Forests, Conservation and Society

Revista internacional revisada por pares · Fundación Flora Amazónica (FORAMA)

Volume 1, Número 1, 2026, 0002 | https://ojs.forama.org/index.php/fcs

ARTIGO ORIGINAL

Carbono estimado na biomassa do fuste em fragmento florestal urbano da Amazônia Central: variação espacial e comparação de procedimentos

Ana Karoline da Silva Jeronimo[a,b], Flora Magdaline Benitez Romero[a,b]*, Rosana Barbosa de Castro Lopes[a], Songila Maria da Silva Rocha Doi[c], Philip Martin Fearnside[a]

[a] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Amazonas, Brasil; ana.jeronimo@ufam.edu.br; philip.fearnside@inpa.gov.br
[b] Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, Amazonas, Brasil: magdaline.romero@inpa.gov.br; rbarbosa@ufam.edu.br
[c] Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Parana, Brasil: SONGILA35@gmail.com
* Autor de correspondência: ana.jeronimo@ufam.edu.br

Resumo: A quantificação do carbono em fragmentos florestais urbanos depende de inventários com área amostral conhecida e da distinção entre compartimentos de biomassa. Este estudo estimou o carbono associado ao volume do fuste de árvores inventariadas em quatro parcelas permanentes no campus da Universidade Federal do Amazonas, em Manaus, e comparou numericamente os resultados com estimativas da equação pantropical de Chave et al. (2014). Foram analisadas 190 árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 10 cm em 0,48 ha. O procedimento volume–densidade resultou em 20,307 Mg C na área amostrada (42,307 Mg C ha^{-1}), enquanto a equação alométrica produziu 19,897 Mg C (41,452 Mg C ha^{-1}), diferença de −2,02%. O coeficiente de variação entre parcelas foi de 29,9%. Apenas 11 árvores com DAP ≥ 30 cm concentraram 44,6% do carbono estimado pelo primeiro procedimento, e duas árvores com DAP ≥ 60 cm responderam por 25,2%. Os resultados evidenciam a concentração do carbono em árvores de maior diâmetro e a variação entre parcelas. A proximidade numérica entre procedimentos não indica equivalência, pois o método volumétrico estima biomassa do fuste e o modelo alométrico estima biomassa aérea total.
Palavras-chave: carbono do fuste; inventário florestal; distribuição diamétrica; fragmentos urbanos; Amazônia Central.

Abstract: Carbon estimation in urban forest fragments requires inventories with known sampling area and clear separation of biomass compartments. We estimated carbon derived from stem volume for trees surveyed in four permanent plots on the Federal University of Amazonas campus, Manaus, Brazil, and numerically contrasted these estimates with a pantropical allometric model (Chave et al., 2014). The analysis included 190 trees with diameter at breast height (DBH) ≥ 10 cm across 0.48 ha. The volume–density approach yielded 20.307 Mg C within the surveyed area (42.307 Mg C ha^{-1}), whereas the allometric equation yielded 19.897 Mg C (41.452 Mg C ha^{-1}), a difference of −2.02%. The coefficient of variation across plots was 29.9%. Eleven trees with DBH ≥ 30 cm accounted for 44.6% of the stem-derived carbon estimate, while two trees with DBH ≥ 60 cm contributed 25.2%. These results reveal marked concentration of estimated carbon in larger trees and variation among plots. Numerical proximity between approaches does not establish equivalence because stem-derived biomass and total aboveground biomass represent different compartments.
Keywords: stem carbon; forest inventory; diameter distribution; urban fragments; Central Amazon.

1. Introdução

A Amazônia representa um dos maiores reservatórios de carbono terrestre e exerce papel central na regulação climática global. Uma parcela expressiva desse carbono está armazenada na biomassa lenhosa viva, compartimento cuja magnitude responde à estrutura da floresta, à composição de espécies, à mortalidade e às mudanças de uso da terra (Phillips et al., 1998; Houghton, 2005; Malhi et al., 2006; Pan et al., 2011). Na Amazônia brasileira, a perda e a degradação florestal alteram esse balanço ao transferirem carbono da vegetação para a atmosfera e para compartimentos de decomposição, razão pela qual inventários locais continuam essenciais para reduzir incertezas e apoiar estratégias de mitigação (Fearnside, 1997, 2000; Fearnside & Laurance, 2004; Araujo et al., 2023).

A conversão de floresta contínua em mosaicos de fragmentos introduz efeitos de borda que modificam a estrutura, a mortalidade e a composição florística. Estudos de longa duração na Amazônia Central documentam perda desproporcional de árvores grandes e alterações persistentes do dossel após o isolamento, com consequências diretas para a biomassa acima do solo (Laurance et al., 1997, 2011; Almeida et al., 2019). Os efeitos da fragmentação não se restringem à vegetação: estoques de carbono do solo também podem responder à proximidade das bordas, à história de perturbação e ao regime de fogo, reforçando a necessidade de interpretar o carbono florestal como um conjunto de compartimentos interdependentes (Barros & Fearnside, 2016; Silva et al., 2023).

Fragmentos florestais inseridos em matrizes urbanas ocupam uma posição particular nesse gradiente de perturbação. Embora sejam menores e mais isolados do que a floresta contínua, podem conservar árvores remanescentes, biodiversidade e estoques de carbono relevantes, além de prestar serviços associados à regulação microclimática e ao planejamento de infraestrutura verde (Clerici et al., 2016; Huera-Lucero et al., 2020; Pertille et al., 2025; Nandi & Jashimuddin, 2026). Estudos recentes em florestas urbanas também mostram que a intensidade de perturbação humana e a estrutura dos povoamentos condicionam fortemente a capacidade de armazenamento de carbono (Solomon et al., 2025). Ainda assim, a literatura sobre biomassa e carbono na Amazônia permanece concentrada em florestas contínuas, áreas protegidas ou frentes de desmatamento, com menor representação de remanescentes urbanos universitários (Araujo et al., 2023; Dionizio et al., 2025).

O campus da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em Manaus, preserva um fragmento de floresta ombrófila densa de terra firme inserido na malha urbana e utilizado como espaço de ensino, pesquisa e conservação. Apesar dessa relevância, não foi identificada, na documentação que fundamenta este estudo, uma estimativa publicada específica para o estoque de carbono das parcelas permanentes aqui avaliadas. Essa lacuna limita comparações com outras formações amazônicas e reduz a disponibilidade de indicadores para o planejamento institucional. A necessidade de quantificações transparentes e metodologicamente rastreáveis é coerente com as orientações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) para inventários de gases de efeito estufa (IPCC, 2019).

A estimativa de biomassa florestal depende da qualidade das medições de campo, da representação da densidade da madeira e da escolha do modelo. Procedimentos baseados em volume do fuste incorporam diretamente diâmetro, altura, fator de forma e densidade básica, enquanto modelos alométricos pantropicais sintetizam relações empíricas ajustadas com árvores colhidas em diferentes florestas tropicais (Nogueira et al., 2008; Chave et al., 2014). A altura é uma fonte importante de incerteza, e sua inclusão pode melhorar as estimativas quando é medida ou modelada de forma representativa (Hunter et al., 2013). Em escala regional, inventários de campo continuam indispensáveis para calibrar e validar produtos de sensoriamento remoto e mapas de biomassa, incluindo iniciativas recentes para a Amazônia brasileira (Ometto et al., 2023).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo estimar o carbono associado à biomassa do fuste de árvores inventariadas em parcelas permanentes de um fragmento florestal urbano da Universidade Federal do Amazonas, caracterizar sua variação entre parcelas e classes diamétricas e comparar numericamente as estimativas obtidas com aquelas produzidas pela equação pantropical de Chave et al. (2014).

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um fragmento florestal localizado no campus da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em Manaus, Amazonas, aproximadamente nas coordenadas 03°05′ S e 59°58′ W. A vegetação é classificada como floresta ombrófila densa de terra firme e o clima é equatorial úmido, tipo Af na classificação de Köppen, com temperatura média anual próxima de 26,7 °C e precipitação anual em torno de 2.300 mm (Marengo & Souza Jr., 2018). O fragmento está inserido na matriz urbana de Manaus e é delimitado, em parte, por vias de acesso e edificações do campus, condição que pode intensificar pressões de borda e reforça seu interesse como unidade de monitoramento de longo prazo. A localização das quatro parcelas permanentes utilizadas no estudo é apresentada na Figura 1.

Figura 1. Localização e situação atual das parcelas instaladas no fragmento florestal do campus da UFAM, Manaus, Amazonas.



Fonte: elaborado com dados da pesquisa (2026).

2.2. Delineamento amostral e base de dados

O inventário de campo foi realizado em quatro parcelas permanentes de 10 × 120 m (1.200 m² cada), totalizando 0,48 ha. Para a análise do estoque por unidade de área, foram selecionadas 190 árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 10 cm, com CAP, altura e densidade de referência disponíveis. A delimitação da base assegurou a utilização de uma área amostral conhecida e de registros adequados aos cálculos. Os demais registros do levantamento não integraram as estimativas apresentadas neste artigo.

Cada parcela foi considerada uma unidade amostral de 0,12 ha. A estimativa por hectare foi calculada pela razão entre o estoque de carbono estimado e a área amostrada, expressa em hectares. Para o conjunto das quatro parcelas, utilizou-se a área efetivamente inventariada de 0,48 ha. O resultado em Mg C ha^{-1} corresponde à padronização do estoque observado para uma unidade de área de 1 ha, permitindo comparações com outros levantamentos; não representa uma medição direta em um hectare contínuo nem uma extrapolação validada para todo o fragmento.

Para cada árvore utilizaram-se o identificador, a parcela, o nome científico, a circunferência à altura do peito (CAP), o DAP calculado como CAP/π, a altura total e a densidade básica de referência associada ao táxon. A densidade foi obtida da base de trabalho vinculada à Global Wood Density Database (Zanne et al., 2009), sem medições laboratoriais locais. As identificações e os valores foram mantidos vinculados aos registros individuais para possibilitar reanálise.

2.3. Procedimentos de estimativa de biomassa e carbono

O procedimento principal empregou as medições de campo e a densidade básica da madeira específica por espécie. A área basal individual (g), o volume estimado do fuste (V), a biomassa seca derivada desse volume (B) e o estoque de carbono correspondente (C) foram calculados pelas Equações 1–4:

$$g = \pi \times DAP^2 / 40.000 \quad (1)$$

$$V = g \times H \times 0{,}70 \quad (2)$$

$$B = V \times \rho \quad (3)$$

$$C = B \times 0{,}485 \quad (4)$$

Nessas expressões, g representa a área basal em metros quadrados; DAP, o diâmetro à altura do peito em centímetros; V, o volume estimado do fuste em metros cúbicos; H, a altura total em metros; ρ, a densidade básica da madeira em gramas por centímetro cúbico (g cm^{-3}), numericamente equivalente a megagramas por metro cúbico (Mg m^{-3}); B, a biomassa seca derivada do volume do fuste em megagramas (Mg); e C, o carbono correspondente em megagramas de carbono (Mg C). O fator de forma de 0,70 foi mantido por sua utilização histórica em inventários volumétricos amazônicos e por sua proximidade com o valor médio de 0,709 reportado para floresta densa da Amazônia Central; ainda assim, o emprego de um único fator para diferentes espécies e classes diamétricas permanece uma fonte de incerteza (Nogueira et al., 2008). A fração de carbono de 0,485 segue Silva (2007) para florestas da região de Manaus. A utilização de altura medida exige atenção porque erros sistemáticos nessa variável podem propagar-se para a biomassa estimada (Hunter et al., 2013).

Como procedimento alternativo de comparação numérica, foi aplicada a equação pantropical com altura proposta por Chave et al. (2014), amplamente utilizada para estimar biomassa aérea de árvores tropicais:

$$AGB = 0{,}0673 \times (\rho \times DAP^2 \times H)^{0{,}976} \quad (5)$$

Na Equação 5, AGB é a biomassa aérea total individual em quilogramas. Para o carbono, o resultado foi convertido em megagramas e multiplicado por 0,485. A comparação utilizou as mesmas 190 árvores e os mesmos dados de DAP, altura e densidade atribuída, constituindo um contraste numérico e não uma validação independente, pois o volume–densidade estima biomassa derivada do fuste, enquanto Chave et al. (2014) estimam biomassa aérea total.

2.4. Análise dos dados

Os estoques foram sumarizados por parcela, táxon e classe diamétrica. As classes adotadas foram 10–<20, 20–<30, 30–<40, 40–<50, 50–<60, 60–<70 e ≥70 cm. Calculou-se o coeficiente de variação amostral dos valores por hectare entre parcelas, bem como as frequências e participações percentuais por grupo. A diferença percentual entre procedimentos tomou o método volume–densidade como referência. A abordagem foi descritiva; não foram empregados testes inferenciais de generalização para o conjunto do fragmento.

2.5. Controle de qualidade, escopo e incertezas

O controle de consistência incluiu verificação das variáveis numéricas necessárias, recalculando o DAP a partir da CAP e conferindo as fórmulas de área basal, volume, biomassa e carbono. Os registros analisados apresentaram consistência aritmética. Os valores obtidos permanecem condicionados ao fator de forma constante, às alturas de campo e às densidades taxonômicas secundárias; nenhuma dessas fontes de incerteza foi resolvida por medição experimental.

3. Resultados

3.1. Estoque de biomassa e carbono por parcela

Nas quatro parcelas, o procedimento volume–densidade estimou 20,307 Mg C na área amostrada de 0,48 ha. A padronização desse estoque para 1 ha resultou em 42,307 Mg C ha^{-1}, valor de referência por unidade de área do estrato arbóreo estudado (Tabela 1 e Figura 2). Essa estimativa corresponde à média por hectare das parcelas inventariadas, sem pressupor que um hectare não amostrado apresente o mesmo estoque. Os valores por parcela evidenciaram variação espacial, com maiores estimativas nas parcelas 2 e 4.

Tabela 1. Biomassa e estoque de carbono do estrato arbóreo (DAP ≥ 10 cm) por parcela na área amostrada de 0,48 ha.

Parcela	Indivíduos	Área (ha)	Biomassa (Mg)	Carbono (Mg C)	Carbono (Mg C ha^{-1})
1	52	0,12	7,429	3,603	30,027
2	39	0,12	13,126	6,366	53,049
3	44	0,12	8,103	3,930	32,750
4	55	0,12	13,213	6,408	53,402
Total	190	0,48	41,871	20,307	42,307

Fonte: dados da pesquisa (2026). Nota: cada parcela possui 0,12 ha; a linha total/média expressa o estoque total em 0,48 ha e a média ponderada por área.

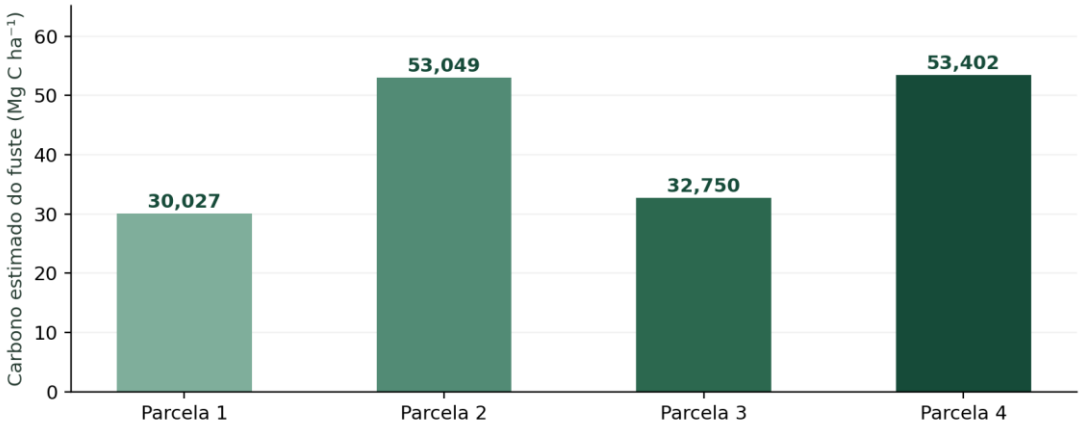

Figura 2. Carbono estimado no fuste por parcela, expresso por hectare.

No estrato arbóreo apresentado na Tabela 1, as parcelas 2 e 4 concentraram 12,774 Mg C, correspondentes a 62,9% do carbono total desse estrato, enquanto as parcelas 1 e 3 reuniram 7,533 Mg C. Os estoques variaram de 30,027 a 53,402 Mg C ha^{-1} entre as quatro unidades, evidenciando heterogeneidade espacial mesmo dentro da área amostrada.

3.2. Variação espacial

O coeficiente de variação amostral do estoque de carbono entre as parcelas foi de 29,9% para o estrato arbóreo com DAP ≥ 10 cm. A parcela 1 apresentou 52 árvores e o menor estoque (30,027 Mg C ha^{-1}), enquanto a parcela 4, com 55 árvores, apresentou o maior valor (53,402 Mg C ha^{-1}). A parcela 2, embora tivesse apenas 39 árvores, apresentou 53,049 Mg C ha^{-1}. Descritivamente, portanto, o número de indivíduos não acompanhou a ordenação do estoque de carbono.

A amplitude entre o menor e o maior estoque foi de 23,376 Mg C ha^{-1}. Essa variação, observada em apenas quatro unidades, descreve exclusivamente a heterogeneidade presente na área amostrada e não foi utilizada para inferir padrões para todo o fragmento.

3.3. Contribuição das espécies

A contribuição do carbono estimado foi desigual entre os táxons. Dipteryx odorata, Swartzia polyphylla e Emmotum nitens apresentaram as maiores contribuições individuais, somando 31,5% do carbono do estrato arbóreo com DAP ≥ 10 cm. A Tabela 2 apresenta os dez táxons com maior participação, calculada exclusivamente sobre o mesmo conjunto de 190 árvores utilizado nas demais análises.

Tabela 2. Táxons com maiores contribuições para o carbono do fuste estimado no estrato arbóreo (DAP ≥ 10 cm).

Nº	Nome científico	Indivíduos	Carbono (Mg C)	Participação (%)
1	*Dipteryx odorata* (Aubl.) Forsyth f.	1	3,007	14,81
2	*Swartzia polyphylla* DC.	1	2,114	10,41
3	*Emmotum nitens* (Benth) Miers	1	1,284	6,32
4	*Helicostylis tomentosa* (Poepp. & Endl.) Rusby	14	1,141	5,62
5	*Pouteria macrophylla* (Lam.) Eyma	8	0,909	4,48
6	*Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth	9	0,782	3,85
7	*Inga calantha* Ducke	4	0,782	3,85
8	*Didymopanax morototoni* (Aubl.) Decne. & Planch.	11	0,698	3,44
9	*Bocageopsis multiflora* (Mart.) R.E.Fr.	4	0,682	3,36
10	*Inga umbratica* Poepp. & Endl.	1	0,582	2,86

Fonte: cálculos realizados com os dados primários das parcelas 1–4 (2026). Participação relativa aos 190 indivíduos do estrato arbóreo.

As dez primeiras posições reuniram 59,0% do carbono do estrato arbóreo. O predomínio de algumas árvores grandes, em contraste com táxons mais abundantes e de menor contribuição individual, evidencia a importância da estrutura diamétrica para a distribuição estimada do carbono.

3.4. Critério diamétrico e estratos da vegetação

Entre as 190 árvores com DAP ≥ 10 cm, a maioria concentrou-se nas classes diamétricas inferiores. Contudo, apenas 11 indivíduos com DAP ≥ 30 cm responderam por 44,6% do carbono estimado; duas árvores com DAP ≥ 60 cm concentraram 25,2%. A distribuição por classe é apresentada na Tabela 3 e na Figura 3.

Tabela 3. Distribuição do carbono estimado no fuste por classe diamétrica (DAP ≥ 10 cm).

Classe de DAP (cm)	Indivíduos	Carbono (Mg C)	Participação (%)
10–<20	140	5,596	27,56
20–<30	39	5,660	27,87
30–<40	6	2,008	9,89
40–<50	3	1,922	9,46
50–<60	0	0,000	0,00
60–<70	1	2,114	10,41
≥70	1	3,007	14,81

Fonte: cálculos realizados com os dados primários (2026). Percentuais relativos ao carbono estimado no estrato arbóreo.

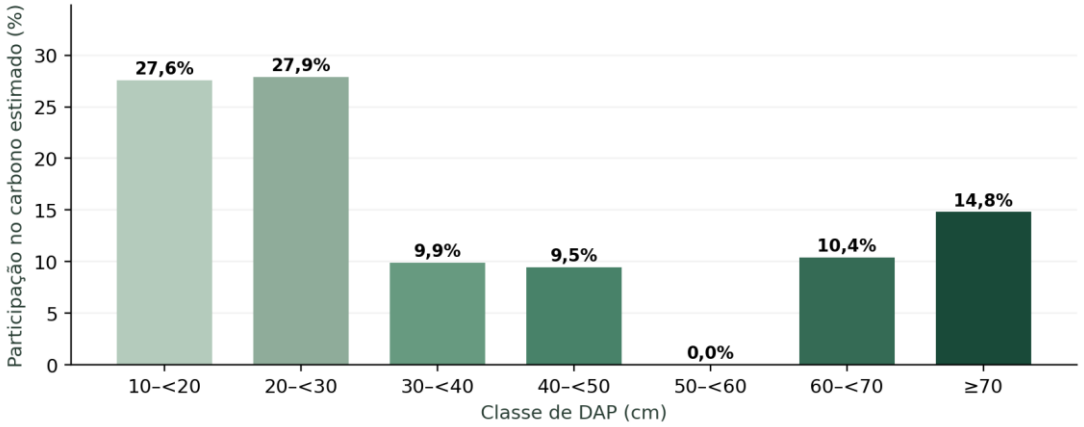

Figura 3. Participação percentual do carbono estimado no fuste por classe diamétrica.

A classe 50–<60 cm não apresentou indivíduos. A concentração de carbono em poucos indivíduos de maior diâmetro, apesar da maior frequência das classes inferiores, é um dos principais padrões estruturais do conjunto analisado.

3.5. Comparação entre procedimentos de estimativa

A equação pantropical de Chave et al. (2014), aplicada às mesmas 190 árvores com DAP ≥ 10 cm, produziu 19,897 Mg C, equivalentes a 41,452 Mg C ha^{-1}. O procedimento volume-densidade produziu 20,307 Mg C, ou 42,307 Mg C ha^{-1}, resultando em diferença relativa de −2,02% (Tabela 4).

Tabela 4. Contraste numérico entre procedimentos aplicados às mesmas árvores com DAP ≥ 10 cm.

Procedimento	Carbono total (Mg C)	Carbono (Mg C ha^{-1})	Diferença relativa
Volume do fuste × densidade × 0,485	20,307	42,307	Referência
Chave et al. (2014) × 0,485	19,897	41,452	-2,02%

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A diferença absoluta entre os procedimentos foi de 0,411 Mg C na área de 0,48 ha, equivalente a 0,855 Mg C ha^{-1}. Os valores são apresentados para caracterizar a sensibilidade das estimativas à formulação adotada, sem atribuir superioridade ou concordância biológica entre procedimentos que descrevem compartimentos distintos da árvore.

4. Discussão

4.1. Estoque de carbono e heterogeneidade espacial

Os resultados mostram que o fragmento do campus da UFAM mantém carbono mensurável na biomassa lenhosa estimada a partir do volume do fuste e apresenta heterogeneidade espacial entre as quatro parcelas amostradas. O coeficiente de variação de 29,9% no estrato arbóreo confirma que o estoque local depende da combinação entre diâmetro, altura, densidade da madeira e composição florística, e não simplesmente do número de indivíduos (Nogueira et al., 2008; Chave et al., 2014). Em escala amazônica, levantamentos recentes mostram diferenças substanciais de carbono entre tipos florestais e reforçam a necessidade de estimativas locais para representar adequadamente essa variabilidade (Dionizio et al., 2025; Ometto et al., 2023).

A estimativa do procedimento volume–densidade refere-se exclusivamente ao carbono associado à biomassa do fuste das árvores inventariadas na área conhecida. Não inclui galhos, folhas, raízes, solo ou madeira morta. Por isso, não deve ser apresentada como estoque total de carbono do fragmento nem comparada diretamente com estimativas de biomassa aérea total de outros estudos (Clerici et al., 2016; Chave et al., 2014).

4.2. Espécies de grande porte e implicações para conservação

As três árvores com maior contribuição individual concentraram 31,5% do carbono do estrato arbóreo analisado. A concentração fica ainda mais evidente ao considerar as classes diamétricas: apenas 11 árvores com DAP ≥ 30 cm responderam por 44,6% do carbono estimado a partir do fuste. Esse padrão ressalta a importância ecológica e estrutural de indivíduos maiores para o estoque local e para ações de acompanhamento e conservação (Chave et al., 2014).

A utilização de densidades específicas da *Global Wood Density Database* (Zanne et al., 2009; Chave et al., 2009) aumenta a sensibilidade da estimativa à composição florística e evita tratar espécies de propriedades físicas distintas como equivalentes. Essa decisão é relevante na Amazônia Central, onde a densidade da madeira varia amplamente entre espécies e influencia diretamente a biomassa calculada. O resultado também reforça a importância de manter identificação botânica consistente e de documentar a origem dos valores de densidade, sobretudo quando não existem medições locais para todos os indivíduos.

4.3. Comparação entre procedimentos e fontes de incerteza

A diferença de 2,02% entre os resultados dos procedimentos, aplicada às mesmas árvores, é uma observação numérica desta base e não evidencia equivalência metodológica. Ambos empregam diâmetro, altura e densidade da madeira, mas representam compartimentos distintos: biomassa derivada do volume do fuste e biomassa aérea total. A interpretação dessa diferença deve, portanto, considerar a estrutura e as hipóteses dos modelos, e não apenas a proximidade entre os números.

As principais incertezas decorrem das medidas de altura, do fator de forma uniforme de 0,70, dos valores secundários de densidade, da falta de validação local das propriedades da madeira e da cobertura de apenas quatro parcelas. Essas limitações delimitam o alcance das conclusões e impedem extrapolação confiável para todo o fragmento ou para compartimentos não avaliados (Nogueira et al., 2008; Hunter et al., 2013).

4.4. Implicações para fragmentos urbanos amazônicos

Fragmentos inseridos em matrizes urbanas possuem extensão limitada quando comparados à floresta contínua, mas podem contribuir para retenção local de carbono, conectividade ecológica, regulação microclimática e conservação de biodiversidade. A literatura sobre árvores e florestas urbanas mostra que o carbono armazenado depende fortemente da estrutura da vegetação e do tipo de cobertura, com diferenças entre arborização dispersa, praças e remanescentes florestais (Nowak & Crane, 2002; Lisboa et al., 2024; Broi Junior et al., 2025). Em florestas periurbanas e urbanas tropicais, conservação, estágio sucessional e intensidade de perturbação condicionam o estoque e sua persistência (Clerici et al., 2016; Huera-Lucero et al., 2020; Nandi & Jashimuddin, 2026; Solomon et al., 2025). Na Amazônia, efeitos de borda podem direcionar fragmentos para estruturas mais sucessionais e também alterar processos do solo, inclusive interações entre microbioma e carbono (Tabarelli et al., 2008; Kovacs et al., 2025). No caso da UFAM, a presença de parcelas permanentes dentro de uma instituição de ensino e pesquisa cria oportunidade adicional para integrar conservação, formação acadêmica e monitoramento de longo prazo.

A ampliação do inventário e a integração futura com dados de sensoriamento remoto poderão apoiar análises espaciais de maior abrangência, desde que acompanhadas por informações de campo e validação apropriada. Neste estudo, a interpretação permanece restrita às quatro parcelas efetivamente medidas.

4.5. Implicações para monitoramento e planejamento institucional

A linha de base obtida pode apoiar decisões institucionais desde que seja incorporada a um programa de monitoramento e não tratada como inventário definitivo. O acompanhamento periódico das parcelas permitiria estimar incrementos, mortalidade e recrutamento, transformando um estoque estático em balanço temporal de carbono. A associação futura entre parcelas permanentes, dados de sensoriamento remoto e registros de intervenções no campus também pode aumentar a capacidade de detectar mudanças estruturais e priorizar áreas de conservação. Esse tipo de integração é compatível com a tendência contemporânea de combinar inventários de campo e produtos orbitais ou aerotransportados para melhorar a resolução espacial das estimativas florestais (Ometto et al., 2023; Qin et al., 2021; Rina et al., 2024).

Para a gestão do fragmento, a principal implicação não é estabelecer um valor monetário imediato para o carbono, mas reconhecer árvores grandes, espécies de madeira densa e setores com maior estoque como componentes relevantes da infraestrutura ecológica do campus. O indicador de carbono deve ser utilizado em conjunto com informações sobre biodiversidade, estabilidade de árvores, conectividade, uso acadêmico e risco de borda, evitando decisões baseadas em um único serviço ecossistêmico.

5. Conclusões

O inventário realizado no fragmento florestal urbano da Universidade Federal do Amazonas evidencia variação espacial na distribuição do carbono estimado a partir do volume do fuste. Essa heterogeneidade reforça a importância de unidades amostrais permanentes e de critérios de mensuração consistentes para acompanhar alterações estruturais e interpretar o estoque local.

A concentração de carbono em poucos indivíduos de maior diâmetro destaca o papel dessas árvores na estrutura do fragmento. O acompanhamento de sua permanência e condição deve integrar estratégias de conservação, juntamente com a diversidade de espécies, a conectividade e os demais serviços ecossistêmicos da área.

O contraste com a equação pantropical demonstra que resultados próximos podem ser obtidos por procedimentos conceitualmente distintos, sem que isso comprove sua equivalência. O aprofundamento das estimativas requer a validação das densidades da madeira, o aprimoramento dos parâmetros volumétricos e a ampliação da rede de parcelas, visando análises futuras de biomassa aérea total e dinâmica do carbono.

6. Contribuição dos autores

A.K.S.J.: investigação, coleta e organização dos dados, análise descritiva e redação do manuscrito. F.M.B.R., R.B.C.L.; S.M.S.R.D[c] e P.M.F.: conceptualização, orientação, supervisão, revisão metodológica, interpretação dos resultados e redação – revisão e edição. Os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

7. Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) pela realização do programa de iniciação científica. Os autores agradecem também à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo apoio institucional e pela manutenção da área de estudo.

8. Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesses.

9. Disponibilidade de dados

Os dados utilizados no estudo integram a base do projeto de iniciação científica e poderão ser disponibilizados mediante solicitação aos autores, observadas as normas institucionais aplicáveis.

Referências

Abreu, J.J.C.; Ruivo, M.L.P.; Pires, H.C.G. 2026. Quantification of biomass and carbon in a fragment of secondary forest in the Amazon. Revista de Gestão Social e Ambiental. DOI: 10.24857/rgsa.v20n1-051.

Almeida, D.R.; Stark, S.C.; Schietti, J.; Camargo, J.L.C.; Amazonas, N.T.; Gorgens, E.B.; et al. 2019. Persistent effects of fragmentation on tropical rainforest canopy structure after 20 years of isolation. Ecological Applications, 29: e01952.

Araujo, E.C.G.; Sanquetta, C.R.; Dalla Corte, A.P.; Pelissari, A.L.; Orso, G.; Silva, T.C. 2023. Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. Journal of Environmental Management. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117251.

Barros, H.S.; Fearnside, P.M. 2016. Soil carbon stock changes due to edge effects in central Amazon forest fragments. Forest Ecology and Management. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.08.002.

Broi Junior, C.C.; Sampaio, M.B.; França, N.A.; Batista, V.S.; Souza, B.L.O.; Milaneze-Gutierre, M.A. 2025. Carbon stock in an urban area afforested 50 years ago. Revista Árvore. DOI: 10.53661/1806-9088202549263919.

Chave, J.; Coomes, D.A.; Jansen, S.; Lewis, S.L.; Swenson, N.G.; Zanne, A.E. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecology Letters, 12: 351-366.

Chave, J.; Réjou-Méchain, M.; Búrquez, A.; Chidumayo, E.; Colgan, M.S.; Delitti, W.B.; et al. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global Change Biology, 20: 3177-3190.

Clerici, N.; Rubiano, K.; Abd-Elrahman, A.; Posada Hoestettler, J.M.; Escobedo, F. 2016. Estimating aboveground biomass and carbon stocks in periurban Andean secondary forests using very high resolution imagery. Forests, 7: 138. DOI: 10.3390/f7070138.

Dionizio, E.; Giannini, T.; Gastauer, M.; Barbosa-Silva, R.G.; Souza, R.L.M.D.; Nunes, S.; Ramos, S.; Andrino, C.; Cavalcante, R.B.L. 2025. Aboveground carbon stocks for different forest types in eastern Amazonia. Environmental Research Communications. DOI: 10.1088/2515-7620/adc06a.

Fearnside, P.M. 1997. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. Climatic Change, 35: 321-360.

Fearnside, P.M. 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. Climatic Change, 46: 115-158.

Fearnside, P.M.; Laurance, W.F. 2004. Tropical deforestation and greenhouse-gas emissions. Ecological Applications, 14: 982-986.

Houghton, R.A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. Global Change Biology, 11: 945-959.

Huera-Lucero, T.; Salas-Ruiz, A.; Changoluisa, D.; Bravo-Medina, C. 2020. Towards sustainable urban planning for Puyo (Ecuador): Amazon forest landscape as potential green infrastructure. Sustainability, 12: 4768.

Hunter, M.; Keller, M.; Victoria, D.C.; Morton, D. 2013. Tree height and tropical forest biomass estimation. Biogeosciences, 10: 8385-8399. DOI: 10.5194/bg-10-8385-2013.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, Geneva.

Kovacs, M.; Nghĩa, N.; Kovacs, E.D. 2025. Urban forest fragmentation reshapes soil microbiome-carbon dynamics. Diversity. DOI: 10.3390/d17080545.

Laurance, W.F.; Laurance, S.G.; Ferreira, L.V.; Rankin-de Merona, J.M.; Gascon, C.; Lovejoy, T.E. 1997. Biomass collapse in Amazonian forest fragments. Science, 278: 1117-1118.

Laurance, W.F.; Nascimento, H.E.M.; Laurance, S.G.; Andrade, A.; Ribeiro, J.E.L.S.; Giraldo, J.P.; et al. 2011. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. Biological Conservation, 144: 56-67.

Lisboa, M.A.; Silva, L.A.D.; Nascimento, A.S.; Silva, A.O.; Teixeira, M.R.A.; Ferreira, M.F.R.; et al. 2024. Diversity, structure, and carbon sequestration potential of the woody flora of urban squares in the Brazilian semiarid region. Trees, Forests and People. DOI: 10.1016/j.tfp.2024.100561.

Malhi, Y.; Phillips, O.L.; Lloyd, J.; Baker, T.; Wright, J.; Almeida, S.; et al. 2002. An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). Journal of Vegetation Science, 13: 439-450.

Malhi, Y.; Wood, D.; Baker, T.R.; Wright, J.; Phillips, O.L.; Cochrane, T.; et al. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. Global Change Biology, 12: 1107-1138.

Marengo, J.A.; Souza Jr., C.M. 2018. Mudanças climáticas e impactos ambientais na Amazônia. Revista Brasileira de Meteorologia, 33: 11-23.

Nandi, R.; Jashimuddin, M. 2026. Modelling carbon stock in a tropical urban forest: insights from i-Tree Eco and pantropical allometric equations in Chattogram City, Bangladesh. Trees, Forests and People. DOI: 10.1016/j.tfp.2026.101186.

Nogueira, E.M.; Fearnside, P.M.; Nelson, B.W.; Barbosa, R.I.; Keizer, E.W.H. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. Forest Ecology and Management, 256: 1853-1867.

Nowak, D.J.; Crane, D.E. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution, 116: 381-389.

Ometto, J.; Gorgens, E.; Pereira, F.R.S.; Sato, L.; Assis, M.L.D.; Cantinho, R.; Longo, M.; Jacon, A.; Keller, M. 2023. A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing. Scientific Data. DOI: 10.1038/s41597-023-02575-4.

Pan, Y.; Birdsey, R.A.; Fang, J.; Houghton, R.; Kauppi, P.E.; Kurz, W.A.; et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 333: 988-993.

Pertille, C.T.; Cunha-Neto, E.; Sanquetta, C.R.; Behling, A.; Dalla-Corte, A.P. 2025. Carbon stock in the biomass of native urban fragments: a case study in an Atlantic Forest remnant in Brazil. Forest Systems. DOI: 10.5424/fs/2025341-20912.

Phillips, O.L.; Malhi, Y.; Higuchi, N.; Laurance, W.F.; Núñez, P.V.; Vásquez, R.M.; et al. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. Science, 282: 439-442.

Qin, H.; Zhou, W.; Yao, Y.; Wang, W. 2021. Estimating aboveground carbon stock at the scale of individual trees in subtropical forests using UAV LiDAR and hyperspectral data. Remote Sensing, 13: 4969. DOI: 10.3390/rs13244969.

Ramon, M.; Lafortezza, R.; Ribeiro, A.P.; Camargo, P.B.; Domingos, M.; Gomes, E.P.C.; et al. 2024. Carbon and nitrogen stock in soils of subtropical urban forests: isotopic δ13C and δ15N indicators for nature-based solutions in a megacity. Ecological Indicators. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111743.

Rina, S.; Du, W.; Shan, Y.; Ying, H.; Rihan, W.; Li, R. 2024. Aboveground carbon stock estimation based on backpack LiDAR and UAV multispectral imagery at the forest sample plot scale. Remote Sensing, 16: 3927. DOI: 10.3390/rs16213927.

Silva, L.; Oliveira, D.M.; Nóbrega, G.N.; Barbosa, R.; Cordeiro, R.C. 2023. Pyrogenic carbon stocks and its spatial variability in soils from savanna-forest ecotone in Amazon. Journal of Environmental Management. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117980.

Silva, R.P. 2007. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas.

Solomon, L.W.; Arunrat, N.; Phutthai, T.; Wisawapipat, W.; Sereenonchai, S.; Hatano, R. 2025. Carbon stock estimation and human disturbance in selected urban un-conserved forests in Entoto Mountain Forest, Addis Ababa, Ethiopia. Diversity, 17: 225. DOI: 10.3390/d17040225.

Tabarelli, M.; Lopes, A.V.; Peres, C.A. 2008. Edge-effects drive tropical forest fragments towards an early-successional system. Biotropica, 40: 657-661.

Uvidia, K.; Salazar-Cotugno, L.; Molina, J.R.; Silva, G.F.; Bonilla-Bedoya, S. 2025. Effects on soil organic carbon stock in the context of urban expansion in the Andes: Quito City case. Forests. DOI: 10.3390/f16091409.

Zanne, A.E.; Lopez-Gonzalez, G.; Coomes, D.A.; Ilic, J.; Jansen, S.; Lewis, S.L.; et al. 2009. Global wood density database. Dryad. DOI: 10.5061/dryad.234