# MODELAGEM PROBABILÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DE CARBONO NO SOLO NO ESTADO DO AMAZONAS

**Jacqueline Alves da Silva[1], Everton Fernando Espitalher de Souza[1], Gabriel Alves Nascimento[1], Dayane Santos Veloso[2], Caroline Junqueira Sartori[1], Bruno Oliveira Lafetá[1]**

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais / Departamento de Engenharia Florestal, Avenida Primeiro de Junho, 1043, Centro - 39705-000 - São João Evangelista-MG, Brasil, alves.jacquelinee@gmail.com, fernando.espitalher@gmail.com, gabrielgab0506@gmail.com, caroline.junqueira@ifmg.edu.br, bruno.lafeta@ifmg.edu.br
[2]Faculdades Santo Agostinho, Avenida Osmane Barbosa, 937, JK - 39404-007 - Montes Claros-MG, Brasil, dayanevelloso@hotmail.com

**Resumo**
O carbono orgânico do solo desempenha papel fundamental no funcionamento dos ecossistemas florestais e na dinâmica do ciclo global do carbono. Este estudo teve como objetivo modelar a distribuição dos teores de carbono em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, comparando diferentes funções de densidade probabilística. Foram analisados 108 conglomerados provenientes do Inventário Florestal Nacional, com teores de carbono determinados na camada de 0–20 cm do solo. Foram avaliadas as distribuições Weibull 2P, Logística 2P e Cauchy. Os teores de carbono variaram de 2,60 a 69,80 g $kg^{-1}$, com média de 20,68 g $kg^{-1}$ e coeficiente de variação de 54,11%, apresentando distribuição assimétrica e rejeição da normalidade. A Weibull 2P apresentou o melhor desempenho geral, com menores valores dos critérios de informação e medidas de erro, demonstrando maior capacidade de representar a distribuição dos teores de carbono. Conclui-se que a Weibull 2P é adequada para a caracterização probabilística dos teores de carbono nos remanescentes florestais avaliados.
**Palavras-chave**: Floresta natural. Frequência de ocorrência. Inventário florestal nacional. Weibull.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Agronômica, Engenharia Florestal.

## Introdução

A caracterização das condições do solo é fundamental para subsidiar ações de monitoramento, avaliação de impactos e gestão dos recursos naturais. O carbono orgânico do solo por sua vez, constitui um importante componente do ciclo global do carbono e desempenha funções relacionadas à regulação climática, ciclagem de nutrientes, retenção de água e manutenção da qualidade do solo (JACKSON et al., 2017; SCHMIDT et al., 2011). Em ecossistemas florestais, sua dinâmica resulta da interação entre a entrada e decomposição de resíduos vegetais, atividade microbiana e mecanismos de estabilização da matéria orgânica. Dessa forma, a caracterização da quantidade e da variabilidade do carbono no solo contribui para compreender processos ecológicos e para subsidiar avaliações sobre o funcionamento dos ecossistemas e sua resposta às alterações ambientais.

A variabilidade dos teores de carbono no solo pode apresentar diferentes padrões de distribuição, decorrentes da heterogeneidade das condições ambientais, da vegetação e das características edáficas. A identificação desses padrões é relevante não apenas para determinar valores médios ou medidas de dispersão, mas também para compreender como as observações se distribuem ao longo da amplitude dos dados. Apesar desse conhecimento, ainda são limitados os estudos que descrevem probabilisticamente a distribuição dos teores de carbono em remanescentes de floresta natural utilizando funções de densidade probabilística, o que restringe a compreensão da estrutura distributiva desse atributo em escala regional.

A utilização de funções de densidade probabilística permite representar a frequência de ocorrência dos valores observados por meio de modelos matemáticos, facilitando a descrição da forma, dispersão e assimetria das distribuições. Entre essas funções, a Weibull apresenta diferentes possibilidades de configuração de forma e tem ampla utilização na modelagem de distribuições em estudos florestais (BAILEY; DELL, 1973). A avaliação de diferentes funções de densidade possibilita comparar seus

desempenhos e identificar o modelo que melhor representa o comportamento probabilístico dos teores de carbono observados. Essa abordagem pode ampliar a descrição da variabilidade do carbono no solo, especialmente em áreas de floresta natural caracterizadas por elevada heterogeneidade ambiental.

Mediante exposto, este estudo teve como objetivo modelar a distribuição dos teores de carbono em remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, comparando diferentes funções de densidade probabilística.

**Metodologia**

Os dados empregados neste estudo foram provenientes do Inventário Florestal Nacional (IFN), coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro. Foram selecionados exclusivamente conglomerados localizados em remanescentes de florestas naturais do bioma Amazônia no estado do Amazonas, sendo excluídas áreas de florestas plantadas.

A base de dados compreendeu 108 conglomerados amostrais distribuídos em malha sistemática de 20 × 20 km. Cada conglomerado foi constituído por quatro subparcelas retangulares de área fixa (20 × 100 m; 0,2 ha), dispostas em configuração denominada “cruz de Malta” e posicionadas a 50 m do ponto central, orientadas segundo os pontos cardeais.

As informações referentes ao teor de carbono do solo foram obtidas conforme os protocolos de amostragem e análises laboratoriais adotados pelo IFN. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0–20 cm de profundidade, em um raio de até 2 m do ponto central de cada conglomerado, utilizando trado holandês ou cavadeira. O teor de carbono total foi determinado por combustão seca automatizada em analisador elementar Perkin-Elmer 2400 Series II (CHN Mode), sendo expresso em g $kg^{-1}$.

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo determinados os valores mínimo, máximo, média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação e quartis. A assimetria e a curtose foram calculadas para caracterizar a forma da distribuição dos dados. A normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Para representar a distribuição dos teores de carbono, foram ajustadas três funções de densidade probabilística: Weibull de dois parâmetros (Weibull 2P), Logística de dois parâmetros (Logística 2P) e Cauchy. As funções foram ajustadas pelo método da máxima verossimilhança, e suas respectivas expressões matemáticas e parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Funções de densidade probabilística testadas para ajuste da distribuição de carbono em remanescentes de floresta natural do estado do Amazonas.

| Nome | Função de densidade probabilística |
|---|---|
| Weibull 2P | $f(x)=\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}}$ |
| Função Logística 2P | $f(x)=\frac{e^{\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}}{\beta\left[1+e^{\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}\right]^2}$ |
| Cauchy | $f(x)=\frac{1}{\pi\beta\left[1+\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2\right]}$ |

$x$ = centro de classe biométrica, $x \geq 0$; $\alpha$ = parâmetro de locação, $\alpha > 0$; $\beta$ = parâmetro de escala, $\beta > 0$; $\gamma$ = parâmetro de forma, $\gamma > 0$; $e$ = constante neperiana; e $\pi$ = 3,14159265359...
Fonte: os autores.

A aderência das funções aos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (GIBBONS e SUBHABRATA, 1992). Trata-se de um teste que compara a frequência acumulativa estimada com a frequência observada. O ponto de maior divergência entre as distribuições é o valor da estatística de teste (dn). Calcularam-se os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), além das

medidas de erro entre as frequências observadas e estimadas: raiz quadrada do erro médio (RQEM), média de desvio absoluto (MDA) e viés médio (Bias). Menores valores de AIC, BIC, RQEM e MAE, bem como valores de Bias mais próximos de zero, indicaram melhor desempenho. Complementarmente, foi realizada análise gráfica da frequência observada e das frequências estimadas pelas distribuições probabilísticas nas classes de teor de carbono.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foi adotado o nível de significância de 1,0% em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.6.0 (R CORE TEAM, 2026).

**Resultados**

Foram analisadas 108 observações de teor de carbono nos remanescentes de floresta natural do estado do Amazonas. Os valores variaram de 2,60 a 69,80 g $kg^{-1}$, com média de 20,68 g $kg^{-1}$, mediana de 19,30 g $kg^{-1}$ e desvio-padrão de 11,19 g $kg^{-1}$. O coeficiente de variação foi de 54,11%, indicando elevada variabilidade dos teores de carbono. Os quartis inferior, mediano e superior foram de 12,78, 19,30 e 26,10 g $kg^{-1}$, respectivamente. A distribuição apresentou assimetria positiva (1,7591) e curtose de 5,3054, indicando concentração das observações em valores mais baixos de carbono e ocorrência de valores elevados. O teste de Shapiro-Wilk rejeitou a hipótese de normalidade dos dados ($W = 0,8676$; $p < 0,001$).

As três distribuições probabilísticas avaliadas apresentaram aderência aos dados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, considerando o nível de 1% de probabilidade ($p > 0,01$). A distribuição Logística apresentou a menor estatística de Kolmogorov-Smirnov ($dn = 0,0530$; $p = 0,7252$), seguida pelas distribuições Weibull 2P ($dn = 0,0907$; $p = 0,3366$) e Cauchy ($dn = 0,1075$; $p = 0,1053$). Portanto, nenhuma das distribuições testadas apresentou evidências estatísticas para rejeição da hipótese de aderência aos dados.

Considerando conjuntamente os critérios de informação e as métricas de erro, a distribuição Weibull 2P apresentou o melhor desempenho geral (Tabela 2). Essa distribuição apresentou os menores valores de AIC (808,66), BIC (814,02), RQEM (2,2821) e MDA (1,7709), além do menor viés absoluto (−0,0014).

Tabela 2 - Coeficientes e qualidade de ajuste das distribuições probabilísticas testadas para representar a frequência dos teores de carbono em remanescentes de floresta natural do estado do Amazonas.

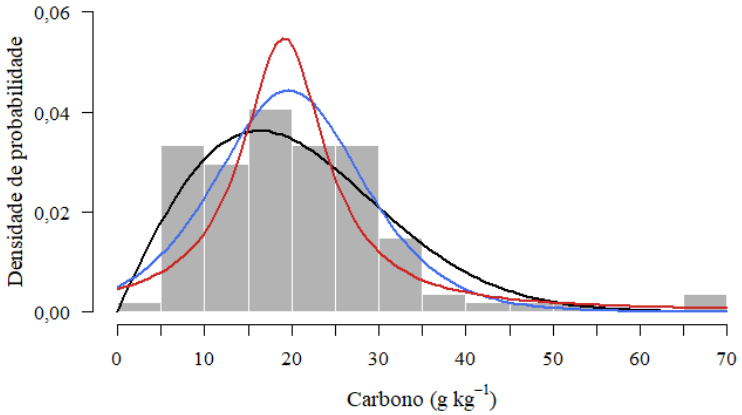
| Função | Coeficientes | | RQEM | MAE | Bias | AIC | BIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Weibull 2P | $\beta$ = 1,9681 | $\gamma$ = 23,3991 | 2,2821 | 1,7709 | −0,0014 | 808,66 | 814,02 |
| Logística 2P | $\alpha$ = 19,6601 | $\beta$ = 5,6412 | 2,4899 | 1,8095 | −0,2304 | 813,43 | 818,79 |
| Cauchy | $\alpha$ = 19,0817 | $\beta$ = 5,8015 | 4,0736 | 2,9363 | −1,0033 | 836,92 | 842,28 |

$\alpha$ = parâmetro de locação; $\beta$ = parâmetro de escala; $\gamma$ = parâmetro de forma; RQEM = raiz quadrada do erro médio; MDA = Média de desvio absoluto; Bias = viés médio; AIC = critério de informação de Akaike; BIC = critério de informação bayesiano
Fonte: os autores.

A distribuição dos teores de carbono apresentou maior concentração de observações entre 5 e 30 g $kg^{-1}$, faixa que reuniu 92 observações, correspondentes a 85,19% do conjunto amostral. A classe de 15–20 g $kg^{-1}$ apresentou a maior frequência observada, com 22 observações (20,37%), seguida pelas classes de 10–15 e 20–25 g $kg^{-1}$, com 19 (17,59%) e 18 observações (16,67%), respectivamente. Em conjunto, os valores inferiores a 35 g $kg^{-1}$ corresponderam a 101 das 108 observações (93,52%), enquanto sete observações apresentaram valores iguais ou superiores a 35 g $kg^{-1}$.

A distribuição Weibull 2P reproduziu adequadamente a frequência observada ao longo das classes de carbono, especialmente na região de maior concentração dos dados. Entretanto, verificou-se tendência de superestimação nas classes de menor frequência e nas extremidades superiores da distribuição. De modo geral, os menores valores de erro e de critérios de informação obtidos pela Weibull 2P evidenciam sua maior capacidade de representar a distribuição dos teores de carbono no conjunto analisado (Figura 1).

Figura 1 – Distribuição de frequência observada e estimada dos teores de carbono em remanescentes de floresta natural do estado do Amazonas.




Weibull = preto, Logística = azul e Cauchy = vermelho.
Fonte: os autores.

**Discussão**

A variabilidade dos teores de carbono observada neste estudo evidencia a heterogeneidade das condições edáficas dos remanescentes de floresta natural avaliados. O coeficiente de variação de 54,11%, associado à assimetria positiva (1,7591) e à curtose elevada (5,3054), indica concentração das observações em menores teores e ocorrência de uma cauda à direita formada por valores mais elevados. Essa configuração pode estar relacionada à diversidade de condições edáficas e ambientais presentes na Amazônia, uma vez que diferenças na textura, fertilidade, relevo, drenagem e condições de uso e cobertura da terra influenciam a distribuição do carbono no solo (CEDDIA et al., 2015; TIRUNEH et al., 2026).

A rejeição da normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk reforça a necessidade de utilizar funções de densidade capazes de representar adequadamente a assimetria observada. As três distribuições avaliadas apresentaram aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, resultado semelhante ao observado por Barreto et al. (2017), que verificaram bom ajuste de diferentes funções probabilísticas para representar os teores de carbono orgânico do solo sob Floresta Ombrófila Mista. Entretanto, a distribuição Logística apresentou a menor estatística de Kolmogorov-Smirnov, enquanto a Weibull 2P apresentou o melhor desempenho quando considerados conjuntamente AIC, BIC, RQEM, MDA e Bias (Tabela 2). Esse comportamento evidencia que a escolha de uma função probabilística não deve ser fundamentada exclusivamente em uma única estatística de aderência, sendo mais adequada a avaliação conjunta de indicadores que considerem tanto a qualidade do ajuste quanto a magnitude dos erros.

A superioridade da Weibull 2P pode estar relacionada à sua capacidade de representar diferentes padrões de assimetria e forma da distribuição, característica que favorece sua utilização na descrição de conjuntos de dados não simétricos (BAILEY; DELL, 1973). Essa propriedade permitiu reproduzir satisfatoriamente a distribuição dos teores de carbono, particularmente nas classes entre 5 e 30 g kg$^{-1}$, que concentraram a maior parte das observações, ao mesmo tempo em que apresentou as menores discrepâncias globais entre as frequências observadas e estimadas. A predominância de valores inferiores a 35 g kg$^{-1}$, correspondentes a 93,52% das observações, associada à ocorrência de poucos valores elevados, caracteriza uma distribuição com cauda à direita e contribui para explicar o desempenho da função. Embora tenha sido observada alguma superestimação nas classes de menor frequência e na extremidade superior, o desempenho global permaneceu superior ao das demais distribuições avaliadas.

A análise gráfica (Figura 1) corroborou os resultados estatísticos, demonstrando a capacidade da Weibull 2P de acompanhar a frequência observada ao longo das classes de carbono. As maiores diferenças nas classes de menor frequência e na extremidade superior são compatíveis com o reduzido número de observações nessas regiões, condição que dificulta a reprodução precisa da cauda da

distribuição. Dessa forma, a avaliação conjunta dos indicadores estatísticos e do comportamento gráfico sustenta a utilização da Weibull 2P para representar a distribuição dos teores de carbono nos remanescentes estudados.

A caracterização probabilística dos teores de carbono pode contribuir como referência para o monitoramento das condições do solo e para a avaliação de alterações ambientais, fornecendo subsídios à gestão dos recursos naturais em remanescentes florestais. Essas informações também podem apoiar a elaboração e o aprimoramento de políticas ambientais, bem como fornecer referências técnicas para processos de licenciamento e acompanhamento de intervenções que possam alterar as condições do solo e da cobertura florestal. Ressalta-se, contudo, que os resultados se referem ao teor de carbono na camada de 0–20 cm e, portanto, não devem ser interpretados diretamente como estimativas de estoque de carbono, que requerem informações adicionais, especialmente densidade do solo e espessura da camada.

## Conclusão

Os teores de carbono do solo nos remanescentes de floresta natural do estado do Amazonas apresentam elevada variabilidade e distribuição assimétrica, com predominância de valores entre 5 e 30 g $kg^{-1}$ e rejeição da normalidade.

A função Weibull 2P constitui a função mais adequada para representar a distribuição dos teores de carbono do solo no conjunto amostrado, contribuindo para sua caracterização probabilística em remanescentes de floresta natural do Amazonas.

## Referências

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

BARRETO, T. G.; HENTZ, A. M. K.; PÉLLICO NETTO, S.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Modelagem da distribuição de frequência de teores carbono orgânico do solo sob Floresta Ombrófila Mista no Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 89, p. 29-37, 2017.

CEDDIA, M. B.; VILLELA, A. L. O.; PINHEIRO, É. F. M.; WENDROTH, O. Spatial variability of soil carbon stock in the Urucu river basin, Central Amazon-Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 526, p. 58-69, 2015.

JACKSON, R. B.; LAJTHA, K.; CROW, S. E.; HUGELIUS, G.; KRAMER, M. G.; PIÑEIRO, G. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 48, p. 419-445, 2017.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2026.

SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, p. 49-56, 2011.

TIRUNEH, G. A.; RIGHI, C. A.; POLIZEL, J. L.; GONÇALVES, V.; PEREIRA, C. R. Land-use controls on soil organic carbon dynamics across Amazonian ecosystems, Brazil. **Scientific Reports**, v. 16, art. 13693, 2026.

## Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) e ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB), pelo fornecimento de informações e recursos que contribuíram para a realização deste trabalho.