de estudo

Dados de altura dominante ( $H_D$ ) e idade ( $I$ ) dos plantios coletados no inventário florestal contínuo (IFC) efetuado entre 2010 e 2016 foram utilizados;  $H_D$  foi determinada como a média das 100 árvores mais altas por hectare (West, 2015), para isto a altura ( $H$ ) da árvore mais alta a cada 100 m<sup>2</sup> por parcela foi medida, logo a média das alturas ( $\bar{H}$ ) para cada parcela foi calculada para determinar  $H_D$ .

Modelos de regressão de  $H_D$  em função de  $I$  foram ajustados, em que as equações resultantes estimam a curva média do IS, também denominada de curva-guia. Para o ajuste dos modelos, dados de 351 parcelas contendo 3 a 8 medições com  $I$  variando de 0,9 a 8,1 anos e  $H_D$  de 2,7 até 27,3 m foram utilizados. Os modelos de Schumacher (1), Chapman-Richards (2), Logístico (3) e de Hossfeld (4) foram testados (Tabela 1). Após o ajuste dos modelos e considerando a definição de índice de sítio de Sabatia & Burkhart (2014) e West (2015), em que  $H_D$  é igual a IS quando a idade do povoamento é igual à idade-índice ( $I_i$ ), as equações para determinar o IS foram geradas (Tabela 1). Curvas de IS para  $I_i = 7$  anos usando o método da curva-guia foram construídas.

**Tabela 1.** Modelos para estimar  $hd$  em função de  $I$  (esquerda) e equações para calcular  $S_i$  (direita)

ID	Modelo	ID	Equação
(1)	$Ln(H_D) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I}\right) + \varepsilon$	(5)	$LnIS = Ln(H_D) - \hat{\beta}_1 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_i}\right)$
(2)	$H_D = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 \cdot I})^{\beta_2} + \varepsilon$	(6)	$IS = H_D \left(\frac{1 - e^{-\hat{\beta}_1 \cdot I_i}}{1 - e^{-\hat{\beta}_1 \cdot I}}\right)^{\hat{\beta}_2}$
(3)	$H_D = \frac{\beta_0}{1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - I}{\beta_2}\right)}} + \varepsilon$	(7)	$IS = H_D x \left[ \frac{1 + e^{\left(\frac{\hat{\beta}_1 - I}{\hat{\beta}_2}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{\hat{\beta}_1 - I_i}{\hat{\beta}_2}\right)}} \right]$
(4)	$H_D = \frac{I^2}{\beta_0 + \beta_1 \cdot I + \beta_2 I^2} + \varepsilon$	(8)	$IS = \frac{H_D}{\hat{\beta}_1 + \left(\frac{I_i}{hd} - \frac{\hat{\beta}_1}{I_i} - \hat{\beta}_2 \cdot I_i\right) \cdot I + \hat{\beta}_2 I^2}$

Em que:  $H_D$  = altura dominante (m);  $I$  = idade do plantio (anos);  $\beta_i$  = parâmetros dos modelos ( $i = 0,1,2$ );  $\varepsilon$  = erro aleatório;  $IS$  = índice de sítio;  $\hat{\beta}_i$  = coeficientes dos modelos ( $i = 1,2$ );  $I_i$  = idade índice (7 anos) (Campos & Leite, 2017; Socha *et al.*, 2020).

## VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

O coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), erro padrão dos resíduos ( $S_{y,x}$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE) foram usados na avaliação da qualidade do ajuste dos modelos, além de análise gráfica conforme sugerido por Silva *et al.* (2018) e Socha *et al.* (2020), finalmente foi selecionado e sugerido o uso de um modelo de índice de sítio para plantios comerciais de *Guazuma crinita* na área de estudo.

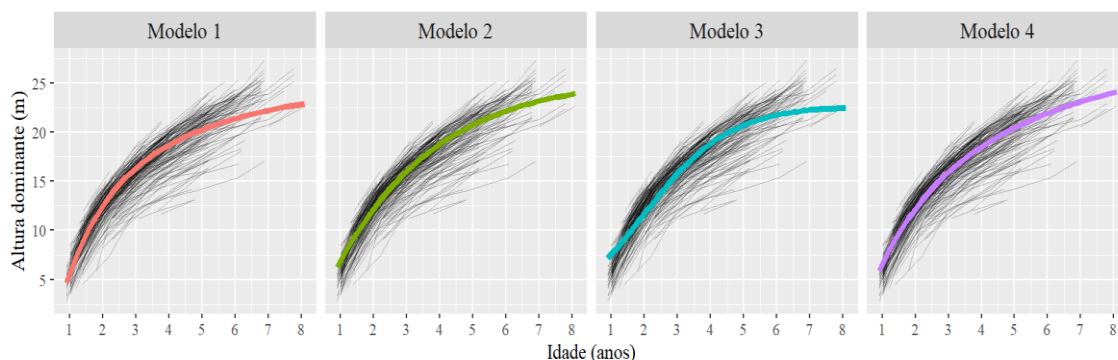
### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes e métricas estatísticas dos quatro modelos ajustados são apresentados na Tabela 2 e as curvas de crescimento médio (curva-guia) da altura dominante estimadas ( $\widehat{H}_D$ ) por cada modelo são apresentadas na Figura 2.

**Tabela 2.** Coeficientes e estatísticas de bondade de ajuste dos modelos ajustados

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R_{aj}^2$	$S_{y,x}$	RMSE	MAE	p-value
(1)	3,331735	-1,61602		0,8860	1,6970	1,6957	1,2826	< 0,001
(2)	25,62434	0,34354	1,06653	0,8891	1,6741	1,6721	1,2572	< 0,001
(3)	22,71658	1,92062	1,31540	0,8759	1,7707	1,7686	1,3595	< 0,001
(4)	0.036621	0.085308	0.030353	0,8927	1,6466	1,6446	1,2587	< 0,001

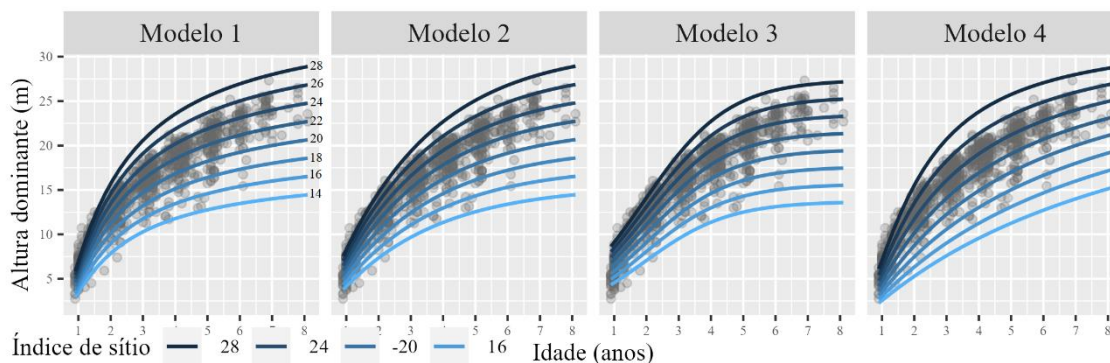
Em que:  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = coeficientes dos modelos;  $R_{aj}^2$  = coeficiente de determinação ajustado;  $S_{y,x}$  = erro padrão dos resíduos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro absoluto médio



**Figura 2.** Curva-guia da altura dominante ( $H_D$ ) gerada por cada um dos quatro modelos ajustados

Os quatro modelos ajustados resultaram em ajustes bons ( $0,87 < R_{aj}^2 < 0,89$ ) e altamente significativos, no entanto, quando  $\widehat{H}_D$  é comparada com  $H_D$  (Figura 2), percebe-se que o modelo 3 tem tendência para estagnação ou decaimento do crescimento aos 8 anos, o que não se condiz com o comportamento biológico das árvores. A escolha de um modelo adequado para uso no manejo florestal não depende só de medidas estatísticas, mas também da representação do realismo biológico do crescimento na modelagem (Campos & Leite, 2017; Socha *et al.*, 2020), sendo crucial o conhecimento do crescimento e comportamento da espécie em campo.

O feixe de curvas de IS em função de  $H_D$  para  $I_i$  de 7 anos, IS variando de 14 e 28 m e amplitudes classe de 2 m apresentadas na Figura 3, abrangem a variabilidade de  $H_D$ ; atingindo os critérios para curvas anamórficas (modelos 1, 2 e 3) e polimórficas (modelo 4) de IS, para fornecer previsões consistentes a partir da medição de  $H_D$  (Sprengel *et al.*, 2022) em plantios de *G. crinita*.



**Figura 3.** Curvas de índices de sítio para as quatro equações geradas

Segundo as estatísticas de ajuste e o feixe de curvas de IS geradas, os modelos testados têm resultados satisfatórios. Porém, no modelo 4 que teve um  $R_{aj}^2$  ligeiramente maior do que os outros, a curva do menor IS ficou fora dos valores observados. Por sua vez, os Modelos 1 e 2, apresentam boas características para captar as informações do crescimento real e potencial da espécie, em que  $hd$  pode atingir até 28 m aos 8 anos. Diante disto, e devido a sua simplicidade, sugere-se o uso do modelo 1 para estimativa do crescimento médio de  $H_D$  em função da idade do plantio, definido por  $Ln(H_D) = 3,331735 - 1,61602(1/I)$  ou  $H_D = \exp[3,331735 - 1,61602(1/I)]$ .

De acordo com o método da *curva-guia*, a equação  $Ln(IS) = Ln(H_D) + 1,61602 \left( \frac{1}{I} - \frac{1}{7} \right)$  ou  $IS = \exp \left[ Ln(H_D) + 1,61602 \left( \frac{1}{I} - \frac{1}{7} \right) \right]$  pode ser utilizada para calcular o IS de um plantio quando estejam disponíveis os valores de  $hd$  e  $I$ . Por sua vez, quando as informações prévias disponíveis forem os valores do IS e o objetivo seja estimar a  $hd$  do plantio, a equação  $Ln(H_D) = Ln(IS) - 1,61602 \left( \frac{1}{I} - \frac{1}{7} \right)$  ou  $H_D = \exp \left[ Ln(IS) - 1,61602 \left( \frac{1}{I} - \frac{1}{7} \right) \right]$  pode ser utilizada.

Estes resultados são os primeiros modelos de IS para plantios de *G. crinita* na Amazônia peruana. Sua importância é fundamental porque *G. crinita* é uma árvore de rápido crescimento que faz parte da cadeia produtiva florestal em nível de pequenos produtores e pequenas empresas que manejam plantios desde inícios desse milênio (Elera-González, 2018; Casas *et al.*, 2022).

## CONCLUSÃO

Foram geradas curvas de crescimento da altura dominante que servem como ferramenta de manejo para identificar o índice do local de plantios comerciais de *G. crinita*, avaliar a produtividade do local e por tanto prever o crescimento do volume em nível de povoamento na área de estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Gómez, L.; Ríos Torres, S. Evaluación económica de parcelas de regeneración natural y plantaciones de bolaina blanca, *Guazuma crinita*, en el Departamento de Ucayali. Iquitos: Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana – IIAP, 2009. 51p. (IIAP. Avances Económicos, 11). Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12921/225>. Acesso em: 15 Jun. 2023.
- Asrat, Z.; Eid, T.; Gobakken, T.; Negash, M. Modelling and quantifying tree biometric properties of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia. *Trees*, v. 34, n. 6, p.1411–1426, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02012-8>.

## VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

- Campos, J. C. C.; Leite, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. 5.ed. Viçosa: Editora UFV, 2017. 636p.
- Casas, G. G.; Gonzáles, D. G. E.; Villanueva, J. R. B.; Fardin, L. P.; Leite, H. G. Configuration of the deep neural network hyperparameters for the hypsometric modeling of the *Guazuma crinita* Mart. in the Peruvian Amazon. **Forests**, v. 13, n. 5, e697, 2022. <https://doi.org/10.3390/F13050697>.
- Elera-Gonzáles, D. G. **Modelagem do crescimento e espacialização da capacidade produtiva de plantios de bolaina (*Guazuma crinita* Mart.) na Amazônia central peruana**. 2018. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/22110>. Acesso em: 12 Jul. 2023.
- Foelkel, C. E. B. Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo. **Revista Visão Agrícola**, v.4, p.66–69, 2005. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va04-florestas-plantadas03.pdf>. Acesso em: 22 Jun. 2023.
- Guariguata, M. R.; Arce, J.; Ammour, T.; Capella, J. L. **Las plantaciones forestales en Perú**: reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro. Bogor: CIFOR, 2017. 39p. (CIFOR. Documento Ocasional, 169) <https://doi.org/10.17528/cifor/006461>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00679-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00679-4).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. **Los bosques y el cambio climático en el Perú**. Roma: FAO, 2016. 145p. (Bosques y Cambio Climático. Documento de Trabajo, 14). Disponível em: [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/7106BE7B0C4BCB9205257F88005301B4/\\$FILE/Los\\_bosques\\_y\\_el\\_cambio\\_clim%C3%A1tico\\_en\\_el\\_Per%C3%BA.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/7106BE7B0C4BCB9205257F88005301B4/$FILE/Los_bosques_y_el_cambio_clim%C3%A1tico_en_el_Per%C3%BA.pdf). Acesso em: 22 Jun. 2023.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90190-M](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90190-M).
- Sabatia, C. O.; Burkhart, H. E. Predicting site index of plantation loblolly pine from biophysical variables. **Forest Ecology and Management**, v.326, p.142–156, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.019>.
- Silva, G. C. C.; Calegario, N.; Silva, A. A. L.; Cruz, J. P.; Leite, H. G. Site index curves in thinned and non-thinned eucalyptus stands. **Forest Ecology and Management**, v.408, p.36–44, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.10.036>.
- Socha, J.; Tymińska-Czabańska, L.; Grabska, E.; Orzeł, S. Site Index models for main forest-forming tree species in Poland. **Forests**, v. 11, n. 3, e301, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11030301>.
- Sprengel, L.; Spiecker, H.; Wu, S. Two subject specific modelling approaches to construct base-age invariant polymorphic site index curves with varying asymptotes. **Silva Fennica**, v. 56, n. 1, e10544, 2022. <https://doi.org/10.14214/sf.10544>.
- Ugarte, J.; Weber, J.; Sotelo, C.; Cornelius, J. Domesticación participativa de especies forestales. Una estrategia para el desarrollo de mercado forestal. **Tecnología y Sociedad**, v. 9, p.31–41, 2009. Disponível em: <http://www.funsepa.net/soluciones/pubs/NDI4.pdf>. Acesso em: 22 Jun. 2023.
- Vissage, J. S.; Greer Jr, T. R.; Brandeis, T. J. Two estimates of site quality for the southern research station forest inventory and analysis program. Asheville: U.S. Department of Agriculture Forest Service; Southern Research Station, 2019. 13p. (Southern Research Station. Research Note, 25). <https://doi.org/10.2737/SRS-RN-25>.
- West, P. W. **Tree and forest measurement**. Cham: Springer, 2015. 214p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14708-6>.
- Yue, C.; Kahle, H.-P.; Klädtke, J.; Kohnle, U. Forest stand-by-environment interaction invalidates the use of space-for-time substitution for site index modeling under climate change. **Forest Ecology and Management**, v.527, e120621, 2023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120621>.