

EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA EM PLANTIOS DE *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett & Golfari

EVOLUTION OF DIAMETRIC DISTRIBUTION IN PLANTATIONS OF *Pinus caribaea* Morelet
var. *caribaea* Barrett & Golfari

Ouorou Ganni Mariel Guera¹, José Antônio Aleixo da Silva², Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira³,
Daniel Álvarez Lazo⁴, Héctor Barrero Medel⁵, Diego Armando Silva da Silva⁶

^{1,2,3,6} Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Departamento de Ciência Florestal,
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil – gueraforest@gmail.com,
jaaleixo@gmail.com, rinaldo.ferreira@ufrpe.br & d-armando-silva@hotmail.com

^{4,5} Departamento Forestal, Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”, Pinar del Río,
Cuba – daniel@upr.edu.cu & hbarrero@upr.edu.cu

RESUMO

O objetivo da presente pesquisa foi estudar a distribuição diamétrica em diferentes classes de idades de plantios de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barr. & Golf. estabelecidos para a produção de madeira para serraria na Empresa Florestal Integral (EFI) Macurije, Pinar del Río, Cuba. Para isso, foram ajustadas dez Funções de Densidade de Probabilidade (FDPs) por classe de idade de cinco anos para a predição de frequências de árvores por classe diamétrica em cada classe de idades. Os parâmetros das FDPs Weibull (3P), Beta, Burr (4P), Gamma 3P, Kumaraswamy, Lognormal 3P, Frechet 3P e Dagum (4P) foram estimados pelo método de estimação de máxima verossimilhança e os das funções S_B de Johnson e Nakagami com o método dos momentos no software EasyFit v.5.6. Para testar o grau de concordância entre cada uma das distribuições e os valores observados de diâmetro, foi utilizado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Os resultados indicaram que a função de Kamaraswamy foi a de maior aderência a base de dados completa sem separação por classes de idade. A função Lognormal 3P foi a de melhor ajuste para as classes de idade 0-5 e 15-20 anos, a de Burr 4P para as classes 10-15, 20-25 e 25-30 anos, a de Gamma 3P para a classe 5-10 anos, a de Dagum 4P para a classe 30-35 e a função Beta para a classe 35-40 anos. Apenas as últimas duas classes etárias apresentaram probabilidades de se obter árvores com Diâmetro a Altura do Peito (DAP) ≥ 20 cm superiores a 0,5.

PALAVRAS-CHAVE: Plantação florestal, Classes de idade, Funções de Densidade de Probabilidade (FDP).

ABSTRACT

The objective of this research was to study the diametric distribution in different age classes of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barr. & Golf. plantations established for lumber production in Macurije Integrated Forest Company (IFC), Pinar del Río, Cuba. For this, ten Probability Density Functions (PDFs) were adjusted per age group of five years for the prediction of tree frequencies per diameter class in each age class. The parameters of the PDFs Weibull (3P), Beta, Burr (4P), Gamma 3P, Kumaraswamy, Lognormal 3P, Frechet 3P and Dagum (4P) were estimated using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method and the Johnson S_B and Nakagami functions with the Method of Moments (MOM) in EasyFit v.5.6 software. To test the degree of agreement between each distribution and the observed diameter values, the Kolmogorov-Smirnov (K-S) adhesion test was used. The results indicated that the Kamaraswamy function was the one with the highest adherence to the complete database without separation by age classes. The Lognormal 3P function was the best fit for the age classes 0-5 and 15-20 years, that of Burr 4P for the classes 10-15, 20-25 and 25-30 years, that of Gamma 3P for the class 5-10 years, Dagum 4P for the class 30-35 and Beta function for the class 35-40 years. Only the last two age classes presented probabilities to have trees with Diameter at Breast Height (DBH) ≥ 20 cm greater than 0.5.

KEYWORDS: Forest plantation, Age Classes, Probability Density Functions (PDFs).

INTRODUÇÃO

Em Cuba, a exploração madeireira que deixou a cobertura florestal em aproximadamente 14% foi caracterizada, unanimemente, pelos pesquisadores e historiadores como o desmatamento mais severo da ilha. As porcentagens de 27,6% em 2010 e 29% em 2013 (ONEI, 2014) são resultados da recuperação gradual que começou em 1959. Entre a ampla gama de espécies utilizadas para esta recuperação, realizada tanto por recuperação de áreas degradadas como pela implantação de plantações, têm-se quatro espécies de *Pinus* da ilha: *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barr. & Golf. e *Pinus tropicalis* Morelet na parte ocidental e *Pinus cubensis* Griseb e *Pinus maestrensis* Bisse na parte oriental (BETANCOURT, 1987).

O *Pinus caribaea* var. *caribaea* ocupa o primeiro lugar nos planos de produção e reflorestamento em Cuba (MINAGRI, 2001; ONEI, 2014) e, como consequência, é a espécie que fornece a maior parte da madeira transformada na maioria das serrarias das 27 Empresas Florestais Integrais (EFIs) da ilha.

A EFI Macurije, maior do país, tem um patrimônio florestal de 98 mil hectares, dos quais a metade é constituída por florestas nativas e plantadas com *Pinus* spp. (DOMÍNGUEZ, 2016). De acordo com Godoy (1999), na serraria *Combate de Tenerias*, a maior da EFI Macurije e uma das maiores do país, 90% da madeira processada provém de plantações de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

O crescimento dessa espécie é mais condicionado pela umidade do solo do que pela fertilidade, podendo tolerar até seis meses de seca, bem como inundações esporádicas (ROJAS & ORTIZ, 1990; NIETO & RODRIGUES, 2002). Esse fator contribuiu para sua expansão e uso em planos de reflorestamento e produção de madeira (WANG et al., 1999, ZHENG & ENNOS, 1999). A sua ocorrência natural em Cuba e o sucesso do estabelecimento em plantações, são atribuídos principalmente às condições edáficas. Geralmente, as plantações estão em solos ácidos, com baixa capacidade de retenção de água, como solos limoníticos e arenosos. O estabelecimento em tais condições desfavoráveis é possível graças à simbiose com fungos sob a forma de micorrizas ectotróficas (GÓMEZ, 1976).

Esta associação simbiótica é uma característica importante do gênero que ocorre naturalmente mesmo em solos de alta fertilidade em que a sua presença aparentemente não é necessária (LEÓN & SUAREZ, 1998). Uma espécie com tão alta plasticidade ecológica e tão importante no processo produtivo florestal, no país em

geral e na província de Pinar del Río em particular, precisa ser amplamente estudada.

Os estudos de crescimento e produção para as variedades *hondurensis* e *bahamensis* são numerosos na literatura florestal, mas não era o caso da variedade *caribaea* até alguns anos atrás. Em Cuba, tais estudos foram restritos à elaboração de tabelas de produção de espécies florestais com maior participação nos planos nacionais de reflorestamento e produção. De acordo com Barrero et al. (2011), a autoria dos primeiros trabalhos de modelagem de crescimento realizados na ilha, embora não sejam oficiais, é atribuída a Löschau (1974) e foram desenvolvidos precisamente em plantações de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

Depois disso, surgiram os primeiros trabalhos oficiais de De Nacimiento et al. (1983) cujos resultados foram as tabelas de produção das espécies para a província de Pinar del Río. Esses trabalhos foram pioneiros de pesquisas importantes em plantações de *Pinus caribaea* var. *caribaea* como os de García (1983), Grá et al. (1990), García et al. (2004 a, b), Barrero (2010), Aldana et al. (2009), Aldana et al. (2011) e Guera (2017).

A maioria desses estudos abordou, principalmente, a construção de tabelas de volume, determinação do índice do sitio, modelos de crescimento e produção, determinação de idades de rotação, entre outros. Conhecer a distribuição diamétrica será muito útil para esta espécie, cujas plantações são estabelecidas para a produção de múltiplos produtos florestais, incluindo a madeira serrada. A madeira destinada às serrarias tem de cumprir requisitos qualitativos e mínimos para utilização e para obtenção de madeira serrada de alta qualidade com altos rendimentos de desdobro.

Os Modelos de Distribuição Diametral (MDDs) estimam o número de árvores por hectare por classe de diâmetro nas idades presentes e futuras (CAMPOS & LEITE, 2017). Sua combinação com equações de volume ou de afilamento permite a projeção da produção por classe de diâmetro. Os MDDs permitem também conhecer o número de árvores com diâmetros superiores ou iguais ao valor mínimo exigido.

A Função de Densidade de Probabilidade de Weibull é a mais utilizada para a modelagem da distribuição diamétrica em florestas, porém, na literatura florestal, existem muitos estudos nos quais a mesma não apresentou boa aderência aos dados. Na literatura existem numerosas funções, com diferentes características, flexibilidade e capacidade de ajuste que podem resultar em maior precisão, dependendo do tipo de floresta e da sua estrutura horizontal (BINOTI et al.,

2012).

A idade é um dos principais fatores que influenciam a forma das curvas de distribuição de frequência e segundo Schneider & Schneider (2008), há modificações na assimetria das mesmas à medida que os povoamentos envelhecem. O estudo da distribuição diamétrica por classes de idade pode facilitar o entendimento da evolução da estrutura dos povoamentos ao longo dos anos.

Com base no exposto, o presente estudo foi realizado com o objetivo de ajustar Modelos de Distribuição Diametral para a predição de densidades de árvores por

classe de diâmetro em diferentes classes de idade, em plantios de *Pinus caribaea* var. *caribaea* pertencentes a Empresa Florestal Integral Macurije, Pinar del Río, Cuba.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em plantios de *P. caribaea* var. *caribaea* pertencente a Empresa Florestal Macurije, localizada entre as coordenadas 22°06' a 22°42' Latitude Norte e 83°48' a 84°23' Longitude Oeste, na região ocidental de Pinar del Río, Cuba (Figura 1).

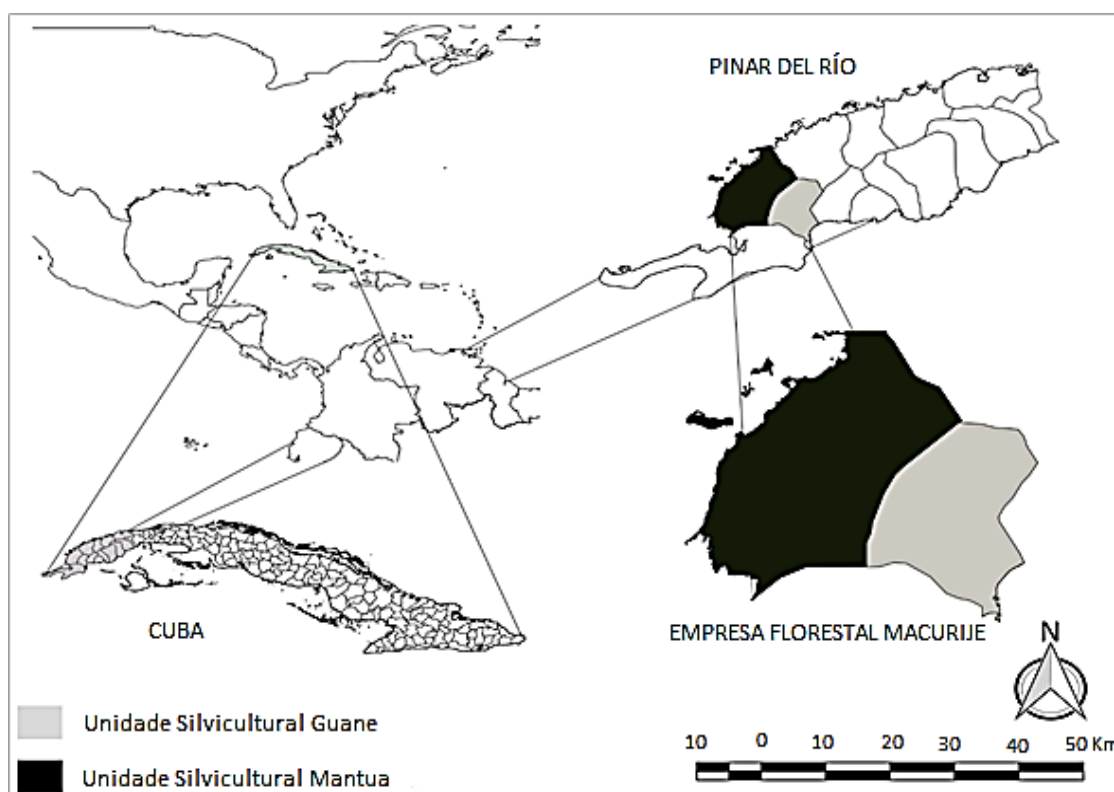


Figura 1. Localização geográfica da Empresa Florestal Integral Macurije, Pinar del Río, Cuba.

Estrutura dos dados utilizados

Os dados utilizados (Tabela 1), são provenientes de 14 parcelas permanentes circulares de 500 m² estabelecidas em plantios de *Pinus caribaea* var. *caribaea* com idades variando entre 04 e 40 anos. Essas parcelas contam com seis medições consecutivas de DAP (cm). Os dados foram organizados por classes etárias com a finalidade de estudar a evolução da distribuição diamétrica ao longo dos anos e determinar as classes de idades com maiores probabilidades de se obter árvores com diâmetros maiores ou iguais a 20 cm (dimensão mínima exigida para a utilização das toras nas serrarias da Empresa Macurije). Uma etapa importante que precede a construção de

Modelos de Distribuição Diamétrica é a determinação do número ótimo de classes e seus intervalos. Para isso, utilizou-se a fórmula de Sturges (Equações 01). As equações 02 e 03 foram utilizadas para determinar a amplitude dos dados e o intervalo das classes, respectivamente.

$$K = 1 + 3,33 \log N \quad (01)$$

$$H = DAP_{max} - DAP_{min} \quad (02)$$

$$IC = K/H \quad (03)$$

Em que: *K* = número de classes; *N* = número total de indivíduos; *H* = amplitude entre o menor e o maior diâmetro; *IC* = intervalo das classes.

Tabela 1. Distribuição dos dados por classes de Idade (anos) e DAP (cm)

Idade (anos)	DAP (cm)								Total Geral
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	
0-4	62	3							65
5-9	1	32	38						71
10-14	34	268	98	1					401
15-19	11	147	202	45	3				408
20-24	2	32	150	162	26	2	2		376
25-29	2	20	55	149	93	17	2		338
30-34		27	58	199	183	51	6		524
35-40		1	2	13	21	15	3	2	57
Total Geral	112	530	603	569	326	85	13	2	2240

Funções de Densidade de Probabilidade ajustadas

De posse de uma amostra aleatória ($X_1, X_2, \dots, X_n$) de uma variável contínua como o DAP, uma função $f(X)$ pode ser considerada como uma Função de Densidade de Probabilidade útil para sua modelagem, se essa função satisfaz estas condições (CAMPOS & LEITE, 2017):

- 1) $f(X) > 0$
- 2) $\int_{-\infty}^{+\infty} f(X)dx = 1$

Considerando as duas condições supracitadas, dez funções de densidade de probabilidade foram ajustadas para a obtenção dos Modelos de Distribuição de Diâmetros (MDDs):

Weibull (3P) (Equação 04)

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left[\frac{X - \alpha}{\beta} \right]^{\gamma-1} e^{-\left[\frac{X - \alpha}{\beta} \right]^\gamma} \quad (04)$$

Em que: α = Parâmetro de locação; β = parâmetro de escala; γ = Parâmetro de forma; e X = centro de classe de diâmetro.

Beta (Equações 05 e 06)

$$f(x) = \left(\frac{1}{B(\gamma_1, \gamma_2)} \right) \left(\frac{(X - a)^{\gamma_1-1} (b - X)^{\gamma_2-1}}{(b - a)^{\gamma_1+\gamma_2-1}} \right) \quad (05)$$

$$B(\gamma_1, \gamma_2) = \int_0^1 t^{\gamma_1-1} (1 - t)^{\gamma_2-1} dt; (\gamma_1, \gamma_2 > 0) \quad (06)$$

Em que: $\gamma_1, \gamma_2 > 0$; a e b são os limites da distribuição ($a < b$).

Gamma 3P (Equações 07 e 08)

$$f(X) = \frac{(X - \alpha)^{\gamma-1}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \exp\left(-\frac{X - \alpha}{\beta}\right) \quad (07)$$

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty t^{\gamma-1} e^{-t} dt \quad (08)$$

Em que: γ é o parâmetro de forma ($\gamma > 0$), β é o parâmetro de escala ($\beta > 0$), α é o parâmetro de locação.

S_B de Johnson (Equação 09)

$$f(X) = \frac{\delta \lambda}{\sqrt{2\pi(X - \varepsilon)(\lambda + \varepsilon - X)}} e^{-\lambda_2 \left[\gamma + \delta \ln \left[\frac{X - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - X} \right] \right]} \quad (09)$$

Em que: $\varepsilon, \lambda, \delta, \gamma$ = Parâmetro de localização, escala, forma e Curtoses.

Lognormal 3P (Equação 10)

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(X - \alpha) - \mu}{\sigma} \right)^2}}{(X - \alpha) \sigma \sqrt{2\pi}} \quad (10)$$

Em que: α = parâmetro de locação; μ = média; σ = desvio-padrão; X = centro de classe de diâmetro.

Burr (4P) (Equação 11)

$$f(X) = \frac{\gamma k \left[\frac{x - \alpha}{\beta} \right]^{\gamma-1}}{\beta \left[1 + \left[\frac{x - \alpha}{\beta} \right]^\gamma \right]^{k+1}} \quad (11)$$

Em que: γ e k são parâmetros de forma ($\gamma > 0$); β é o parâmetro de escala ($\beta > 0$); α é o parâmetro de locação ($\alpha = 0$, para distribuições com dois parâmetros).

Nakagami (Equação 12)

$$f(X) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} x^2\right) \quad (12)$$

Em que: m e Ω são parâmetros ($m \geq 0,5$; $\Omega > 0$).

Dagum (4P) (Equação 13)

$$f(X) = \frac{\gamma k \left[\frac{x - \alpha}{\beta} \right]^{\alpha k-1}}{\beta \left[1 + \left[\frac{x - \alpha}{\beta} \right]^\gamma \right]^{k+1}} \quad (13)$$

Em que: γ e k são parâmetros de forma; β é o parâmetro de escala ($\beta > 0$); α é o parâmetro de locação ($\alpha = 0$, para distribuição com dois parâmetros).

Kumaraswamy (Equação 14)

$$f(X) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 Z^{\alpha_1-1} (1 - Z^{\alpha_1})^{\alpha_2-1}}{(\beta - \alpha)} \quad (14)$$

Em que: α_1 e α_2 são parâmetros de forma; α, β são parâmetros de fronteira.

Frechet 3P (Equação 15)

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left[\frac{\beta}{X - \alpha} \right]^{\gamma+1} e^{-\left[\frac{\beta}{X - \alpha} \right]^\gamma} \quad (15)$$

Em que: α = Parâmetro de localização; β = parâmetro de escala; γ = Parâmetro de forma; e X = centro de classe de diâmetro.

Os parâmetros das FDPs Weibull (3P), Beta, Burr (4P), Gamma 3P, Kumaraswamy, Lognormal 3P, Frechet 3P e Dagum (4P) foram estimados pelo método de estimação de máxima verossimilhança e os das funções S_B de Johnson e Nakagami com o método dos momentos. Todos os ajustes foram realizados com o *software* EasyFit v.5.6.

Método de estimação de máxima verossimilhança

O método de máxima verossimilhança consiste em obter uma função de verossimilhança Λ para uma dada FDP cujos parâmetros se desejam estimar. Trata-se de encontrar as estimativas de parâmetros que maximizem a densidade de probabilidade, no caso de variáveis contínuas, ou a probabilidade, no caso de variáveis discretas, das amostras da população. A função Logaritmo sendo uma função monotônica crescente, os valores dos parâmetros que maximizem Λ também maximizam $\ln \Lambda$, o que explica o uso frequente de $\ln \Lambda$ já que, na prática, a mesma oferece maiores facilidades operacionais. Uma das principais vantagens deste método é que seus estimadores são consistentes, assintoticamente normais e eficientes.

Método dos momentos

O método dos momentos consiste em igualar os momentos amostrais aos momentos teóricos das variáveis aleatórias. O método realiza as estimativas dos parâmetros encontrando expressões para eles e os momentos da amostra são substituídos por essas expressões. Não existe restrição em relação às ordens dos momentos a ser utilizados, porém é recomendado utilizar os de mais baixa ordem possível.

As funções de densidade de probabilidade foram

ajustadas por classe de idades e a partir das funções de melhor ajuste para cada classe etária, as probabilidades de obtenção árvores com DAP maiores ou iguais a 20 cm foram estimadas.

Os últimos estudos desenvolvidos em plantações de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barr. & Golf. da empresa Macurije indicaram idades de rotação entre 30 e 35 anos (BARRERO et al., 2011; GUERA, 2017) diferente da rotação de 21 anos adotada na empresa. De acordo com Barrero et al. (2011), essa idade de rotação de 21 anos não se baseia no comportamento real dos plantios da empresa Macurije e isso tem como consequência, o corte de talhões em pleno crescimento. Os ajustes por classe etária possibilitarão conhecer a estrutura diamétrica por classe de idade e determinar as probabilidades de obtenção de DAP ≥ 20 cm em cada uma dessas classes etárias.

Teste de aderência das distribuições

A verificação da aderência das funções de densidade de probabilidade aos dados de DAP foi realizada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (BINOTI et al., 2014a, b; SANTOS et al., 2015) que compara a frequência estimada acumulada com a frequência observada acumulada (Equações 16 e 17).

$$D = \sup_x |F_{O(x)} - F_{E(x)}| \quad (16)$$

$$D_{cal} = \frac{D}{N} \quad (17)$$

Em que: D = ponto de maior divergência entre as frequências; $F_{O(x)}$ = frequência observada acumulada; $F_{E(x)}$ = frequência estimada acumulada; $\sup_x$ = classe de DAP em que ocorre o mais alto valor da diferença entre $F_{O(x)}$ e $F_{E(x)}$; N = número de observações da amostra.

A hipótese nula (H_0) testada assume que não há diferença significativa entre a distribuição gerada pela função de densidade de probabilidade avaliada e a distribuição observada. Essa hipótese não é rejeitada se D_{cal} for menor que D_{tab} , um valor tabulado determinado ao nível de significância de 1%. Como a estatística deste teste (D) indica a distância entre os dados e as distribuições ajustadas, a distribuição cuja estatística tenha o menor valor é a distribuição de melhor ajuste. Com base nisso, de posse dos resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov, procedeu-se a um ranqueamento, sendo o ranking 1º atribuído à função com o menor D_{cal} , correspondente à função de melhor aderência aos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ajustes das funções de densidades de probabilidades se encontram nas Tabelas 2 e 3 e as curvas das mesmas na Figura 2. Os resultados dos testes de K-S (Tabela 3) indicam que a função de Kumaraswamy foi a de maior aderência a base de dados completa.

A função Lognormal 3P foi a de melhor ajuste para as classes de idade 0-5 e 15-20 anos, isso indica que nestas classes etárias, o log (DAP) segue uma distribuição normal (Vallejos-Barra, 2007). A função de Burr 4P foi a mais indicada para as classes 10-15, 20-25 e 25-30 anos, a de Gamma 3P para a classe 5-10 anos, a de Dagum 4P para a classe 30-35 e a função Beta para a classe 35-40 anos (Tabela 3 e Figura 3). Essa última função, originada de duas funções Gama, é uma das mais flexíveis das funções ajustadas neste trabalho (COUTO, 1980).

A FDP S_B de Johnson foi ajustável apenas para a base completa e a classe etária 0-5 e tampouco foi a mais indicada para as mesmas. Este resultado está em concordância com os de Couto (1980) que não obteve resultados satisfatórios no uso dessa função para a modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus caribaea* var. *caribaea* em diferentes idades.

Aspectos importantes a serem destacados nesses resultados são: a boa aderência de funções como as de Kumaraswamy e Dagum que não são usadas frequentemente em estudos florestais e a não seleção em

nenhuma das classes etárias da função de Weibull 3P, geralmente escolhida na elaboração de Modelos de Distribuição Diamétrica de espécies florestais. Isso é indicativo de que nenhuma função, por mais que seja flexível e tenha ótimos resultados em estudos anteriores, pode ser considerada uma panaceia para estudos posteriores. Conforme Binoti et al. (2012), outras funções podem ser usadas para descrever a estrutura do diâmetro já que as mesmas podem resultar em maior precisão do que a função Weibull comumente utilizada.

Estes resultados não estão em consonância com a maioria das pesquisas de modelagem de distribuição diamétrica como, por exemplo, as de Silva (2012) e Binoti et al. (2014a) cujos resultados encontraram a FDP de Weibull como a mais adequada para a projeção da distribuição diamétrica em plantações florestais de espécies dos Gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. A função de Weibull utilizada e destacada com ênfase na área florestal por Bailey & Dell (1973), se popularizou por sua simplicidade, flexibilidade e a correlação de seus parâmetros com variáveis dendrométricas importantes dos povoamentos (SCHNEIDER & SCHNEIDER, 2008).

Devido a essas vantagens, a maioria das pesquisas florestais se centra na função de Weibull, mas esta não é a única função com essas vantagens e como evidenciam os resultados desta pesquisa, existem numerosas outras FDPs capazes de descrever a distribuição diamétrica de povoamentos florestais.

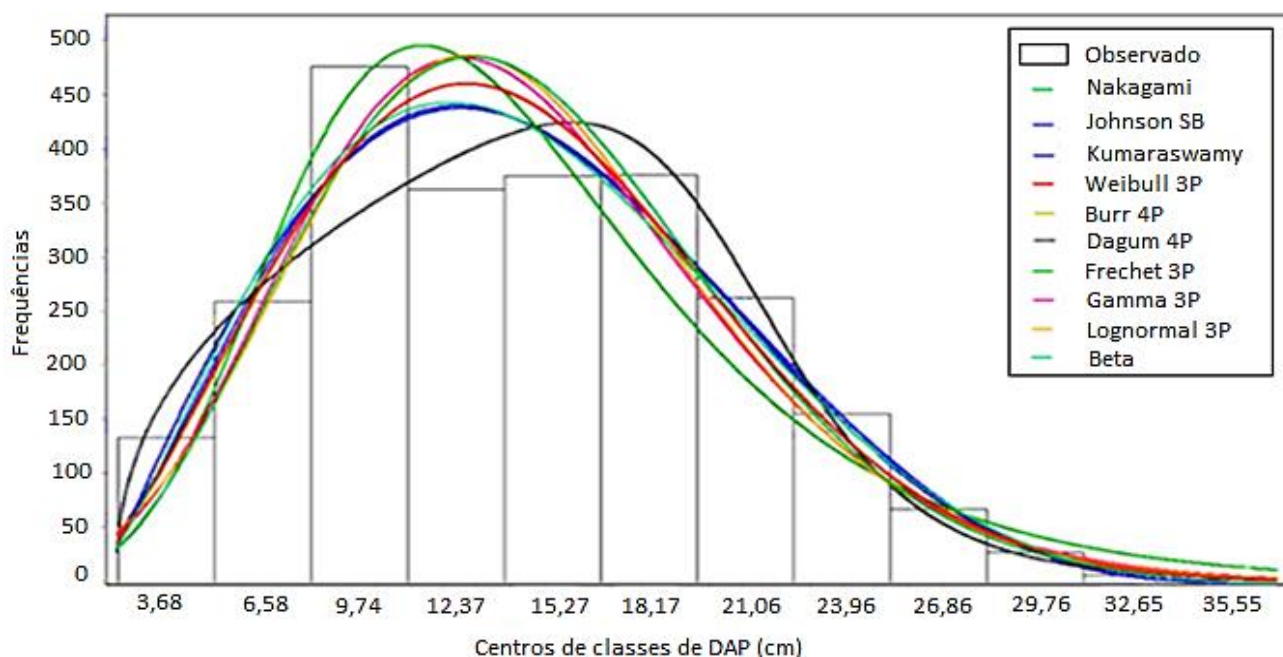


Figura 2. Modelos de Distribuição Diamétrica de plantios de *Pinus caribaea* var. *caribaea* na EFI Macurije, Pinar del Río, Cuba.

Tabela 2. Parâmetros estimados das Funções de Densidade de Probabilidades para diferentes classes etárias em plantios de *Pinus caribaea* var. *caribaea*

Função	Parâmetros	Base Completa	Intervalos etários							
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
Weibull 3P	α	2,230	2,4724	1,968	-0,817	2,0838	2,1004	-0,97336	-1,9403	5,0315
	β	13,870	1,2351	8,039	10,109	10,144	14,413	20,844	23,131	19,82
	γ	1,799	1,5214	3,8234	4,5826	2,9682	3,5001	4,6893	4,863	3,5794
Beta	γ_1	2,088	2,564	1301,7	148,17	25,681	736,14	1661,5	121,58	981,36
	γ_2	3,957	1,656E+6	3052,7	48,62	126,56	1050,4	79,909	34,295	1157,9
	a	2,230	2,384	-80,289	-47,602	-7,0656	-125,92	-855,13	-97,435	-210,74
	b	37,000	7,774E+5	219,23	26,809	100,9	216,37	60,116	52,212	298,59
Gamma 3P	γ	11,474	2,632	145,01	132,56	44,71	127,95	140,29	134,11	120,68
	β	1,831	0,45995	0,17441	0,20204	0,48888	0,35434	0,39816	0,43204	0,50177
	α	-6,694	2,376	-16,05	-18,412	-10,705	-30,239	-37,738	-38,683	-37,577
S _B de Johnson	ϵ	-1,118	2,1453							
	λ	38,99	71,58	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	δ	1,376	1,9637							
	γ	0,650	7,8718							
Lognormal 3P	α	-20,698	1,9213	-44,3	-56,241	-20,656	-74,553	-120,41	-133,09	-110,51
	μ	3,540	0,41851	3,9801	4,1687	3,4545	4,4951	4,9304	5,0265	4,893
	σ	0,175	0,42808	0,03905	0,03549	0,10252	0,04424	0,03352	0,03281	0,04139
Burr 4P	γ	2,310	1,9205	6,295	11,351	4,3075	15,182	16,269	10,037	4,322E+7
	k	49,603	4,2326	3,624	3,2594	3,2229	1,5448	2,2337	3,3634	0,91972
	β	80,313	2,5187	12,817	21,651	14,886	39,554	54,87	42,971	1,2582E+8
	α	1,151	2,4182	-0,729	-10,515	0,31605	-22,967	-33,237	-17,577	-1,2582E+8
Nakagami	m	1,583	4,3254	5,2262	4,0441	2,977	3,7616	4,5177	4,4453	4,6215
	Ω	242,33	13,432	89,937	76,248	135,08	244,42	349,41	396,42	555,0
Dagum 4P	γ	8,298	4,494	10,966	12,345	76,114	134,94	12,998	301,11	24,977
	k	0,172	0,27683	0,28424	0,25694	224,99	220,31	0,36737	0,7177	265,61
	β	19,745	1,6715	8,9516	10,056	196,24	532,13	24,209	733,17	93,44
	α	2,211	2,4886	2,1674	0,47299	-206,7	-545,76	-2,8215	-712,45	-107,74
Kamaraswamy	α_1	1,956	0,89381	3,8126	4,5136	2,9675	3,4862	4,6888	4,8085	3,5461
	α_2	6,779	2,6003	616,27	422,94	304,51	922,77	368,73	257,59	355,65
	a	1,838	2,5	1,9636	-0,71842	2,0702	2,1256	-1,0308	-1,7182	5,1468
	b	41,313	7,0404	45,359	37,543	72,052	104,21	72,724	71,061	108,53
Frechet 3P	γ	2,844E+8	16,987	2,4878	3,7168E+8	1,6105	3,0066E+8	1,4252	2,68E+6	9,2184E+5
	β	1,530E+9	9,1506	4,4422	8,5534E+8	5,94	1,2186E+9	9,9088	1,41E+7	5,0345E+7
	α	-1,530E+9	-5,907	-16,05	-8,5534E+8	2,7226	-1,218E+9	4,3009	-1,41E+7	-5,0345E+8

N/A = não ajustado.

Tabela 3. Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,01$) e rankings para cada uma das funções ajustadas para a base de dados completa e por classe etária

FDP	Estatística	Classes etárias								
		Completa	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
Weibull 3P	Dcal	0,032 ^{ns}	0,095 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,048 ^{ns}	0,059 ^{ns}	0,049 ^{ns}	0,042 ^{ns}	0,065 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	4 °	8 °	5 °	4 °	6 °	7 °	5 °	4 °	3 °
Beta	Dcal	0,027 ^{ns}	0,084 ^{ns}	0,048 ^{ns}	0,036 ^{ns}	0,034 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,059 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	2 °	7 °	6 °	3 °	3 °	2 °	3 °	3 °	1 °
Gamma 3P	Dcal	0,042 ^{**}	0,082 ^{ns}	0,043 ^{ns}	0,066 ^{ns}	0,034 ^{ns}	0,045 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,057 ^{ns}	0,066 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	7 °	6 °	1 °	7 °	2 °	3 °	8 °	8 °	6 °
S _B de Johnson	Dcal	0,028 ^{ns}	0,076 ^{ns}	-	-	-	-	-	-	-
	Dtab (1%)	0,034	0,202	-	-	-	-	-	-	-
	Ranking	3 °	4 °	-	-	-	-	-	-	-
Lognormal 3P	Dcal	0,041 ^{**}	0,068 ^{ns}	0,045 ^{ns}	0,051 ^{ns}	0,033 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,049 ^{ns}	0,045 ^{ns}	0,064 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	6 °	1 °	2 °	6 °	1 °	4 °	6 °	7 °	4 °
Burr 4P	Dcal	0,033 ^{ns}	0,074 ^{ns}	0,058 ^{ns}	0,019 ^{ns}	0,036 ^{ns}	0,025 ^{ns}	0,028 ^{ns}	0,027 ^{ns}	0,065 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	5 °	3 °	7 °	1 °	4 °	1 °	1 °	2 °	5 °
Nakagami	Dcal	0,047 ^{**}	0,116 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,052 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,045 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,042 ^{ns}	0,074 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	9 °	9 °	3 °	8 °	5 °	5 °	4 °	6 °	7 °
Dagum 4P	Dcal	0,047 ^{**}	0,082 ^{ns}	0,073 ^{ns}	0,027 ^{ns}	0,655 ^{**}	0,504 ^{**}	0,032 ^{ns}	0,024 ^{ns}	0,698 ^{**}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	8 °	5 °	8 °	2 °	9 °	9 °	2 °	1 °	9 °
Kamaraswamy	Dcal	0,026 ^{ns}	0,174 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,038 ^{ns}	0,048 ^{ns}	0,059 ^{ns}	0,049 ^{ns}	0,040 ^{ns}	0,065 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	1 °	10 °	4 °	5 °	7 °	6 °	7 °	5 °	2 °
Frechet 3P	Dcal	0,053 ^{**}	0,070 ^{ns}	0,200 ^{**}	0,117 ^{**}	0,176 ^{**}	0,093 ^{**}	0,248 ^{**}	0,111 ^{**}	0,111 ^{ns}
	Dtab (1%)	0,034	0,202	0,141	0,081	0,080	0,084	0,088	0,071	0,216
	Ranking	10 °	2 °	9 °	9 °	8 °	8 °	9 °	9 °	8 °

******Significativo a 99% de Probabilidade; **NS**= Não Significativo a 99% de Probabilidade.

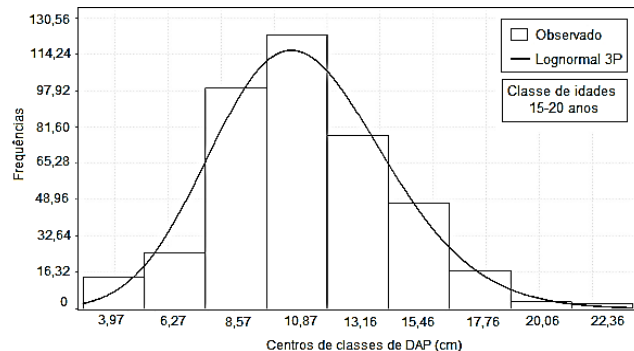
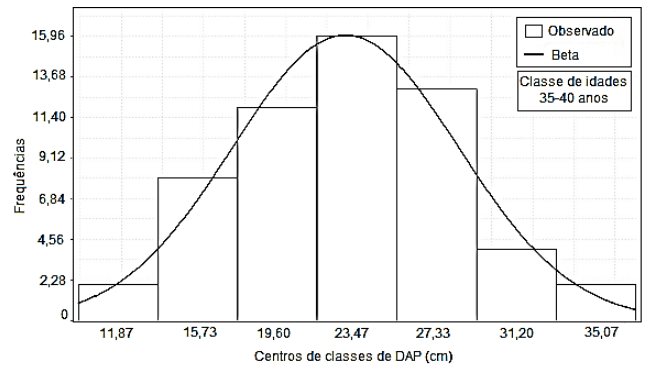
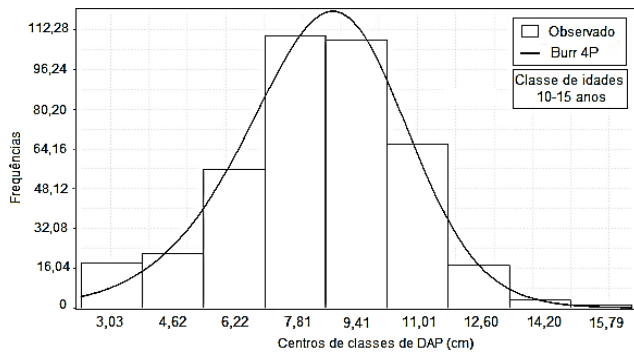
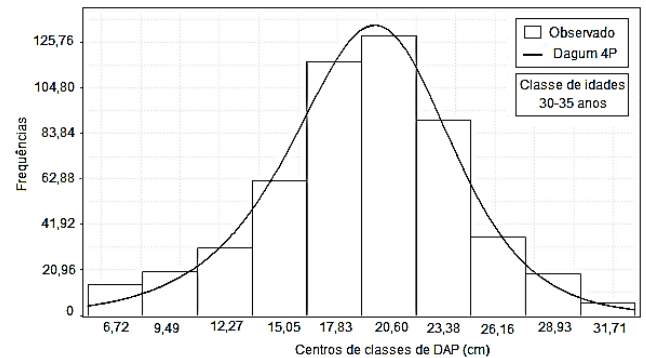
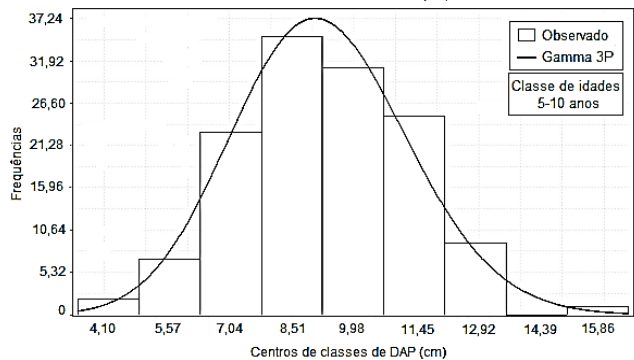
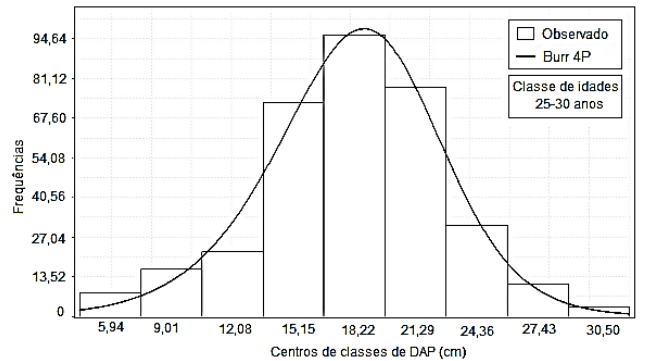
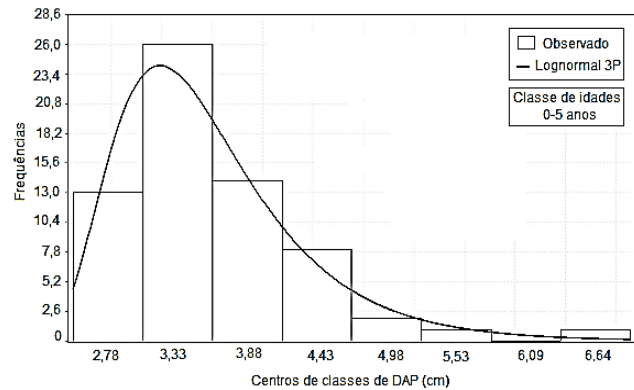
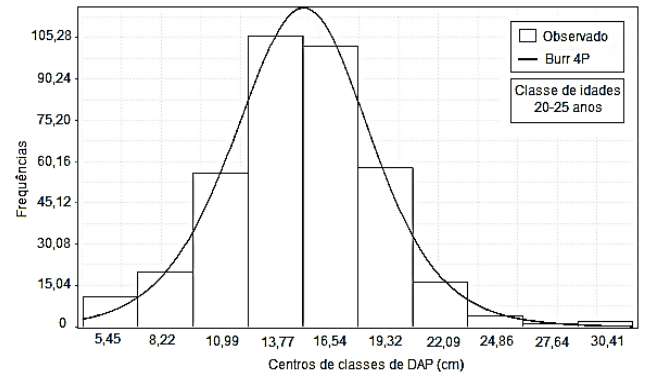
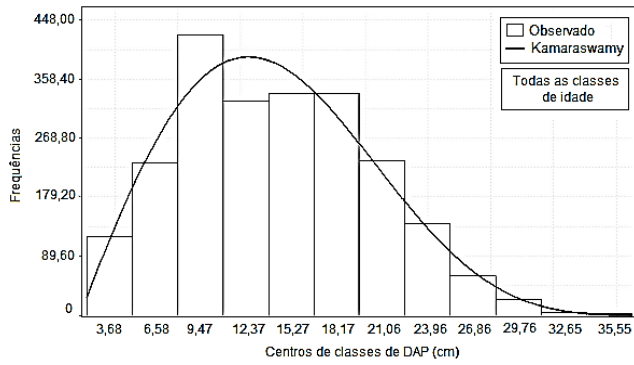


Figura 3. Modelo de Distribuição Diamétrica de melhor ajuste em cada um dos intervalos etários considerados nos plantios de *Pinus caribaea* var. *caribaea* da EFI Macurije.

É notável, na classe 30-35, uma distribuição diamétrica proporcional e mais estruturada. Essa mesma classe de idade (30-35) apresentou uma probabilidade de obter $DAP \geq 20cm$ maior do que aqueles registrados na base

completa (todas as classes) e na classe 20-25 (Figura 4).

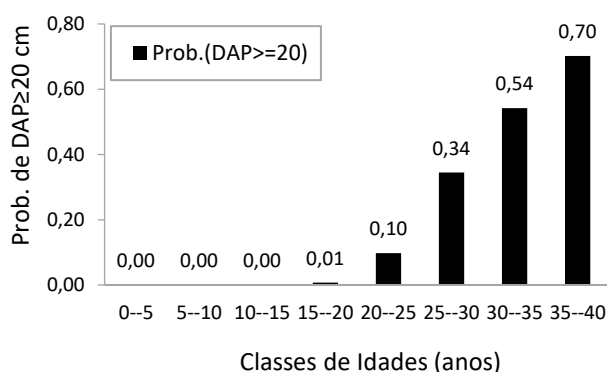


Figura 4. Probabilidades de obtenção de DAP ≥ 20 cm por classe de idades em plantios de *Pinus caribaea* var. *caribaea* da EFI Macurije.

Este resultado indica que é conveniente prolongar a rotação das espécies de 21 anos (como adotada na empresa) para 30-35 anos, conforme indicado nos estudos de Barrero et al. (2011) e Guera (2017).

CONCLUSÕES

A função de densidade de probabilidade de Kamaraswamy é a de maior aderência a base de dados completa sem separação por classes de idade.

Em relação aos ajustes realizados por classe de idade, os resultados indicam que a função Lognormal 3P é a de melhor ajuste para as classes de idade 0-5 e 15-20 anos, a de Burr 4P para as classes 10-15, 20-25 e 25-30 anos, a de Gamma 3P para a classe 5-10 anos, a de Dagum 4P para a classe 30-35 e a de Beta para 35-40 anos.

Apenas as últimas duas classes etárias apresentam probabilidades de obter árvores com DAP maiores ou iguais a 20 cm superiores a 0,5.

A probabilidade de obter árvores com DAP maiores ou iguais a 20 cm foi 82,02% maior na classe de idade 30-35 que na classe 20-25, indicando assim a factibilidade de prolongar a rotação de 21 anos adotada na empresa Macurije a 30-35 anos para obter árvores com diâmetros exigidos pelas serrarias (DAP ≥ 20 cm).

REFERÊNCIAS

ALDANA E.P. et al. **Análisis de diferentes edades para establecer el turno de tala en plantaciones de *Pinus caribaea* en la EFI Viñales.** In: CD Memorias del IV Taller internacional de Desarrollo Forestal Sostenible; La Habana; Cuba; 2009.

ALDANA, E.P. et al. Turno de corta eficiente para la obtención de mayores productos maderables en plantaciones de *Pinus*

caribaea de la Empresa Forestal Integral Viñales. **Revista Forestal Baracoa**, v.30, n.1, p.29-35, 2011.

BAILEY, R.L.; DELL, T.R. Quantifying diameter distribution with the Weibull-function. **Forest Science**, v.19, n.2, p.97-104, 1973.

BARRERO, H. **Modelo integral de crecimiento, perfil de fuste, grosor de corteza y densidad de la madera de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari: Estudio de caso EFI Macurije.** 2010. 101p. (Tese de doutorado)

BARRERO, M.H. et al. Determinación del Turno de Corta para *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la Empresa Forestal Integral "Macurije". **Floresta e Ambiente**, v.18, n.1, p.109-116, 2011.

BETANCOURT, A. **Silvicultura especial de árboles maderables tropicales.** La Habana: Editorial Científico Técnica, 1987.

BINOTI, D.H.B. et al. Probability density function for description of diameter distribution in thinned stands of *Tectona grandis*. **Cerne**, v.18, n.2, p.185-196, 2012.

BINOTI, D.H.B. et al. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos utilizando a função Nakagami e Weibull. **Ciência da Madeira**, v.5, n.2, p.103-110, 2014a.

BINOTI, M.L.M.S. et al. Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. **Revista Árvore**, v.38, n.4, p.747-754, 2014b.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.

COUTO, H.T.Z. **Distribuições de diâmetros em plantações de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*.** 1980. 83p. (Tese de Livre Docência)

DE NACIMIENTO, J. et al. Tabla preliminar de rendimiento para *Pinus caribaea*. Pinar del Río, **Revista Forestal Baracoa**, v.13, p.57-103, 1983.

DOMÍNGUEZ, G.A. **Sector forestal cubano se inclina a la energía renovable (Opiniones recogidas por IPS-Cuba).** 2016. Disponível em: <http://www.ipscuba.net/economia/sector-forestal-cubano-se-inclina-a-la-energia-renovable/>

GARCÍA, C.I. **Investigaciones para la elaboración de una tabla de rendimiento preliminar para el *P. caribaea* var. *caribaea*.** In: Memorias del II Foro Multisectorial de la ACC. 1983. CD.

GARCÍA, C.I. et al. **Tabla de producción para las plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* de la Empresa Forestal Integral Macurije.** 2004b. Disponível em: <http://www.buscagro.com/biblioteca/PinardelRio/TabladeProduccion.pdf>.

GARCÍA, C.I. et al. Tablas de rendimiento y crecimiento para la EFI Macurije. **III Simpósio sobre Manejo Sostenible de los Recursos Forestales - SIMFOR**; 2004a.

GODOY, E.A. Aprovechamiento del aserrín mediante su transformación hidrolítica y como fuente de biomasa Cuba. **Revista forestal centroamericana**, n.39-40, p.67-69. 1999.

GÓMEZ, J. **Aspectos Geográficos y de las Formaciones**

Forestales de Cuba. INDAF, La Habana, 1976.

GRÁ, A. et al. **Tablas de volumen y surtido y densidad del *Pinus caribaea* en plantaciones puras para Cuba.** Informe etapa 509-09. 1990.

GUERA, O.G.M. **Modelos matemáticos para auxílio à tomada de decisão no processo produtivo de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barr. & Golf. na empresa florestal integral Macurije, Pinar Del Río, Cuba.** 2017. (Tese de doutorado).

LEÓN, S.T.; SUÁREZ, A. **Efecto de las plantaciones forestales sobre el suelo y agua.** CONIF, Santa Fe de Bogotá, 1998.

MINAGRI: **Dinámica forestal. subdelegación forestal.** Ministerio de la Agricultura. Pinar del Río. 2001.

NIETO, V.M.; RODRIGUES, J. *Pinus caribaea* Morelet. **Tropical tree seed manual.** 1ed. Washington DC: USDA Forest Service, Agriculture Handbook 721, 2002.

ONEI - Oficina Nacional de Estadística e Información. **Anuario estadístico de cuba 2014.** República de Cuba: Ed. Medio ambiente, 2014.

ROJAS, F.; ORTIZ, E. **Pino caribe (*Pinus caribaea*), especie de árbol de uso múltiple en América Central.** CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico, n.175, 1990.

SANTOS, R.O. et al. Modelagem da distribuição em altura de *Eschweilera coriacea* (DC.) S.A. Mori em uma floresta ombrófila densa, Amapá, Brasil. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia- CONTECC**, p.4. 2015.

SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.S.P. **Introdução ao manejo florestal.** 2. ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008.

SILVA, F. Modelagem pré-colheita da estrutura diamétrica de plantios de *Pinus* spp. por meio de distribuições probabilísticas. **Floresta**, v.42, n.2, p.381-390, 2012.

VALLEJOS-BARRA, O.S. Ajuste óptimo de la distribución lognormal de tres parámetros en híbridos de *Populus*. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v.13, n.1, p.29-32, 2007.

WANG, H. et al. *Pinus caribaea* in China: introduction, genetic resources and future prospects. **Forest Ecology and Management**, v.117, n. 1/3, p.1-15, 1999.

ZHENG, Y.Q.; ENNOS, R.A. Genetic variability and structure of natural and domesticated populations of Caribbean pine (*Pinus caribaea* Morelet). **Theoretical and Applied Genetics**, n.98, p.765-771, 1999.