



Índice de local para *Khaya* Spp. usando o diâmetro dominante

Site index for *Khaya* Spp. using the dominant diameter

DOI: 10.55905/oelv21n12-209

Recebimento dos originais: 11/11/2023

Aceitação para publicação: 11/12/2023

Roberta Rodrigues de Oliveira

Mestre em Ciências Florestais

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Av. Universitária, 1.000, Universitário, Montes Claros – MG,

CEP: 39404-547

E-mail: rodrigues.engflorestal@gmail.com

Christian Dias Cabacinha

Doutor em Ciências Ambientais

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Av. Universitária, 1.000, Universitário, Montes Claros – MG,

CEP: 39404-547

E-mail: cabacinha@ufmg.br

Carlos Alberto Araújo Júnior

Doutor em Ciência Florestal

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Av. Universitária, 1.000, Universitário, Montes Claros – MG,

CEP: 39404-547

E-mail: carlosaraujo@ufmg.br

Rodrigo Magalhães Nunes

Graduado em Engenharia Florestal

Instituição: Aperam BioEnergia

Endereço: R. Raul Coelho, 725, Cidade Nova, Capelinha – MG, CEP: 39680-000

E-mail: rodrigo.magalhaesnunes@aperam.com

Ximena Mendes de Oliveira

Doutora em Engenharia Florestal

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia

Endereço: Av. Duane Silva Sousa, s/n, Rodovia PA 275, Parauapebas – PA,

CEP: 68515-000

E-mail: ximena@ufra.edu.br



Sintia Valerio Kohler

Doutora em Engenharia Florestal
Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia
Endereço: Av. Duane Silva Sousa, s/n, Rodovia PA 275, Parauapebas – PA,
CEP: 68515-000
E-mail: sintia.kohler@ufra.edu.br

Luiz Otávio Rodrigues Pinto

Doutor em Engenharia Florestal
Instituição: Universidade Federal de Lavras
Endereço: Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos, s/n, Lavras – MG,
CEP: 37203-202
E-mail: luizorp@outlook.com

RESUMO

A capacidade produtiva de um local está intimamente relacionada ao crescimento e a produção de um povoamento, e é um dos principais pilares para o manejo florestal. O objetivo deste estudo foi classificar a capacidade produtiva de povoamentos de *Khaya* spp. no norte de Minas Gerais, utilizando o diâmetro dominante como parâmetro. Para isso, empregou-se o método da curva guia, ajustando modelos não lineares que relacionam o diâmetro dominante e a idade, como os modelos de Schumacher, Logístico de 3 parâmetros, Prodan, Chapman-Richards, Monomolecular e Bates-Watts. As curvas de índice de sítio foram geradas com uma idade de referência de 240 meses. Na avaliação da qualidade dos ajustes dos modelos, foram consideradas estatísticas como o erro padrão residual, o critério de informação Akaike, a correlação entre valores observados e estimados, e a dispersão residual. Os resultados indicaram que todos os modelos se adequaram devidamente à base de dados, destacando-se o modelo Logístico por sua eficiência em gerar resultados com maior realismo biológico, sendo recomendado para a classificação de sítios e a previsão do diâmetro dominante em povoamentos de mogno africano.

Palavras-chave: crescimento, sítios florestais, mogno africano.

ABSTRACT

The productive capacity of a site is closely related to the growth and production of a stand and is one of the main pillars for forest management. The aim of this study was to classify the productive capacity of *Khaya* spp. stands in the northern region of Minas Gerais, using dominant diameter as a parameter. For this purpose, the guide curve method was employed, adjusting non-linear models that relate dominant diameter and age, such as the Schumacher, 3-parameter Logistic, Prodan, Chapman-Richards, Monomolecular, and Bates-Watts models. Site index curves were generated with a reference age of 240 months. In evaluating the quality of model fits, statistics such as residual standard error, Akaike information criterion, correlation between observed and estimated values, and residual dispersion were considered. The results indicated that all models adequately fit the data, with the Logistic model standing out for its efficiency in producing results with

greater biological realism. It is recommended for site classification and dominant diameter prediction in African mahogany stands.

Keywords: growth, forest sites, African mahogany.

1 INTRODUÇÃO

O gênero *Khaya* é pertencente à família botânica Meliaceae, é oriundo da África, e suas espécies são também conhecidas como mogno africano. Possui grande importância devido a excelente qualidade da sua madeira e apesar de ser uma espécie relativamente nova no Brasil, com introdução no ano 1976 na região Norte (RIBEIRO et al., 2017), vem sendo cultivada, devido ao seu alto retorno financeiro e rentabilidade da madeira, e ganhando forças no mercado internacional de madeiras nobres (REIS et al., 2019).

No Brasil o crescimento de povoamentos equiâneos de mogno africano é crescente e conseqüentemente há necessidade por maiores informações sobre o seu crescimento, produção e um maior controle sobre a cadeia de produção, planejamento e viabilidade econômica. Assim sendo, técnicas de manejo a serem adotadas tendo em vista a obtenção de produtos finais de maior qualidade são de suma importância (RIBEIRO et al., 2017).

A capacidade produtiva de um local está intimamente relacionada ao crescimento e a produção de um povoamento, e é um dos principais pilares para o manejo florestal, pois irá expressar o potencial produtivo de determinado local, servindo para sustentar o planejamento da floresta e auxiliar na formulação de estratégias para a silvicultura (ARIAS-RODIL et al., 2015).

A partir da relação funcional entre uma variável de interesse e a idade do povoamento é possível estimar os índices de local e gerar curvas de sítio que representam a média da variável utilizada das árvores dominantes numa idade de referência, considerada a idade próxima da rotação silvicultural da floresta.

Dentre as variáveis de interesse, a mais usual para indicar a capacidade produtiva é a altura média das árvores dominantes (SELLE et al., 2008; BURKHART e TOMÉ, 2012; JIANG et al., 2015), por possuírem alta correlação com o volume e por ser uma variável pouco afetada pela densidade do plantio. Todavia, alguns trabalhos foram

realizados no intuito de encontrar variáveis alternativas para a classificação da capacidade produtiva local (BELTRAN et al., 2016; LEITE et al., 2011; VILLANUEVA et al., 2016; FU et al., 2017). Segundo LEITE et al. (2011) não há perda de precisão ao utilizar o diâmetro como variável alternativa.

Ainda, quando os povoamentos apresentam como características a baixa incidência de mortalidade, maior espaçamento e conseqüentemente baixo índice de competição, outras variáveis podem ser utilizadas com a finalidade de gerar curvas de sítio, como o diâmetro dominante médio e idade (AVERY e BURKHART, 1994; CAMPOS e LEITE, 2017). A utilização da variável diâmetro dominante, em vez da altura dominante, ainda pode diminuir os custos de estimativa do sítio florestal, por ser uma medida facilmente tomada (BELTRAN et al., 2016).

O índice de local ou índice de sítio, é uma variável de grande aplicabilidade para o desenvolvimento de modelos de prognose do crescimento e produção florestal, pois todos os fatores ambientais são refletidos de forma direta nas variáveis de crescimento e a sua obtenção pode ser realizada de diferentes maneiras. Conforme Campos e Leite (2017) e Pissinin e Schneider (2017), podem ser realizadas a partir da vegetação indicadora; avaliação dos fatores climáticos, edáficos, fisiográficos e bióticos; e da relação altura dominante e idade.

Um dos métodos mais usuais para classificação da capacidade produtiva é o método da curva guia (MIGUEL et al., 2011; PEGO et al., 2015; RETSLAFF et al., 2015; RIBEIRO et al., 2016; CHAVES et al., 2016; SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2020), por ser relativamente simples, sendo mais comum o uso de modelos sigmóides e exponenciais, para descrever o comportamento em relação da altura dominante e idade, ou diâmetro dominante e idade. A partir da equação da curva guia é gerada uma equação de índice local, assim, quando a idade (I) do povoamento for igual à idade índice ou idade de referência (I_i), a altura ou o diâmetro dominante é igual ao índice de local.

Poucos são os trabalhos realizados para o estudo de sítios florestais para o mogno africano, além de serem realizados em condições de irrigação (RIBEIRO et al., 2016). Assim, pouco se sabe sobre o crescimento da espécie em condições específicas de cultivo e em regiões de temperaturas elevadas e de déficit hídrico acentuado, por exemplo.

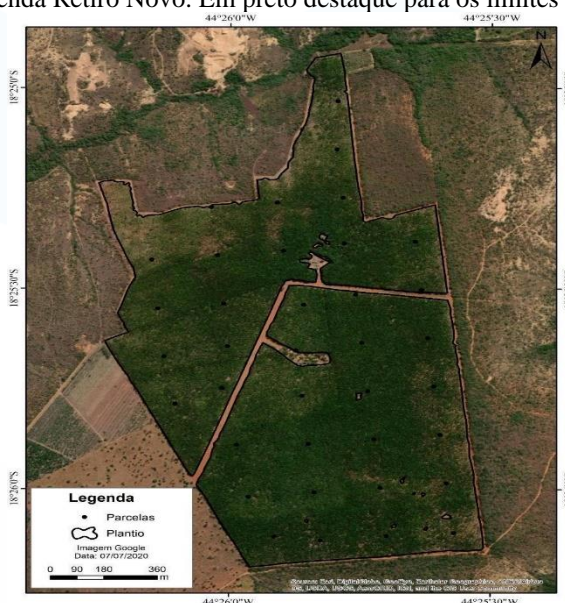
O mogno africano por ser uma espécie de origem tropical, apresenta sensibilidade a altas temperaturas, uma vez que esse aumento em conjunto com a baixa umidade do solo, geram alterações nos processos biológicos, podendo levar a um estresse hídrico. Dessa forma, ter melhor compreensão da sensibilidade de uma floresta a condições edafoclimáticas distintas, é de suma importância para prever o seu desenvolvimento futuro (LOCOSSELLI et al., 2020).

Mediante o exposto, ao observar a lacuna existente sobre o real potencial produtivo do mogno africano cultivado em regiões de déficit hídrico no Brasil e atrair atenção para o tema, o objetivo deste trabalho foi gerar curvas de índice de local para um plantio de *Khaya* spp. localizado no Norte de Minas Gerais, região caracterizada por um clima semiárido, a partir do diâmetro dominante, aplicando o método da curva guia.

2 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em um povoamento não irrigado e não desbastado de *Khaya* spp, situado na fazenda Retiro Novo (Figura 1), localizada na cidade de Corinto, estado de Minas Gerais (latitude: 18°25'74'' e longitude: 44°25'71'') com altitude média variando entre 500 e 700 metros (ROMANO et al., 2014).

Figura 1- Fazenda Retiro Novo. Em preto destaque para os limites da propriedade.



Fonte: Dos autores, 2023.

A evapotranspiração potencial anual varia entre 1.100 a 1.200 mm, com déficit hídrico acentuado que pode chegar a 210 mm (ROMANO et al., 2014). Verificam-se restrições hídricas e má distribuição das chuvas na região do plantio. Geralmente ocorre um período de estiagem variando de quatro a sete meses, e o maior volume de chuvas concentram-se entre os meses de outubro a abril, o que pode afetar o crescimento, uma vez que o mogno africano é considerado uma espécie que depende diretamente de fatores como radiação solar, água e nutrientes (PINHEIRO et al., 2011).

A classificação climática do município é do tipo Aw, clima tropical de savana, segundo Köppen e Geiger, com temperatura média anual variando entre 22° a 28°C, onde a temperatura do mês mais quente varia entre 27,5° a 30,5°C, e do mês mais frio varia entre 14,5° a 19°C.

O relevo da propriedade é caracterizado como plano a suave ondulado, sendo de fácil mecanização em todas as etapas da produção florestal, apresentando declividades entre 0,5 a 4%, sem elevações topográficas mais proeminentes.

A área em estudo é um plantio de mogno africano (*Khaya* spp.), divididos em nove talhões de acordo com a data de plantio, totalizando 172,21 hectares, com variações nas idades e no espaçamento (Tabela 1).

Os dados são provenientes de inventários florestais contínuos (IFC) de 37 parcelas circulares de 1.018 m², distribuídas de forma sistemática com uma distância de 212 metros entre as parcelas. Esse raio foi utilizado em função do espaçamento do plantio, de modo a ter uma maior representatividade de árvores nas parcelas. Foram realizadas três medições das parcelas, nos anos de 2018, 2019 e 2020, com um intervalo de aproximadamente 12 meses entre as medições.

Tabela 1-Descrição dos talhões inventariados com as idades no ano de 2020.

Talhão	Área Talhão (ha)	Idade (anos)	Espaçamento (metros)
1	5,55	9,83	5,0 x 4,0
2	11,25	9,83	4,5 x 5,0
3	32,04	9,42	6,5 x 4,0
4	13,86	9,33	5,0 x 4,5
5	19,22	9,33	5,0 x 4,0
6	30,72	9,25	6,0 x 4,0
7	17,82	9,17	5,0 x 4,0
8	3,22	9,17	5,0 x 4,0
9	38,53	9,08	5,5 x 4,5

Fonte: Dos autores, 2023.

Foram amostrados de 45 a 55 indivíduos por parcela, os diâmetros de todas as árvores das parcelas foram coletados à altura de 1,30 metros do solo (DAP) com uma fita diamétrica, as medidas de altura foram tomadas apenas das árvores pertencentes às duas fileiras centrais de cada parcela.

Em todas as parcelas foram medidas a altura total (Ht) e altura comercial (Hc) de 15 a 16 árvores com um dendrômetro de medição a laser, o CRITERION RD 1000, definindo a priori que a altura comercial seria a altura correspondente à altura da inserção do primeiro galho de cada árvore.

Na Tabela 2 é apresentada uma síntese dos dados coletados da área em estudo para os três inventários realizados.

Tabela 2- Análise descritiva das variáveis nas diferentes idades inventariadas.

Variáveis	Inventários		
	2018	2019	2020
DAPmin (cm)	3,4	4,0	8,6
DAPmáx(cm)	27,0	30,9	34,7
DAPmédio(cm)	15,8	17,8	19,6
Desvio padrão	3,1	3,7	3,6
Var.	9,8	12,8	13,0
Cv(%)	19,85	20,09	18,40
HTmin(m)	2,8	2,9	9,3
HTmáx(m)	19,8	24,4	28,5
HTmédio(m)	13,7	14,7	17,5
Desvio padrão	2,2	2,2	2,3
Var.	4,6	4,9	5,1
Cv(%)	15,56	15,05	12,89

Nota: DAPmin=diâmetro mínimo em centímetros; DAPmáx=diâmetro máximo em centímetros; DAPmédio=diâmetro médio em centímetros; Var.= variância; Cv (%) = coeficiente de variação em porcentagem; Htmin= altura total mínima em metros; Htmáx=altura total máxima em metros; HTmédio =altura total média em metros; \bar{V} =volume médio por parcela em cada idade. Fonte: Dos autores, 2023.

A classificação da capacidade produtiva foi realizada utilizando as relações de diâmetro dominante (Ddom) definida pelo critério de Assman (ASSMANN, 1970) e idade (Id), pelo fato de o povoamento em questão apresentar baixa competição entre os indivíduos. Aproximadamente 4% de mortalidade de acordo com os dados coletados.

A classificação da capacidade produtiva local foi realizada com a construção de curvas de índices de local anamórficas, utilizado o método da curva guia (CLUTTER et al., 1983; BILA et al., 2012; RIBEIRO et al., 2016), assumindo uma idade de referência de 240 meses (SANTOS, 2019). Para geração da curva guia, os modelos de Schumacher, Logístico 3 parâmetros, Prodan, Chapman-Richards, Monomolecular e Bates e Watts (Tabela 3), foram ajustados aos pares de dados de Ddom e Id.

Tabela 3- Modelos testados para modelagem do diâmetro médio dominante.

Modelos	
Schumacher	$D_{dom} = \beta_0 * \exp\left(\beta_1 * \left(\frac{1}{Id}\right)\right)$
Logístico	$D_{dom} = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 * \exp(-\beta_2 * Id)}$
Prodan	$D_{dom} = \frac{\beta_0}{\beta_0 + \beta_1 * Id + \beta_2 * Id^2}$
Chapman-Richards	$D_{dom} = \beta_0 * (1 - \exp(-\beta_1 * Id))^{\beta_2}$
Monomolecular	$D_{dom} = \beta_0 * (1 - \beta_1 * \exp(-\beta_2 * Id))$
Bates-Watts	$D_{dom} = \beta_1 * (1 - \exp(\beta_2 * Id))$

Nota: Ddom= diâmetro médio das árvores dominantes da i-ésima unidade amostral (cm); Id = idade da i-ésima unidade amostral (meses); exp =exponencial; β_{is} = parâmetros.

Fonte: Dos autores, 2023.

Para todos os modelos ajustados foram geradas quatro curvas, em três classes de local, com uma amplitude de 5 cm. A escolha do número de classes e do intervalo entre elas se deu pela amplitude dos valores de diâmetro dominante, o qual determinou os limites inferiores e superiores das classes de produtividade. Para os ajustes e estimativas dos parâmetros e aplicação dos modelos foram utilizados o código nls do software R Core Team (2020) e o Microsoft Excel®.

A avaliação do ajuste dos modelos foi realizada a partir das estatísticas do erro padrão residual (Syx) (Eq. 1) e percentual (Syx%) (Eq. 2), critério de informação de Akaike (AIC) (Eq. 3), correlação de Pearson (r) (Eq. 4), a consistência observada entre



as curvas de índices de local, a dispersão dos diâmetros médios dominantes observados e a análise gráfica dos erros relativos (ER%) (Eq. 5), sendo:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y - \hat{y})^2}{n-p-1}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$AIC = 2 * k - 2 \ln(L) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$r = \frac{\sum_i^n (y - \bar{y}) * (\hat{y} - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_i^n (y - \bar{y})^2 * \sum_i^n (\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$ER(\%) = \frac{(y - \hat{y})}{y} * 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

S_{yx} =erro padrão residual (m); $S_{yx}(\%)$ =erro padrão residual relativo; y =valor observado da variável dependente; \hat{y} =valor estimado da variável dependente; n =número de observações; p =número de parâmetros do modelo; k =número de variáveis independentes do modelo ($k=1$) L =valor da máxima verossimilhança; \ln =logaritmo neperiano.

Realizou-se a geração das curvas de sítio para auxiliar na avaliação dos ajustes dos modelos testados e adicionalmente obteve-se somente para o melhor modelo selecionado, a equação correspondente para estimativa do índice de local.

Com objetivo de realizar a espacialização da informação de sítio das parcelas para a área, todos os diâmetros dominantes observados para as diferentes idades foram transformados para diâmetro dominante na idade de referência a partir da equação gerada pelo o modelo selecionado.

Posteriormente, essa informação da parcela foi espacializada utilizando um recurso de informação geográfica (SIG) com intuito de interpolar os dados a partir do

método de IDW (Inverse Distance Weighted). Segundo Stole (2008), quando se pretende auferir informações contínuas da superfície, para facilitar a visualização espacial a partir de mapas, por exemplo, a utilização de interpolação é necessária.

A interpolação realiza estimativa de um local não amostrado com base em locais amostrados. O método de interpolação IDW utiliza a média ponderada dos locais amostrados e a distância entre eles, assim quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior será a correlação entre seus valores. O valor interpolado para cada ponto de interesse é a média ponderada dos valores observados (com peso W), que é inversamente proporcional às distâncias entre os pontos observados (FLORENTIM et al., 2021). No presente trabalho o método IDW foi utilizado para encontrar locais com a mesma capacidade produtiva a partir de pontos já conhecidos.

$$Z_{(x)} = \frac{\sum_i^n W_i Z_i}{\sum_i^n W_i} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que: $Z_{(x)}$ = é o valor da variável a ser interpolada em um pixel de localização x ; x = localização do pixel onde se quer interpolar um valor de Z ; Z_i = valor da variável em análise mensurada em uma dada localização x_i ; i = unidades amostrais consideradas.

$$W_i = \frac{1}{d_i^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que: W_i = é o peso de ponderação; d_i = distância de x_i para x (x_i = localização da unidade amostral onde uma determinada variável foi medida e x = localização do pixel onde se quer interpolar um valor de uma dada variável); i = unidades amostrais consideradas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos apresentam estatísticas muito próximas (Tabela 4), principalmente em relação ao erro padrão de estimativa ($Sy_x\%$) e a correlação de Pearson (r), porém o modelo Logístico apresentou valores ligeiramente melhores que os demais modelos, com

um $Syx\%=8,1191$ e uma correlação de $0,7393$. Silva (2020) também apontou o modelo Logístico como o modelo que apresentou os melhores valores estatísticos em seus ajustes.

De maneira geral todos os modelos testados apresentaram bons resultados de ajuste para a base de dados, apresentando uma distribuição residual semelhante (Figura 2a,2b, 2c, 2d, 2e, 2f) ,apesar de ser um dos elementos primordiais para avaliação da qualidade de um modelo, a observação da dispersão gráfica dos resíduos distribuídos em função da variável de interesse D_{dom} (diâmetro dominante) não permitiu determinar qual o modelo melhor se ajustou à base de dados.

Ao analisar os gráficos de dispersão dos resíduos percentuais das seis equações ajustadas, observou-se que não existe nenhuma evidência de tendenciosidade. De uma forma geral, os erros foram inferiores a $\pm 25\%$.

Tabela 4- Estimativas dos parâmetros obtidos nos ajustes dos modelos aos dados do povoamento do Mogno Africano.

Parâmetros	Erro padrão	t-valor
Schumacher ($Syx=1,7426$ cm; $Syx\%=8,1225$; $r= 0,7385$; $AIC=444,46$)		
51,3213	3,940	13,03
-86,4784	7,675	-11,27
Logístico ($Syx=1,7418$ cm; $Syx\%=8,1191$; $r= 0,7393$; $AIC=446,19$)		
28,1395	4,854	5,79
13,0808	18,345	0,71
0,0379	0,022	1,73
Prodan ($Syx=1,7421$ cm; $Syx\%=8,1207$; $r= 0,7392$; $AIC=446,24$)		
363,7638	421,329	0,86
-3,2933	8,519	-0,39
0,0427	0,043	1,00
Chapman-Richards ($Syx=1,7421$ cm; $Syx\%=8,1207$; $r=0,7392$; $AIC=446,25$)		
29,5747	7,844	3,77
-0,0268	0,025	-1,06
4,3376	7,498	0,57
Monomolecular ($Syx=1,7426$ cm; $Syx\%=8,1226$; $r=0,7390$; $AIC=446,29$)		
31,1890	10,648	2,93
2,1446	2,912	0,74
-0,0195	0,022	-0,91
Bates e Watts ($Syx=1,7481$ cm; $Syx\%=8,1484$; $r= 0,7371$; $AIC=444,98$)		
88,9802	47,595	1,87
-0,0028	0,002	-1,62

Nota: β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes dos modelos; $Syx(\%)$ =erro por cento; r = correlação de Pearson.
Fonte: Dos autores, 2023.

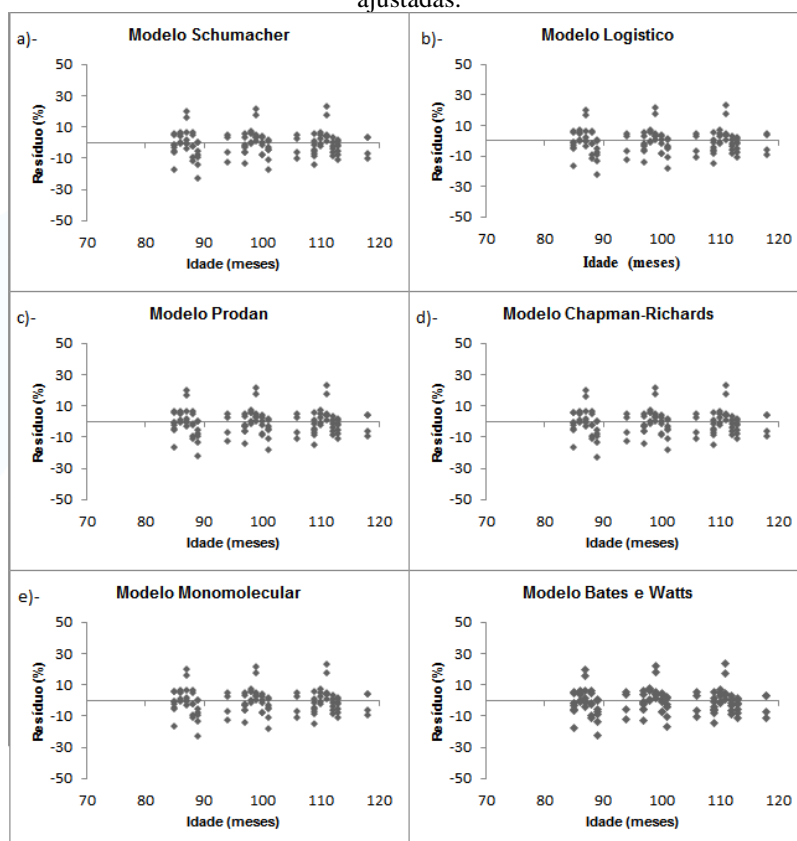


Ao analisar os gráficos de dispersão dos resíduos percentuais das seis equações ajustadas, observou-se que não existe nenhuma evidência de tendenciosidade. De uma forma geral, os erros foram inferiores a $\pm 25\%$.

A idade de referência comumente é determinada de forma arbitrária, sendo geralmente próxima a idade de rotação (colheita final) prevista para o povoamento. A definição da idade de referência é primordial para a classificação da capacidade de produção local. No entanto, pelo fato de informações da espécie em questão ser considerada incipiente no Brasil, a idade de colheita final ainda é questionável e segundo Santos et al. (2019), especialistas em inventário e manejo florestal apontam 240 meses (20 anos) como idade de corte final.

Contudo, verificou-se na literatura a existência de um trabalho em que a idade de referência utilizada foi de 15 anos. Neste estudo, Ribeiro et al. (2016), utilizaram dados de plantios brasileiros de mogno africano (*Khaya ivorensis*) irrigados, para avaliar diferentes modelos de crescimento em altura dominante, comparando modelos dinâmicos invariantes com a idade padrão e modelos estáticos.

Figura 2 - Gráficos de dispersão de resíduos em função do diâmetro dominante estimada pelas equações ajustadas.



Fonte: Dos autores, 2023.

A Tabela 5 apresentam os limites inferiores e superiores para a classificação proposta neste estudo para os diferentes modelos avaliados, além do índice de local de cada classe. A família de curvas de sítio geradas por cada modelo é apresentada na Figura 3.



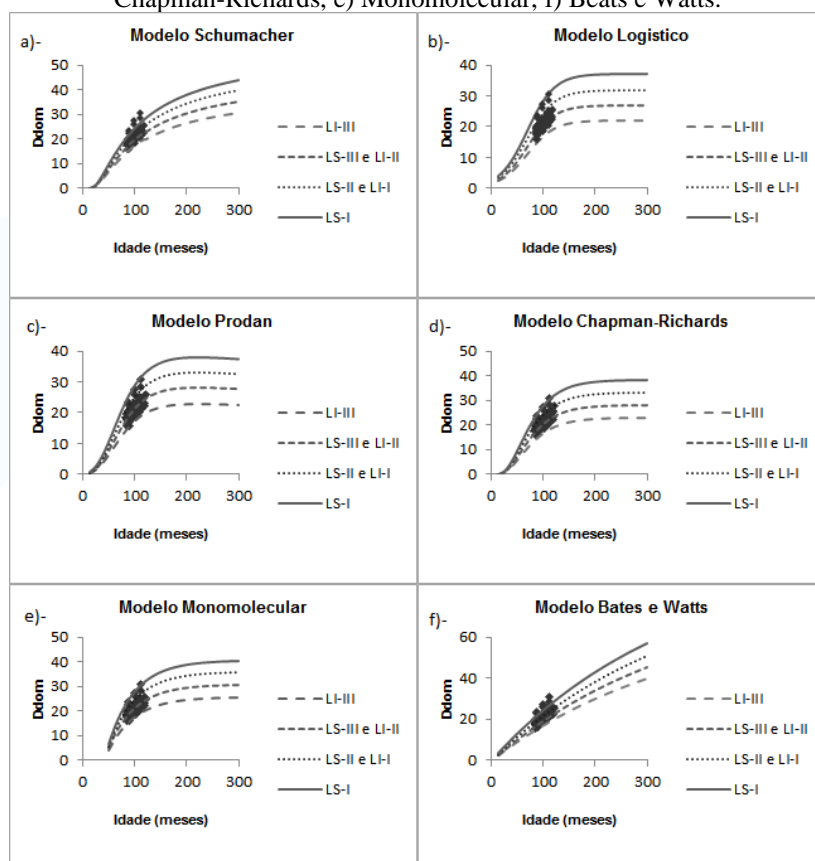
Tabela 5- Limite das classes de sítio para os modelos ajustados.

Modelos	Classe	Limite inferior	Limite superior	Índice de Sítio (S)
Schumacher	I	39	44	41,5
	II	34	39	36,5
	III	29	34	31,5
Logístico	I	32	37	34,5
	II	27	32	29,5
	III	22	27	24,5
Prodan	I	33	38	35,5
	II	28	33	30,5
	III	23	28	25,5
Chapman-Richards	I	33	38	35,5
	II	28	33	30,5
	III	23	28	25,5
Monomolecular	I	43	48	45,5
	II	38	43	40,5
	III	33	38	35,5
Bates-Watts	I	45	50	47,5
	II	40	45	42,5
	III	35	40	37,5

Fonte: Dos autores, 2023.

Assim como no trabalho realizado por Leite et al. (2011), a variável diâmetro dominante apresentou uma tendência de crescimento em relação a idade de forma exponencial (Figura 3), assim como acontece, quando se utiliza a variável altura dominante, levantando a possibilidade de ser utilizada como uma variável alternativa para classificação de sítios florestais.

Figura 3-Curvas de índice de sítio para os modelos: a) Schumacher e Hall, b) Logístico, c) Prodan, d) Chapman-Richards, e) Monomolecular, f) Beats e Watts.



Fonte: Dos autores, 2023.

Nota-se que os diâmetros médios dominantes estão mais concentrados no sítio II, ou seja, a classe intermediária, para todos os modelos, assim como observado por Bila et al. (2012); Miguel et al. (2011) e Pego et al. (2015). Observa-se que à medida que se caminha para as classes das extremidades diminui o número de parcelas nessas classes, como exemplo na classe I, a de maior produtividade, com apenas duas parcelas.

Ainda é possível inferir sobre a Figura 3 que as curvas de índice de local geradas pelos modelos Logístico, Prodan, Chapman-Richards (Figura 3b, 3c e 3d), melhor se ajustaram ao comportamento dos dados de diâmetros dominantes, portanto as curvas geradas por estes modelos, foram as que melhor descreveram o comportamento dos dados observados.

Em trabalho sobre altura dominante e índice de sítio para *Pinus taeda* em dois pólos de desenvolvimento florestal no Sul do Brasil, Schuchovski et al. (2019), apontaram

o modelo de Chapman-Richards como o melhor para descrever a tendência dos dados observados. O mesmo resultado foi observado por Retslaff et al. (2015).

Ao realizarem a classificação de sítios florestais em povoamentos de eucalipto na microrregião de Salinas, Minas Gerais, Pego et al. (2015), concluíram que o modelo de Prodan melhor se aderiu a base de dados para classificação das parcelas.

Melo et al. (2017), apontaram o modelo Logístico como o mais preciso para estimativa do crescimento em altura média das árvores dominantes e codominantes para clones de eucalipto. Ao comparar os limites das classes de sítios estimadas para este modelo, apresentando índice de sítios de 34,5; 35,5 e 35,5; respectivamente, aos 20 anos, em uma realidade de condições específicas cujo déficit hídrico é acentuado apresentando uma evapotranspiração potencial anual entre 1.100 a 1.200 mm, com o crescimento de um povoamento com uma idade mais avançada de 40 anos, com precipitação pluviométrica anual de 2.000 mm a 2.900 mm, porém com um espaçamento mais adensado de 3,00 m x 3,00 m, totalizando 1.111 árvores por hectare, localizado na Malásia, chegando ao diâmetro médio de 46,80 cm (YAHYA et al., 1999), interpretou-se que o modelo Logístico estima um crescimento mais realísticos que os demais modelos avaliados.

O modelo de Schumacher (Figura 3a) tende a ter um comportamento de estagnação mais tardia em contrapartida ao modelo Logístico, Prodan e Chapman-Richards (Figura 3b, 3c e 3d) a assíntota acontece de forma mais precoce e são modelos visivelmente com características sigmoidais mais expressivas que os demais modelos, corroborando com trabalho realizado por (SILVA et al., 2018), onde o modelo Logístico, também apresenta uma configuração sigmoidal mais expressiva e uma formação de assíntota mais prematura.

Para o presente trabalho a família de curvas geradas pelo modelo Logístico, abrangeu todos os dados nas idades iniciais até as idades mais avançadas (Figura 3b), sendo o modelo que melhor acompanhou a tendência dos dados. Para os modelos de Schumacher e Bates-Watts (Figura 3a e 3f), as curvas plotadas sobre os diâmetros dominantes observados não contemplaram todos os dados observados, não apresentando uma boa tendência de crescimento em relação às curvas de sítio. Silva (2020), ao testar o

modelo de Chapman-Richards na classificação de sítios em plantio florestal de eucalipto no estado de Amapá, verificou também que este modelo não englobou todos os dados.

Ao observar os valores de índice de sítio para os diferentes modelos e o comportamento das curvas de sítio, observa-se que os modelos de Schumacher, Monomolecular e Bates-Watts apresenta comportamento crescente (Figura 3a, 3e, 3f) e superestimam o diâmetro da árvore dominante na idade de referência.

Esses modelos apresentaram para o sítio mais produtivo, os seguintes índices respectivamente: 41,5; 45,5; 47,5 cm, aos 20 anos. Ao comparar estes diâmetros com o diâmetro estimado por Pinheiro et al. (2011), de 1,8 m de circunferência (~57,30 cm de diâmetro) para um plantio irrigado e desbastado em Pirapora-MG aos 17 anos, e comparando também estes diâmetros médios, com um trabalho em solos produtivos da Costa do Marfim, aos 31 anos, onde o talhão possuía 70 árvores por hectare, em que as árvores atingiram uma média de 57,00 cm de diâmetro e 38,50 m de altura (LEMMENS, 2008), verifica-se que os modelos supracitados superestimaram os diâmetros dominantes.

Segundo Melo et al. (2017), os modelos que apresentam o menor erro são os mais sugeridos para a construção das curvas de sítio. Partindo desse pressuposto, o modelo ajustado que apresentou melhor desempenho foi o Logístico, apresentando um $Sy_x\%$ de 8,1191, ligeiramente menor quando comparados com os demais modelos.

Os resultados mostraram ainda, que todos os modelos apresentam uma forte correlação das variáveis dependentes e independentes. De acordo com Skimakura (2006), os valores de correlação entre as variáveis para serem considerados fortes variam entre 0,70 e 0,89 e para serem considerados muito fortes apresentam valores de correlação iguais ou superiores a 0,90.

O modelo que apresentou uma correlação ligeiramente mais alta que os demais modelos foi o modelo Logístico, com um valor de correlação 0,7393. Resultados similares são encontrados em alguns trabalhos sobre classificação da capacidade produtiva que apontam o modelo Logístico com os melhores desempenhos estatísticos, como Melo et al. (2017) e Silva (2020).

Em conjunto, considerando as análises estatísticas, os gráficos de distribuição residual e as tendências das curvas de índice de sítio, o modelo Logístico apresentou o

melhor resultado, conseqüentemente este foi considerado o melhor modelo para a classificação de sítios para o povoamento em estudo.

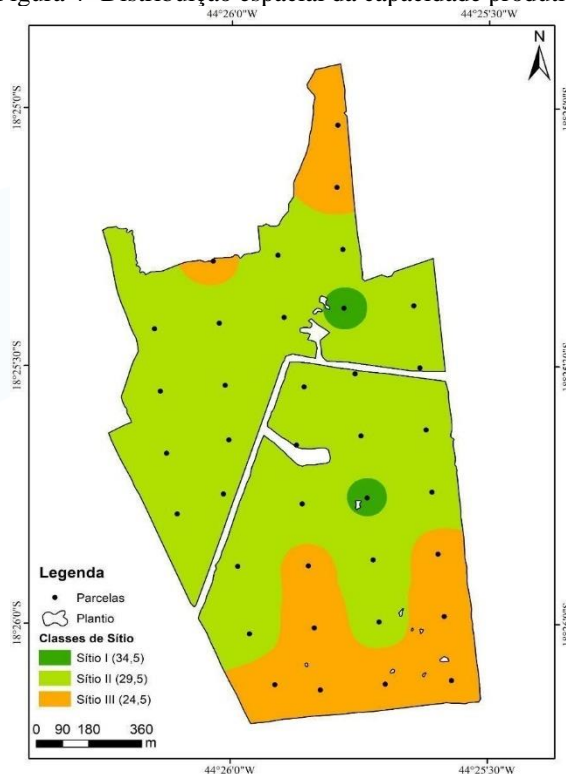
De acordo com Machado et al. (1997), ao passo em que o povoamento vai ficando mais velho, a variável estudada vai ficando mais estável, de maneira que sofre menos variações, ganhando uma estabilidade dentro de uma única curva de sítio. Já, segundo Clutter et al. (1983), um ponto importante para a construção das curvas de índice de local é que a variável média das árvores da parcela utilizada, se encontrem durante toda vida em uma mesma classe, servindo como base confiável para futuros estudos de crescimento e produção florestal.

A classificação da capacidade produtiva foi realizada para as parcelas remedidas nos três inventários florestais, dessa forma, com a classificação de cada parcela em cada idade de medição foi verificada a estabilidade para classificação final da parcela em uma determinada classe de sítio.

Para o modelo o modelo selecionado foi possível perceber que aproximadamente 84% das parcelas permaneceram na mesma classe em todas as idades de medição e os outros 16% de parcelas, mudaram apenas uma vez de um sítio para outro. Isso confirma mais uma vez a robustez do modelo selecionado para a classificação.

Na figura 4, é apresentada a espacialização da classificação para o povoamento em estudo, através do método IDW. Nota-se que majoritariamente o povoamento é classificado no sítio II ($S=29,5$ cm), em seguida sítio III ($S=24,5$ cm), e pequenas manchas associadas ao sítio I ($S=34,5$ cm).

Figura 4- Distribuição espacial da capacidade produtiva



Fonte: Dos autores, 2023.

As manchas classificadas como sítio I, tratam-se claramente de micro sítios dentro do povoamento e estão associadas a duas parcelas da base de dados (parcelas 9 e 22). Na visão de Skovsgaard e Vanclay (2013), ao avaliar a produtividade local de um povoamento florestal específico, é natural atribuir ao povoamento que as condições do local são homogêneas, porém em muitos casos ocorrem o que se chama de micro sítios, que seria definido como condição ambiental específica, próxima a uma árvore individual, apresentando semelhanças espaciais, porém com alguma propriedade específica local que pode causar um crescimento diferente para aquela região.

Como observado em estudo de [Bathgate et al. \(1993\)](#), ao estudar os efeitos do micro sítio no crescimento individual da árvore, em uma plantação de *Eucalyptus regnans* F. Muell, plantados em solo de origem vulcânica, na Nova Zelândia, com o mapeamento da produtividade local, percebeu-se a alta variabilidade, e um crescente índice de mortalidade e baixo crescimento em região de cinzas, quando comparado com as áreas adjacentes, sugerindo que a propriedade específica de uma pequena porção da área



plantada possa contribuir para a mortalidade e baixo desenvolvimento naquele micro sítio específico.

Não foi possível desconsiderar para a classificação a existências desses micros sítios, uma vez que em todas as amplitudes de classe testadas durante a fase de classificação, estas duas parcelas sempre foram classificadas em sítios mais produtivos e separadas das demais parcelas da base de dados.

Em trabalho de Bila et al. (2012) sobre classificação de sítios florestais com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Prata, Minas Gerais, com características edafoclimáticas semelhantes às do estudo em questão, realizaram a espacialização dos sítios encontrados e também verificaram que o sítio II, com capacidade produtiva intermediária, possuía a maior área estabelecida, sendo encontradas pequenas machas associadas aos sítios I e III.

O ajuste do modelo Logístico para estimativa do índice de local gerou a seguinte equação (Eq.8):

$$S = D_{dom} * \left[\frac{1 - 5,59 \times 10^8 * \exp(9,98 \times 10^{-4} * Id_{ref})}{1 - 5,59 \times 10^8 * \exp(9,98 \times 10^{-4} * Id)} \right] \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

S=Índice de local (cm); D_{dom} =diâmetro médio (cm) das árvores dominantes na idade atual; I_d =idade atual (meses) e I_{dref} =idade de referência (meses).

A equação 8 retornou um $S_{yx}=0,7689$ cm; $S_{yx}\%=3,3908$ e $r=0,9584$. Esta equação permite a partir de dados de diâmetro médio das árvores dominantes em uma idade atual de unidades amostrais, estimar o índice de sítio na idade de referência.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicam que:

1. Todos os modelos avaliados para estimar o diâmetro dominante demonstraram adequação aos dados, conforme evidenciado pelas estatísticas de ajuste e



dispersão residual;

2. Notavelmente, o modelo Logístico destacou-se ao apresentar o melhor ajuste e produzir resultados com maior realismo biológico.

REFERÊNCIAS

- ARIAS-RODIL, M; et al. Evaluation of age-independent methods of estimating site index and predicting height growth: a case study for maritime pine in Asturias (NW Spain). *European Journal of Forest Research*, v. 134, p. 223-233, 2015.
- ASSMANN, E. The principles of forest yield study. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.
- AVERY , T.E.; BURKHART, H.E Forest measurements.4ed. New York: McGrawHill Book Co,1994,408 p.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. Forest mensuration. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- BATHGATE, J. L.,et al. Microsite effect on Eucalyptus regnans growth. *New Zeal. J. For. Sci.* 23, 154–162, 1993.
- BELTRAN, H. A. et al. Diametric site index: an alternative method to estimate site quality in nothofagus obliqua and n. Alpina Forests. *CERNE*. vol.22, n.3, pp.345-354. ISSN 2317-6342. 2016.
- BILA, J. M.; SANQUETTA, C. R.; MACHADO, S. do A. Classificação de sítios com base em fatores edáficos para Pinus caribaea var, hondurensis na região de Prata, Minas Gerais. *Floresta, Curitiba*, v. 42, n. 3, p. 465–474, 2012.
- BURKHART, HE; TOMÉ, M. Modelagem de árvores florestais e Stands. Springer, 2012. 457p.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. Mensuração florestal: perguntas e respostas.5 ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2017. 605p.
- CHAVES, A.G.S.; et al. Capacidade produtiva de Tectona grandis L.f no Sudoeste de Mato Grosso. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 415-424, jun. 2016.
- CLUTTER, J. C. et al., Timber management: a quantitative approach. 3. Ed. New York: John Willey e Sons, 1983. 333p.
- FLORENTIM, E. T. de S.; et al. Spatialization of monthly and annual rainfall erosivity in the Córrego Fundo hydrographic basin, Aquidauana-MS. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 1, p. e3110111173, 2021.
- FU, L ; et al. Comparing height–age and height–diameter modelling approaches for estimating site productivity of natural uneven-aged forests.*Forestry An International Journal of Forest Research* ,2017.

JIANG, H. et al. Climate- and soil-based models of site productivity in eastern US tree species. *Can. J. For. Res.* 45, 325–342, 2015.

LEITE, H., et al. Classificação da Capacidade Produtiva de Povoamentos de Eucalipto Utilizando Diametro Dominante. *Silva Lusitana*, 19 (2), 169-183. (2011).

LOCOCELLI, G.M.; et al. Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. vol. 117 no. 52 . *PNAS*. University of São Paulo, Sao José dos Campos, Brazil, December 29, 2020.

MACHADO, S. A. et al. Classificação de sítio para bracatingais na região metropolitana de Curitiba. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 35, p. 21-37, 1997

MELO, E.A.; et al. Modelagem não linear da relação hipsométrica e do crescimento das árvores dominantes e codominantes de *Eucalyptus* sp. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1325-1338, out.-dez., 2017.

MIGUEL, E. P.; et al. Classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla* em Niquelândia, estado de Goiás. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1- 11, mai. 2011.

PEGO, M. F. F.; ASSIS, A. L. de; CABACINHA, C. D. Classificação de sítios florestais em povoamentos de eucalipto na microrregião de Salinas, Minas Gerais. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 11, n. 1, p. 1-5, jun. 2015.

PINHEIRO, L. P. et al., Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos africanos (*Khaya* spp.). Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura - SBAG, 2011. 102 p

PISSININ, L. Z.; SCHNEIDER, P. R. Tendências de crescimento em altura dominante de dois clones de *Eucalyptus saligna* Smith implantados em distintas condições de solo. *Ciênc. Florest.*, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 263-275, mar. 2017

REIS, C. A. F. et al. Caracterização das espécies pertencentes ao gênero *Khaya* de interesse no Brasil. Mogno-africano (*Khaya* spp.): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. Embrapa 2019.

RETSLAFF, F. A. de S.; et al. Curvas de sítio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na região dos campos gerais. *Paraná, Cerne*, Lavras, v. 21, n. 2, p. 219– 225, jan. 2015.

RIBEIRO, A.; et al. Site quality curves for African mahogany plantations in Brazil. *Cerne*, v. 22, n. 4, p. 439-448, 2016.

RIBEIRO, A. ; et al. O Cultivo do Mogno Africano (*Khaya* spp.) e o Crescimento da Atividade no Brasil. *FLORAM*, v. 24, p. 1-11, 2017.

ROMANO, A. W. et al. Geologia e recursos minerais da folha Corinto: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2014.

SANTOS, A.M. et al., .Aspectossilviculturais Aspectos silviculturais para EMBRAPA , 2019.

SCHUCHOVSKI, M. A.; ARCE, J. E.; OLIVEIRA; E. B. Altura dominante e índice de sítio para *Pinus taeda* em dois polos de desenvolvimento florestal no sul do Brasil *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 47, n. 121, p. 92-104, mar. 2019

SELLE, G.L.; PAULESKI,D.T; BRAZ,E. M. Como classificar sítios florestais através da altura dominante do povoamento. Colombo: Embrapa florestal, 2008. 46p (serie documento EMBRAPA).

SHIMAKURA, S. E. Correlação. In CE003 - Estatística II. Paraná: Dep. de Estatística – UFPR: 71-78, 2006.

SILVA, A.,et al.Classificação de sítios em plantio florestal de eucalipto no estado do Amapá. *Revista Arquivos Científicos (IMMES)*, 3(1), 106-110, (2020).

SILVA, G. C. C.; et al. Site index curves in thinned and non-thinned eucalyptus stands. *Forest Ecology and Management*, Volume 408, 15 January 2018, Pages 36-44.

SILVA, I.A.R. Avaliação de regime de manejo para um povoamento de *Khaya* spp. na região central do estado de Minas Gerais. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Florestal). UFMG. 2019.

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

STOLE, L. Simulação e espacialização da fragilidade ambiental em relação às atividades florestais. p. 78. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2008.

VILLANUEVA, J. R.B. et al.; Análisis de la eficiencia del uso de los diámetros dominantes en la construcción de curvas de índice local con cinco métodos analíticos. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*.VL - 2. 2016.

YAHYA A. Z., MAHAT M. N., RASIP A. A. . Growth of plantation grown *Khaya ivorensis* in peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 11 (4): 849-851,1999.