GRADIENTES GEOGRÁFICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE CARBONO EM SOLOS DO AMAZONAS

Everton Fernando Espitalher de Souza[1], Jacqueline Alves da Silva[1], Carlos Daniel dos Santos[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, fernando.espitalher@gmail.com, alves.jacquelinee@gmail.com, carlos.ds2005@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 objetivo do presente trabalho foi avaliar a relação dos gradientes de latitude e longitude com a variação do teor de carbono em solos de remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas. Foram analisados dados de 108 conglomerados do Inventário Florestal Nacional, considerando o teor de carbono na camada de 0–20 cm e as coordenadas geográficas dos pontos amostrais. Foram ajustados modelos de regressão linear simples, utilizando latitude e longitude individualmente como variáveis independentes. Os teores de carbono variaram de 2,60 a 69,80 g kg^{-1}, com média de 20,68 g kg^{-1}. Não foram observadas relações lineares significativas entre o teor de carbono e a latitude ($F = 0,45$; $p = 0,5026$) ou a longitude ($F = 2,06$; $p = 0,1545$). Os modelos apresentaram baixa capacidade explicativa, com R^2 de 0,0043 para latitude e 0,0190 para longitude. Conclui-se que os gradientes geográficos, quando considerados isoladamente, apresentam baixa capacidade para explicar a variação do teor de carbono nos solos avaliados.
Palavras-chave: Carbono orgânico do solo. Floresta natural. Latitude. Longitude. Inventário Florestal Nacional.

Área do Conhecimento: Engenharia Agronômica, Agronomia.

Introdução

A distribuição do carbono no solo varia espacialmente e nem sempre segue de forma direta os gradientes geográficos de uma região. Em ecossistemas florestais, o carbono do solo constitui um importante componente do ciclo global do carbono e sua dinâmica resulta da interação entre condições climáticas, vegetação e propriedades físicas e químicas do solo (JACKSON et al., 2017). Na Amazônia, essa complexidade é particularmente relevante devido à ampla extensão territorial e à heterogeneidade ambiental e edáfica, que condicionam diferentes concentrações de carbono mesmo entre áreas próximas.

A posição geográfica constitui uma forma simples de representar a organização espacial de atributos ambientais em grandes extensões territoriais. Variações latitudinais podem acompanhar mudanças nas condições climáticas, enquanto diferenças longitudinais podem estar associadas à distribuição de solos, relevo, precipitação e outros condicionantes ambientais. A interpretação desses gradientes, contudo, depende da escala espacial considerada e da magnitude das variações existentes no território. Estudos realizados na Amazônia mostram que a concentração e o estoque de carbono no solo apresentam padrões espaciais relacionados principalmente às características edáficas, topográficas e de drenagem (QUESADA et al., 2020; CEDDIA et al., 2015).

Nesse contexto, permanece uma questão relevante: os gradientes de latitude e longitude apresentam capacidade de representar a variação do teor de carbono nos solos dos remanescentes de floresta natural do estado do Amazonas? A resposta é relevante para determinar se coordenadas geográficas, utilizadas de forma individual, são capazes de expressar tendências espaciais detectáveis em uma escala estadual. A ausência dessa avaliação limita a compreensão sobre o potencial dessas variáveis como descritoras simples da distribuição do carbono em solos florestais amazônicos.

Mediante exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a relação dos gradientes geográficos de latitude e longitude com a variação do teor de carbono em solos de remanescentes de floresta natural no estado do Amazonas, com base em dados do Inventário Florestal Nacional e modelos de regressão linear simples.

Metodologia

Este estudo utilizou dados provenientes do Inventário Florestal Nacional (IFN), coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro e disponibilizado por meio do Sistema Nacional de Informações Florestais. Foram considerados apenas remanescentes de florestas naturais no estado do Amazonas, sendo excluídas áreas com florestas plantadas.

A base de dados compreendeu 108 conglomerados amostrais distribuídos em malha sistemática de 20 × 20 km. Cada conglomerado apresentou configuração em cruz de Malta, formada por quatro subunidades retangulares de área fixa (20 × 100 m), orientadas segundo os pontos cardeais e posicionadas a 50 m de um ponto central.

As informações referentes ao teor de carbono do solo (C, g kg^{-1}) 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}.

As coordenadas geográficas (latitude e longitude) do ponto central de cada conglomerado foram centralizadas em relação às respectivas médias. Esse procedimento de centralização permitiu expressar as coordenadas como desvios em relação à posição geográfica média da área amostrada, reduzindo a magnitude dos valores utilizados no ajuste dos modelos. Foram ajustados modelos de regressão linear simples para avaliar a relação entre o teor de carbono do solo e cada coordenada geográfica, considerando a latitude e a longitude como variáveis independentes e o teor de carbono como variável dependente (Tabela 1). Os ajustes foram realizados pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

Tabela 1 - Modelos de regressão linear simples utilizados para avaliar a relação entre o teor de carbono do solo e os gradientes geográficos no estado do Amazonas.

Modelos	Forma de ajuste
M1	$C = \beta_0 + \beta_1 Latitude + \varepsilon$
M2	$C = \beta_0 + \beta_1 Longitude + \varepsilon$

β_0 e β_1 = parâmetros dos modelos de regressão; ε = erro aleatório.
Fonte: os autores.

A significância das relações foi avaliada pelo teste F da regressão, considerando-se significativo o efeito da variável independente quando $p < 0,05$. O desempenho dos modelos foi avaliado pela Raiz do Quadrado do Erro Médio (RQEM) e pelo Critério de Informação de Akaike (AIC). O coeficiente de determinação (R^2) também foi utilizado para quantificar a proporção da variação do teor de carbono explicada individualmente pela latitude e pela longitude. As relações entre o teor de carbono e as coordenadas geográficas foram representadas graficamente por meio de diagramas de dispersão, com inclusão das respectivas retas de regressão linear, permitindo visualizar a distribuição dos dados e o comportamento das relações ajustadas.

As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R, versão 4.6.0 (R CORE TEAM, 2026).

Resultados

A latitude dos conglomerados variou de -4,14 a -1,08°, correspondendo a um gradiente espacial norte-sul de aproximadamente 341 km, enquanto a longitude variou de -61,38 a -58,14°, representando uma extensão leste-oeste aproximada de 361 km. O teor de carbono do solo apresentou ampla variação entre os conglomerados, com valores de 2,60 a 69,80 g kg^{-1}, média de 20,68 g kg^{-1}, mediana de 19,30 g kg^{-1} e desvio padrão de 11,19 g kg^{-1}.

Os modelos de regressão linear simples ajustados não evidenciaram associação entre o teor de carbono do solo e os gradientes geográficos avaliados (Tabela 2). Para a latitude, o coeficiente angular foi negativo (-1,0598), indicando redução estimada de 1,06 g kg^{-1} no teor de carbono para cada aumento de uma unidade na latitude. Entretanto, o efeito não foi significativo pelo teste F da regressão (F = 0,45; p = 0,5026). Para a longitude, o coeficiente angular foi positivo (1,9077), indicando aumento estimado de 1,91 g kg^{-1} no teor de carbono para cada aumento de uma unidade na longitude, mas também sem significância estatística (F = 2,06; p = 0,1545).

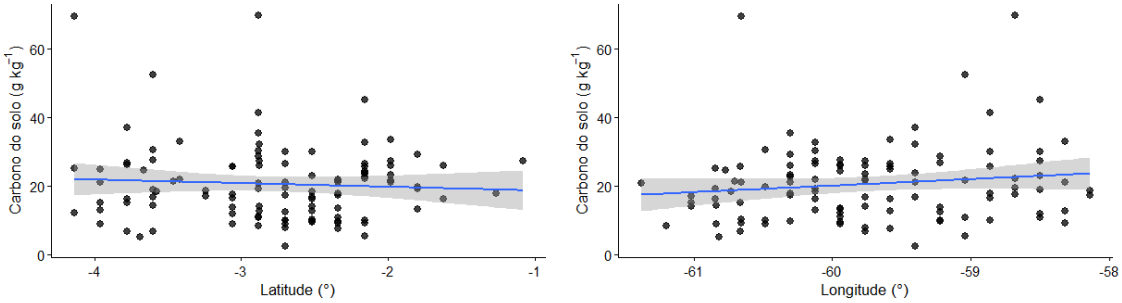
Tabela 2 - Coeficientes e qualidade de ajuste dos modelos utilizados para estimativa do teor de carbono em solos amazônicos em função de gradientes geográficos.

Variável independente	β_0	β_1	F	RQEM	AIC	R^2
Latitude	20,6833	-1,0598	$0,4526^{ns}$	11,1168	833	0,0043
Longitude	20,6833	1,9077	$2,0567^{ns}$	11,0339	831	0,0190

F = estatística do teste F da regressão; RQEM = raiz do quadrado do erro médio (g kg^{-1}); AIC = Critério de Informação de Akaike; R^2 = coeficiente de determinação; ns = não significativo pelo teste F (p > 0,05).
Fonte: os autores.

A baixa capacidade explicativa dos modelos reforçou a ausência de associação entre variáveis resposta e explicativa. A regressão com a latitude apresentou coeficiente de determinação de apenas 0,0043, enquanto aquela ajustada para a longitude apresentou R^2 de 0,0190. Esses resultados indicam que as coordenadas geográficas, quando avaliadas individualmente, explicaram menos de 2% da variação observada no teor de carbono do solo. Entre os modelos, a relação com a longitude apresentou menor RQEM e menor AIC, embora a diferença em relação ao modelo para latitude tenha sido pequena e não implique significância estatística da relação. As relações entre o teor de carbono e as coordenadas geográficas são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Relação entre o teor de carbono do solo e os gradientes de latitude e longitude nos conglomerados amostrados no estado do Amazonas.



Fonte: os autores.

Dessa forma, dentro do gradiente geográfico abrangido pelos 108 conglomerados avaliados, não foi identificada evidência estatística de relação linear entre o teor de carbono do solo e a latitude ou a longitude. Os resultados indicam que a distribuição do carbono apresentou elevada variabilidade entre os pontos amostrados, sem que essa variação pudesse ser explicada de forma satisfatória pelos gradientes geográficos considerados isoladamente.

Discussão

A ausência de associação significativa (p > 0,05) entre o teor de carbono do solo e os gradientes de latitude e longitude indica que a posição geográfica, quando considerada isoladamente, não foi suficiente para explicar a variação do carbono nos solos florestais do Amazonas. Embora os teores tenham apresentado ampla dispersão entre os 108 conglomerados amostrados, os modelos ajustados apresentaram reduzida capacidade explicativa, com R^2 de 0,0043 para latitude e 0,0190 para longitude (Tabela 2). Esse comportamento indica que a variabilidade do carbono ocorre em resposta à interação de múltiplos fatores ambientais e edáficos, cuja distribuição espacial não é adequadamente

representada apenas pelas coordenadas geográficas. Na Amazônia, diferenças nas propriedades químicas e físicas dos solos estão associadas à ampla variação dos teores de carbono, evidenciando a importância das características do solo na determinação de sua distribuição espacial (QUESADA et al., 2020).

A ausência de relação funcional com a latitude é relevante porque esse gradiente pode representar, de forma indireta, mudanças nas condições climáticas ao longo do território. Todavia, a relação entre localização geográfica e carbono do solo não é necessariamente direta, uma vez que fatores como temperatura, precipitação, sazonalidade e condições de umidade interagem com as propriedades do solo. A distribuição do carbono no solo é influenciada tanto por condições climáticas quanto por características da vegetação e do próprio solo, não sendo esperado que um único gradiente geográfico explique toda a sua variabilidade (JOBBÁGY; JACKSON, 2000; JACKSON et al., 2017).

O comportamento observado para a longitude foi semelhante ao da latitude. Apesar de o coeficiente angular ter apresentado sinal positivo, a relação não foi significativa ($p > 0,05$), indicando que o gradiente leste-oeste, isoladamente, não apresentou associação linear detectável com o teor de carbono (Figura 1). Esse resultado é compatível com a elevada heterogeneidade espacial dos solos amazônicos, na qual mudanças nas condições edáficas podem ocorrer em distâncias relativamente curtas. Estudos conduzidos na Amazônia demonstram que atributos do solo podem apresentar elevada variabilidade espacial associada à posição no relevo e às características pedológicas, mesmo em áreas relativamente próximas (NOVAES FILHO et al., 2007).

A elevada dispersão dos valores de carbono observada neste estudo reforça essa interpretação. Na bacia do rio Urucu, na Amazônia Central, Ceddia et al. (2015) encontraram variação espacial dos estoques de carbono do solo e demonstraram que informações relacionadas à topografia e às condições de drenagem contribuíram para melhorar a representação espacial desses estoques. Os autores observaram ainda menores estoques de carbono em áreas sujeitas ao encharcamento, evidenciando que condições locais de drenagem podem modificar substancialmente a distribuição do carbono mesmo dentro de uma mesma região amazônica.

Enfatiza-se que a ausência de associação linear também pode estar relacionada à escala espacial da análise. As coordenadas dos conglomerados representam a localização geográfica dos pontos amostrais, enquanto os processos responsáveis pela entrada, transformação e estabilização do carbono no solo são condicionados por fatores que operam em diferentes escalas. A distribuição espacial do carbono resulta da atuação conjunta de fatores de formação do solo, propriedades físicas e químicas, vegetação e condições ambientais, de modo que relações simples com coordenadas geográficas podem não capturar padrões locais de heterogeneidade (QUESADA et al., 2020; CEDDIA et al., 2015).

A diferença entre os coeficientes de determinação também merece destaque. A longitude apresentou R^2 de 0,0190, superior ao observado para a latitude ($R^2 = 0,0043$), mas essa diferença não representa uma relação estatisticamente mais robusta, uma vez que o modelo longitudinal também não apresentou significância pelo teste F ($p > 0,05$). É importante salientar que o menor AIC e a menor RQEM observados para a longitude devem ser interpretados como diferenças no desempenho dos ajustes, e não como evidência de uma associação mais forte entre o gradiente leste-oeste e o teor de carbono do solo.

Os resultados indicam que latitude e longitude, isoladamente, apresentam baixa capacidade para estimar o teor de carbono nos solos avaliados. No entanto, sua utilização como variáveis auxiliares pode contribuir para análises espaciais mais abrangentes. Estudos futuros podem avaliar outras escalas e abordagens de modelagem, buscando identificar padrões espaciais não detectados pelas regressões lineares simples.

Conclusão

A variação do teor de carbono nos solos dos remanescentes de floresta natural do Amazonas não é explicada pelos gradientes de latitude e longitude quando considerados isoladamente. Apesar da ampla variabilidade dos teores entre os conglomerados, os modelos apresentam baixa capacidade explicativa, indicando que a distribuição espacial do carbono não é adequadamente representada apenas pela posição geográfica. Os resultados reforçam a importância de considerar variáveis ambientais e edáficas em abordagens destinadas à caracterização e estimativa espacial do carbono do solo na Amazônia.

Referências

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.

JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423-436, 2000.

NOVAES FILHO, J. P.; COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A.; JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. S. Spatial variability of soil physical attributes used for soil mapping in small headwater catchments of the southern Amazon**. Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 91-100, 2007.

QUESADA, C. A.; PAZ, C.; OBLITAS MENDOZA, E.; PHILLIPS, O. L.; SAIZ, G.; LLOYD, J. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. **Soil**, v. 6, p. 53-88, 2020.

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