

ÍNDICE DE RAZÃO DE CARBONO (IRC): UMA NOVA PROPOSTA PARA QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO EM FLORESTAS

Jonathan Ezequiel da Silveira¹, Carolane Dias Xavier¹, Aretha Julianna Pereira Reis¹, Aliny Rodrigues Marinho¹, Ângela Maria Ferreira Souza², Bruno Oliveira Lafetá¹

¹Instituto 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, jonathan.evangel@gmail.com, carolanediasxavier1819@gmail.com, reisaretha3@gmail.com, alinyrodrigues006@gmail.com, bruno.lafeta@ifmg.edu.br.

²Escola Estadual Josefina Pimenta, Rua Durval Pimenta, 130, Centro - 39705-000 - São João Evangelista-MG, Brasil, angela.ferreira82@educacao.mg.gov.br

Resumo

O objetivo do presente estudo foi propor uma abordagem alternativa para a quantificação de carbono em um ecossistema florestal, especificamente no cerrado típico. Os dados foram provenientes de inventário florestal realizado em um fragmento de cerrado típico de 26,90ha, situado no distrito de Desembargador Otoni, município de Diamantina. O inventário florestal contemplou a distribuição casual de oito parcelas de 600 m² (20 × 30 m). O Índice de Razão de Carbono (IRC) consistiu razão entre o estoque de carbono lenhoso e o volume de um cilindro com base na área seccional ao nível do peito e na altura total dos fustes. O inventário florestal abrangeu 531 fustes, com DAP variando de 5,1 a 22,4 cm e altura total de 1,7 a 7,5 m. A média e desvio padrão de IRC foram de 0,24 e 0,0310 ton m⁻³. As estimativas individuais de carbono não apresentaram diferença significativa entre o uso do IRC e equação alométrica. Conclui-se que o IRC permite estimar de forma não destrutiva o estoque de carbono em fustes de cerrado típico, apresentando resultados consistentes com equações alométricas.

Palavras-chave: Abordagem não destrutiva. Altura. Diâmetro. Fator. Produção.

Área do Conhecimento: Engenharia Agrônômica / Engenharia Florestal.

Introdução

O carbono armazenado em ecossistemas florestais desempenha papel essencial na regulação do clima global e na manutenção da produtividade dos habitats. Sua quantificação permite compreender fluxos de carbono, avaliar estoques de crescimento e subsidiar políticas de conservação e manejo sustentável (Carvalho *et al.*, 2024; Lima *et al.*, 2025). Entretanto, a estimativa de carbono em árvores, especialmente em ecossistemas complexos como o cerrado, enfrenta limitações técnicas e estatísticas devido à heterogeneidade estrutural de comunidades e à variação entre espécies, diâmetros e alturas arbóreas.

Tradicionalmente, a avaliação do carbono arbóreo é realizada por métodos destrutivos, que exigem o corte de árvores para medir biomassa e densidade da madeira (Batista *et al.*, 2014; Campos; Leite, 2017). Embora precisos, esses métodos são dispendiosos, invasivos e pouco viáveis para grandes áreas ou para espécies raras. Abordagens indiretas, baseadas em modelos alométricos, oferecem alternativas não destrutivas (Scolforo *et al.*, 2008), mas ainda apresentam limitações, sobretudo em áreas com elevada diversidade de formas e tamanhos de fustes. A quantificação de carbono em fustes de forma não destrutiva permanece, portanto, um desafio metodológico, evidenciando a necessidade de estratégias alternativas precisas e aplicáveis em campo.

Na mensuração florestal, o fator de forma é tradicionalmente utilizado para estimar o volume de fustes, ajustando o volume do cilindro teórico às formas reais das árvores (Soares *et al.*, 2006). No entanto, não existe atualmente um equivalente específico para a quantificação de carbono, o que dificulta a aplicação de métodos rápidos e não destrutivos para estimar estoques de carbono de forma padronizada e precisa.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Neste contexto, este estudo propõe uma abordagem alternativa, denominada índice de razão de carbono, que relaciona a quantidade de carbono estimada ao volume teórico do cilindro correspondente ao fuste na altura do peito (1,30 m em relação ao nível do solo). Essa metodologia busca simplificar a quantificação de carbono sem recorrer ao corte das árvores, mantendo coerência com os princípios da mensuração florestal e aproveitando conceitos já consolidados, como o fator de forma para o volume de fustes. Além disso, a integração do índice a inventários florestais e análises de crescimento permite avaliações mais completas da estrutura florestal e do potencial de sequestro de carbono.

O objetivo foi propor uma abordagem alternativa para a quantificação de carbono em um ecossistema florestal, especificamente no cerrado típico, oferecendo uma ferramenta prática, precisa e menos invasiva para estimativa de estoques de carbono arbóreo, com potencial aplicação em programas de mitigação de mudanças climáticas e políticas de manejo sustentável.

Metodologia

Os dados utilizados pelo presente trabalho foram provenientes de inventário florestal realizado em um fragmento de cerrado típico de 26,90ha, situado no distrito de Desembargador Otoni, município de Diamantina, nas coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 672.520m E e 8.049.450 N (Datum Sirgas 2000 – Zona 23S). De acordo com a classificação do sistema internacional de Köppen, o tipo climático da região é o Cwb (mesotérmico). Segundo INMET (2025), as médias anuais de temperatura e precipitação acumulada são de 22 a 24°C e de 1050 a 1250mm, respectivamente.

O inventário florestal consistiu na distribuição casual de oito parcelas retangulares de 600 m² (20 × 30 m) sobre relevo plano (intensidade amostral de 1,78%). A coleta de dados biométricos foi realizada em todos os fustes com circunferência à altura do peito (CAP, cm) igual ou superior a 15,7 cm. A CAP foi tomada com auxílio de fita métrica, e a altura total (H, m) foi obtida pelo método de superposição de ângulos iguais. Empregou-se a razão entre CAP e o valor de π (3,141592654...) para o cálculo do diâmetro correspondente (DAP, cm).

O estoque de carbono nos fustes (C, ton ind⁻¹) foi estimado pela equação fornecida por Scolforo *et al.* (2008), para a fitofisionomia de cerrado típico no estado de Minas Gerais:

$$C = e^{-11,3062230312 + 2,47024086 \ln(DAP) + 0,5837634842 \ln(H)}; \bar{R}^2 = 95,77\% \text{ e } S_{yx} = 32,19\%$$

Em que: e = constante neperiana; $\bar{R}^2$ = coeficiente de determinação ajustado; e S_{yx} = erro padrão.

O Índice de Razão de Carbono (IRC, ton m⁻³) foi calculado pela razão entre o estoque de carbono estimado em cada fuste e o volume de um cilindro com base na área seccional ao nível do peito e na altura total, conforme a expressão:

$$IRC = \frac{C}{gH} = \frac{C}{V_{cilindro}}$$

Em que: g = área seccional à altura do peito; $V_{cilindro}$ = volume do cilindro correspondente à altura do peito. O IRC funciona de maneira análoga ao fator de forma, convencionalmente aplicado para estimar volume de fustes, permitindo comparar a densidade de carbono entre árvores de diferentes tamanhos de forma não destrutiva. Esse índice permite comparar fustes de diferentes dimensões de modo padronizado e não destrutiva, servindo como valor de referência regional para a estimativa indireta de carbono.

Os dados individuais de diâmetro, altura e IRC foram avaliados quanto à assimetria pelo método dos momentos, à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e por inspeção gráfica das densidades, enquanto as associações entre variáveis foram analisadas por meio da correlação de Spearman.

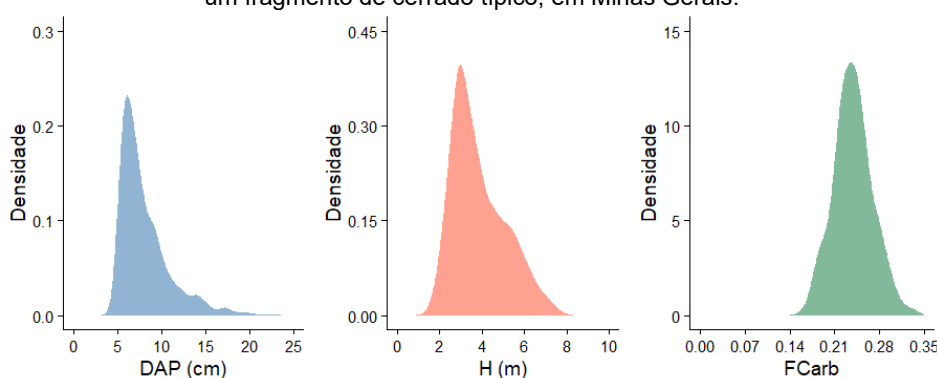
As estimativas individuais de carbono foram obtidas por duas abordagens: (i) a equação de Scolforo *et al.* (2008) para cerrado típico em Minas Gerais e (ii) a relação multiplicativa entre a média do IRC e o volume do cilindro. As estimativas resultantes foram comparadas pelo teste de Mann-Whitney para amostras dependentes.

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R (R Core Team, 2025), ao nível de significância de 5,0%.

Resultados

O inventário florestal abrangeu 531 fustes, com DAP variando de 5,1 a 22,4 cm e altura total de 1,7 a 7,5 m. Os dois primeiros atributos biométricos não apresentaram normalidade segundo o teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$), exibindo assimetrias positivas de 1,71 para o diâmetro e 0,75 para a altura. Por outro lado, a distribuição do IRC tendeu à simetria e à normalidade (Figura 1). A média e desvio padrão de IRC foram de 0,24 e 0,0310 ton m^{-3} .

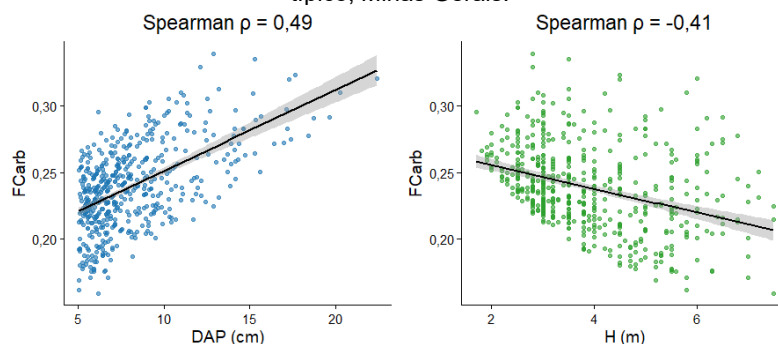
Figura 1 - Representações gráficas da densidade dos atributos biométricos do inventário florestal realizado em um fragmento de cerrado típico, em Minas Gerais.



Fonte: os autores.

A associação do IRC com as dimensões dos fustes apresentou padrões distintos. O coeficiente de Spearman indicou correlação positiva com o DAP ($\rho = 0,49$; $p \leq 0,05$) e negativa com a altura total ($\rho = -0,41$; $p \leq 0,05$) (Figura 2).

Figura 2 – Representações gráficas da correlação de Spearman entre atributos biométricos, coletados convencionalmente em inventários florestais, e o índice de razão de carbono, em um fragmento de cerrado típico, Minas Gerais.



Fonte: os autores.

O estoque total de carbono foi estimado em 6,97 ton ha^{-1} pela equação de Scolforo et al. (2008) para cerrado típico em Minas Gerais e em 6,63 ton ha^{-1} pelo método pautado na média de IRC, representando diferença de 4,92% em relação ao valor obtido pela equação alométrica. As estimativas individuais de carbono não apresentaram diferença significativa entre as duas abordagens, conforme o teste de Mann-Whitney ($p > 0,05$).

Discussão

Os resultados evidenciaram que o IRC representa uma alternativa consistente à equação alométrica de Scolforo *et al.* (2008) para a estimativa de carbono em fustes de cerrado típico. A

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

diferença entre os estoques totais de carbono obtidos pelas duas abordagens foi de apenas 4,92%, sem diferença estatística nas estimativas individuais, o que reforça a viabilidade do IRC como ferramenta não destrutiva e simplificada para inventários florestais.

A correlação positiva do IRC com o diâmetro e negativa com a altura indica que a eficiência de armazenamento de carbono no sítio em estudo tende a ser maior em árvores mais grossas e relativamente baixas. Esse padrão pode estar relacionado à arquitetura das espécies de cerrado, caracterizadas por copas largas, fustes tortuosos e maior investimento em biomassa lenhosa em detrimento da altura (Herrero; Southworth, 2020; Guimarães *et al.*, 2025). Resultados semelhantes foram descritos em outros estudos sobre ecossistemas savânicos e florestais, nos quais o incremento diamétrico foi apontado como variável de maior influência sobre a biomassa e o estoque de carbono, em comparação com a altura total das árvores (Batista *et al.*, 2014; Scolforo *et al.*, 2008).

O fato de o IRC apresentar distribuição tendente à normalidade sugere que o índice pode ser empregado como parâmetro regional de referência, facilitando sua aplicação em diferentes inventários. Além disso, sua analogia ao fator de forma volumétrico reforça o potencial de integração do método em rotinas de mensuração florestal já consolidadas, permitindo comparações padronizadas entre árvores de diferentes dimensões.

Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas. O IRC depende de equações alométricas prévias para sua calibração inicial, como a de Scolforo *et al.* (2008), e pode variar em função da densidade da madeira e da composição florística local. Assim, a extrapolação dos resultados para outras fitofisionomias ou regiões do bioma cerrado deve ser feita com cautela, recomendando-se a validação por novos inventários.

Em síntese, o IRC mostrou-se uma ferramenta prática, de baixo custo e metodologicamente simples, com potencial para ampliar a eficiência de estimativas de carbono em ecossistemas complexos como o cerrado. Sua adoção em inventários florestais pode contribuir para avaliações mais rápidas e menos invasivas, fortalecendo políticas de conservação e estratégias de mitigação das mudanças climáticas.

Conclusão

O índice de razão de carbono (IRC) permite estimar de forma não destrutiva o estoque de carbono em fustes de cerrado típico, apresentando resultados consistentes com equações alométricas. Essa abordagem oferece uma ferramenta prática e padronizada para inventários florestais e monitoramento de estoques de carbono.

Referências

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais:** árvores, arvoredos e florestas. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal:** perguntas e respostas. 5. ed. Viçosa: UFV. 2017. 636p.

CARVALHO, F. A.; ALTOMARE, M.; PEREIRA, A. L.; GONÇALVES, L.; PACHECO, F.; JARDIM, T. H.; FURTADO, S. G.; SOUZA, N. C.; CANDIDO, H. M. N. Carbon estimates in a neglected non-forest ecosystem: aboveground biomass in a tropical cloud savanna in Southeastern Brazil. **Ecological Frontiers**, v. 44, p. 1090-1095, 2024.

GUIMARÃES, M. J. M.; REIS, I. D. D.; BARROS, J. R. A.; LOPES, I.; DA COSTA, M. G.; RIBEIRO, D. P.; CARVALHO, G. C.; DA SILVA, A. S.; OLIVEIRA ALVES, C. V. Identification of vegetation areas affected by wildfires using RGB images obtained by UAV: a case study in the Brazilian Cerrado. **Geomatics**, v. 5, n. 1, 13, 2025.

HERRERO, H. V.; SOUTHWORTH, J. Special issue on dynamics of the global savanna and grasslands biomes. **Applied Sciences**, v. 10, n. 22, 8043, 2020.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. Brasília.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em 20 ago. 2025.

LIMA, M. T. D.; FERNANDES, M. M.; GARCIA, J. R.; MACEDO L. O. B. Changes in land use and cover and carbon stock estimates in the Red River Sub-basin, state of Mato Grosso, Brazil. **Environmental Science & Policy**, v. 56, 101299, 2025.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2025.

SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A.; D.; ACERBI JÚNIOR, F. W. **Inventário florestal de Minas Gerais:** equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. Lavras: Editora UFLA, 2008. 216 p.

SOARES, C. P. B., PAULA NETO, F., SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal.** 1. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276p.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) pelo apoio logístico para a realização do presente projeto.