

LAUDELINO VIEIRA DA MOTA NETO

**SATURAÇÃO DE CARBONO (C), MODELAGEM E FERTILIDADE EM SOLOS TROPICAIS:
UMA ABORDAGEM NACIONAL**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências
Agrômicas, Botucatu

Supervisor: Prof. Dr. Carlos Alexandre
Costa Crusciol

Cossupervisor: Prof. Dr. Juliano Carlos
Calonego

Botucatu
2026

RESUMO: A presente proposta testará se solos brasileiros aceitam a hipótese de saturação de C. Dados da Embrapa serão usados para estimar o carbono orgânico da fração associada a minerais (COAM) mediante modelo baseado em algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest. O COAM será plotado em função do teor de silte+argila do solo. Testar essa hipótese é fundamental para estabelecer métricas quanto ao potencial de sequestro de C no perfil do solo (0-100 cm) e seu impacto sob as metas de mitigação do Brasil até 2030 para neutralidade climática junto à Organização das Nações Unidas (ONU). Além disso, a presente proposta testará a hipótese de que doses elevadas de calcário visando aumento da fertilidade em subsuperfície associadas à aplicação de gesso resultam em sistemas com balanço de C positivo, sem efeitos negativos à nutrição das plantas e grãos. Essa hipótese será testada em um experimento de longa-duração iniciado em 2002 pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu – SP, atualmente registrado na Rede Global de Experimentos de longa duração, controlado pelo Instituto Rothamsted Research, UK ([GLTEN](#)). É salutar esclarecer que a dinâmica do C nesse sistema recebendo doses de calcário em associação ou não à aplicação de gesso permanece inexplorada no presente. Não obstante, essa proposta avaliará o efeito do manejo da fertilidade do solo, com aplicação de calcário e gesso, relativo à dinâmica do C por intermédio de simulações com o modelo DayCent, aplicando dados de simulações climáticas que consideram o aumento da temperatura do planeta até o fim do século. Para tanto, dados observados no experimento de longa duração, com controle local e histórico bem definido, serão incluídos para calibração e validação das simulações.

1. ENUNCIADO DO PROBLEMA

1.1. SATURAÇÃO DE CARBONO EM SOLOS TROPICAIS: PROBLEMÁTICA NACIONAL

A hipótese de que solos atingem um limite de estabilização de carbono (C) na fração silte e argila ainda necessita ser testada para solos tropicais. O conceito de saturação de carbono é definido como a capacidade máxima de estabilização de moléculas orgânicas na superfície de partículas eletricamente carregadas, como silte e argila, por intermédio de ligações mineral-organo ou organo-organo (CASTELLANO et al., 2015; GEORGIOU et al., 2022; POSSINGER et al., 2020). Assim, um solo com teor inicial alto de C orgânico, portanto, próximo da saturação, apresenta uma taxa de sequestro de carbono menor do que um solo com teor inicial de C menor e mais distante da saturação (GEORGIOU et al., 2022; SIX et al., 2024; STEWART et al., 2009). Avaliar se solos tropicais altamente intemperizados, como os brasileiros, aceitam a hipótese de saturação de C é fundamental, pois *i*) permite atribuir limites para estabilização de C em solos com diferentes texturas; *ii*) identificar o quão distante ou próximo os solos, submetidos à diferentes usos da terra e práticas de manejo, como a calagem e correção da acidez do solo, assim como sistemas de sucessão, rotação ou integrados de culturas de grãos e plantas de cobertura, estão do estado de saturação e *iii*) quanto os solos tropicais ainda podem contribuir com o sequestro de C atmosférico e com as metas nacionais de mitigação de gases do efeito estufa, alinhado com a agenda climática do Brasil junto à Organização das Nações Unidas (ONU) (AMUNDSON; BIARDEAU, 2018; BOSSIO et al., 2020; SMITH et al., 2019; TSAI et al., 2023).

O trabalho pioneiro de HASSINKI (1997) estabeleceu uma correlação positiva entre o teor de C orgânico total do solo (TOC) em função das partículas de solo <20 µm. Assim como no trabalho de HASSINKI (1997), COTRUFO et al. (2019), usando maior número de amostras (6000 amostras de solo), embora concentrado em solos temperados da União Europeia (Lucas Dataset), identificaram saturação de C na fração COAM (<53 µm). Nesse estudo, os autores verificaram incremento de C na fração particulada (COP), mesmo com a fração COAM mostrando saturação. Ademais, ainda que a fração COAM tenha apresentado saturação, mais de 50% das amostras apresentaram teores de C na fração COAM abaixo do limite de saturação de C no solo. Essa evidência sugere que solos atingem um estado de equilíbrio relativo ao sequestro de C em áreas naturais cobertas com gramíneas, florestas e áreas cultivadas abaixo do potencial máximo atingível de C ou estabilizável na fração COAM (SIX et al., 2024; STEWART et al., 2009). Assim, SIX et al. (2024) propuseram seis diretrizes indicando como e quando testar o estado de saturação do solo e reportaram valores máximos de C na fração COAM de 82 ± 4 e 46 ± 4 g C kg⁻¹ silte+argila, respectivamente, em solos com dominância de minerais 2:1 e 1:1. Ainda que estimativas de saturação de C em escala global estejam disponíveis (GEORGIOU et al., 2022), essas abarcaram, majoritariamente, dados coletados em áreas temperadas e superficiais (<30 cm).

Uma abordagem voltada a solos brasileiros, com perfis profundos, resultante do intemperismo e pouco explorado pelas plantas devido à limitação química, notadamente, a acidez do solo (Fageria; Nascente, 2014), pode fornecer informações relevantes quanto ao potencial de sequestro de C em solos tropicais. Por um lado, solos tropicais, especialmente áreas agrícolas e pastagens degradadas, podem estar mais longe da saturação, devido às condições climáticas favoráveis para a oxidação da MOS durante 12 meses do ano nos trópicos. Mas por outro lado, os solos tropicais, podem estar mais perto da saturação porque é composto, majoritariamente, por minerais de argila (ou fração argila) com menor superfície específica e densidade de cargas se comparado a solos de clima temperado. Essa observação suporta a hipótese de que possa ocorrer saturação de C (COAM), primeiramente, em subsuperfície, antes mesmo de ocorrer em superfície, em solos com alto aporte de C via raízes, já que a atividade microbiana em profundidade é

menor que em superfície. Embora sejam pontos relevantes é preciso entender o estado atual de saturação dos solos brasileiros o que é proposto nessa proposta. Essa informação nacional inicial pode ser base para futuras hipóteses que buscam entender a dimensão que solos tropicais possuem para objetivos relativos à agenda climática nacional e internacional.

A fração da MOS denominada COAM possui menor relação C:N comparado à fração COP (Cotrufo; Lavalley, 2022). Ainda que indesejável, do ponto de vista do acúmulo de C nos solos, a mineralização da COAM pode suprir sistemas deficientes em nitrogênio (Angst et al., 2021; Francesca Cotrufo et al., 2021; Jilling et al., 2018). Contudo, ainda que supostamente mais facilmente decomponível, devido à baixa relação C:N, a fração COAM se mostra estável em diferentes ambientes (Cotrufo et al., 2015a; Jilling et al., 2020; Lugato et al., 2021; Mikutta et al., 2019; Yu et al., 2022). Pesquisas suportam a hipótese de que a interação entre moléculas orgânicas ricas em N, com a superfície eletricamente carregada dos minerais, funcione como mecanismo de estabilização de C no solo, o que é traduzido em maior tempo médio de residência desse pool (>2000 anos)(Cotrufo; Lavalley, 2022; Kögel-Knabner et al., 2008).

Tem sido reportado que a fração COAM é composta, predominantemente, por derivados microbianos (KINDLER et al., 2011; LIANG; SCHIMEL; JASTROW, 2017; LIANG; STARK; WARING, 2023). A via de decomposição *in situ* sugere que os microrganismos incorporam o C de resíduos vegetais e, após a morte celular, essas moléculas orgânicas formam interações com a fase sólida do solo. Contudo, o modelo *ex situ* advoca que, de modo concomitante, no processo de despolimerização dos resíduos vegetais, por exemplo, a oxidação de cadeias fenólicas da lignina em terpenos simples e derivados, os produtos ficariam dissolvidos na solução do solo, portanto, em filmes de água adjacentes à superfície de minerais mais tarde estabilizados em ligações mineral-organo (KINDLER et al., 2011; LIANG et al., 2017; VON LÜTZOW et al., 2007).

Dessa forma, a estabilidade e/ou resiliência à decomposição da fração COP se dá pela recalcitrância bromatológica dos resíduos vegetais aportados ao solo, normalmente representados por alta relação C:N (Cotrufo et al., 2015b; Cotrufo; Lavalley, 2022). Assim, resíduos vegetais ricos em polímeros de lignina são mais dificilmente despolimerizados pelas enzimas oxidativas dos microrganismos do solo, devido à alta energia de ativação. Isso significa que o gasto energético, em termos de adenosina trifosfato (ATP), aportado para síntese das enzimas oxidativas utilizadas para despolimerizar esse polímero pelos microrganismos é maior do que a energia gerada a partir da oxidação dos produtos da despolimerização do polímero. Desse modo, resíduos vegetais ricos em componentes recalcitrantes acabam por integrar a fração COP, permanecendo no solo por mais tempo (ANGST et al., 2023; COTRUFO et al., 2015b; LIANG; SCHIMEL; JASTROW, 2017).

Além disso, a aproximação de partículas sólidas no solo, à medida que as raízes das plantas crescem no perfil, favorece a oclusão de partículas orgânicas dentro dos agregados (Oades, 1984; Six et al., 2002). A estabilização desses agregados por intermédio da exsudação de compostos orgânicos lábeis na rizosfera de raízes vivas ou em processo de decomposição na detritosfera (Kuzakov; Blagodatskaya, 2015), associados ao não revolvimento do solo resulta em unidades agregadas com fina rede de poros que dificulta a difusão de moléculas de oxigênio e enzimas que extraem elétrons da oxidação de moléculas orgânicas (Galdos et al., 2019; Mangalassery et al., 2014).

Em última instância, essas estruturas protegem o C aportado da oxidação ou entropia, transformação energética de molécula orgânica (eletricamente carregada) para dióxido de C (oxidado), especialmente, em solos tropicais em que altas temperaturas, aeração e disponibilidade hídrica elevam a atividade enzimática e oxidação de moléculas orgânicas (Gregorich et al., 2017; Haddix et al., 2020).

Pesquisas têm reportado o papel de cátions, como o cálcio, para formação de pontes químicas entre moléculas orgânicas e minerais (Castro et al., 2015; Shabtai et al., 2023). Isso representa um mecanismo de estabilização de C em solos tropicais, especialmente os arenosos (Steinfeld et al., 2023), onde o baixo teor de argila representa uma limitação física ao estabelecimento de interações organo-mineral (Shabtai et al., 2023). A disponibilidade de cálcio, além do efeito físico-químico, pode ainda aumentar a eficiência de uso do carbono (EUC) aportado ao solo pela via *in vivo*, mediante a maior incorporação de resíduos vegetais na biomassa microbiana e na fração COAM (Cotrufo et al., 2015b; Shabtai et al., 2023). Modelos baseados em aprendizado de máquina, usados para estudar a distribuição de C na fração COAM em escala global, têm incluído variáveis climáticas e características pedogenéticas como covariáveis nas predições (COTRUFO et al., 2019; GEORGIU et al., 2022). No entanto, é necessário que o estudo da distribuição de C na fração COAM em solos tropicais considere a inclusão de atributos químicos dos solos, por exemplo, teores de cálcio e magnésio, como covariáveis nos modelos preditivos, devido à importância da química do solo na estabilização de C nos solos tropicais, o que ainda permanece inexplorado.

2. HIPÓTESE

i) solos agrícolas não aceitam saturação de C, especialmente, em subsuperfície, em que o teor de C é menor do que o observado em áreas nativas.

3. OBJETIVO

O objetivo será testar a hipótese de saturação de C em solos do Brasil, utilizando dados da plataforma Geoinfo.

4. OBJETIVO ESPECÍFICO

i) identificar o status de saturação de C no solo em escala nacional, considerando diferentes usos da terra, com enfoque para áreas agrícolas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. TESTANDO HIPÓTESE DE SATURAÇÃO DE CARBONO PARA SOLOS BRASILEIROS: DO EXPERIMENTO À ESCALA NACIONAL

As análises foram executadas em ambiente R, utilizando principalmente os pacotes *terra* (leitura, reprojeção, reamostragem e operações raster), *dplyr* e *tidyr* (organização e sumarização de dados), *readxl* (importação de planilhas), *sf* (vetores e limites de biomas) e, quando disponível, *exactextractr* (extração de valores raster por polígonos com maior fidelidade espacial). Os dados de entrada foram obtidos a partir do banco de dados da Embrapa Solos ([Geoinfo Embrapa](#)), utilizando rasters, em formato GeoTIFF (.tif), com predições em g kg^{-1} para três variáveis do solo: carbono orgânico do solo (SOC, soil organic carbon); argila (clay) and silte (silt). Cada variável foi obtida nas camadas de profundidade 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 e 100–200 cm. Para análises por bioma e visualização cartográfica, foi empregado um shapefile atualizado de biomas (polígonos) obtidos no site do IBGE (acesso: [Biomas | IBGE](#)). Adotou-se processamento sequencial por profundidade (uma profundidade por vez), mantendo os rasters em resolução original (sem agregação espacial) para evitar perda de informação e sobrecarregar memória. Em mais detalhes, para cada profundidade, realizou-se a i) seleção de arquivos, ii) harmonização de grade espacial, utilizando SOC raster como referência, assim argila e silte foram ajustados para a mesma grade mediante reprojeção quando necessário (CRS diferente), e reamostragem bilinear quando a geometria (resolução/extensão/alinhamento) não era idêntica.

Eventualmente, para cada variável foram computados, em toda a grade, número total de pixels, pixels válidos (não-NA, sem dados correspondente),

proporção válida, mínimo, máximo, média, desvio-padrão e quantis (1%, 25%, mediana, 75%, 99%). Para garantir a existência de dados em cada pixel, uma máscara booleana foi construída, definindo como válidos apenas os pixels com dados

simultâneos para SOC, argila e silte:
mask = (!is.na(SOC) & !is.na(argila) & !is.na(silte)).

Em seguida, cada raster foi mascarado para reter somente esses pixels (os demais foram convertidos para NA). Após esse procedimento, repetiu-se o mesmo conjunto de estatísticas após o mascaramento, permitindo quantificar mudanças na distribuição ao impor complete-case.

Conceptualmente, a saturação de C em solos deve ser testada plotando-se COAM (y-axis) vs teor de silte e argila somados (x-axis) (Six et al., 2024a). Para tanto, a partir dos rasters já salvos por profundidade, foi calculado (argila + silte) em g kg^{-1} . O cálculo foi realizado pixel a pixel e mascarado novamente para garantir validade simultânea das três variáveis (SOC, argila e silte), produzindo um raster adicional por profundidade e um resumo com número de pixels válidos e média de (argila+silte).

Não obstante, aproveitando-se de correlação linear entre as variáveis COAM e SOC, a partir de conjunto de dados observados em experimentos de longa duração da Fazenda Lageado e revisão bibliográfica ($n= 522$) coletada por Mota Neto et al. (2025), ajustou-se duas regressões lineares: i) modelo simples: $\text{MAOC_g_kg} \sim \text{soc_g_kg}$ e ii) modelo estendido: $\text{MAOC_g_kg} \sim \text{soc_g_kg} + \text{silt_clay_g_kg}$. Para cada modelo foram computadas métricas de ajuste e desempenho, como R^2 , RMSE e MAE, critérios AIC e BIC e uma estimativa de robustez por validação cruzada leave-one-out (LOOCV) via resíduos PRESS (usando valores de alavancagem/hat-values). Adiante, o modelo estendido foi aplicado aos rasters, por profundidade, para gerar valores preditos de carbono orgânico associado a minerais na sigla em inglês MAOC (mineral-associated organic matter; g kg^{-1}). A predição foi realizada pixel a pixel e mascarada para pixels válidos. Para cada profundidade foram registrados número de pixels válidos e estatísticas básicas (média, mínimo, máximo), além da escrita do raster predito.

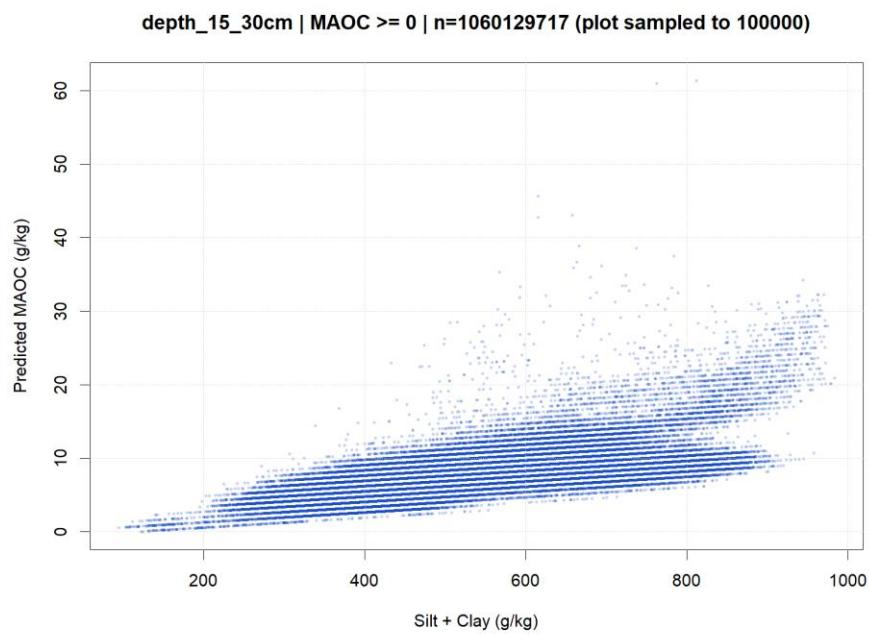
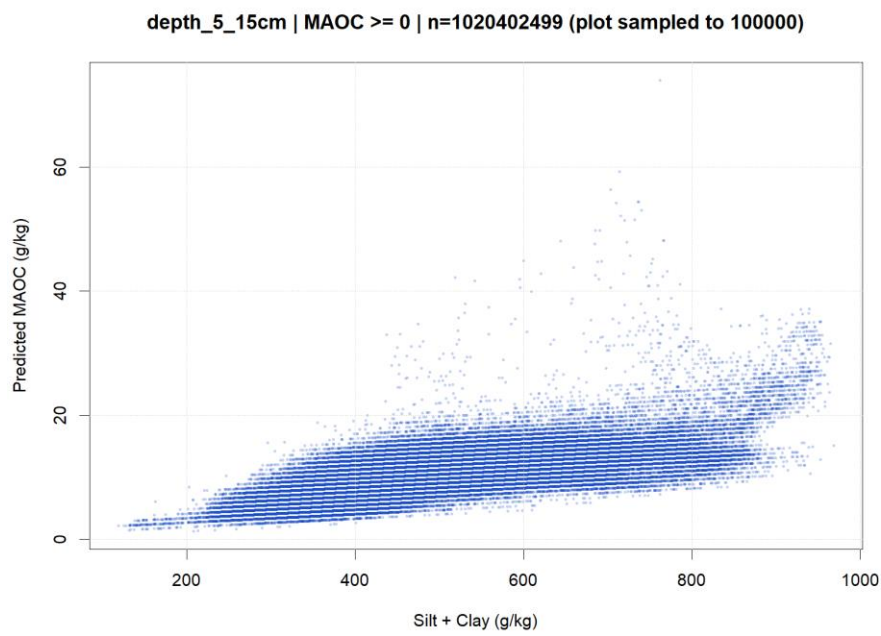
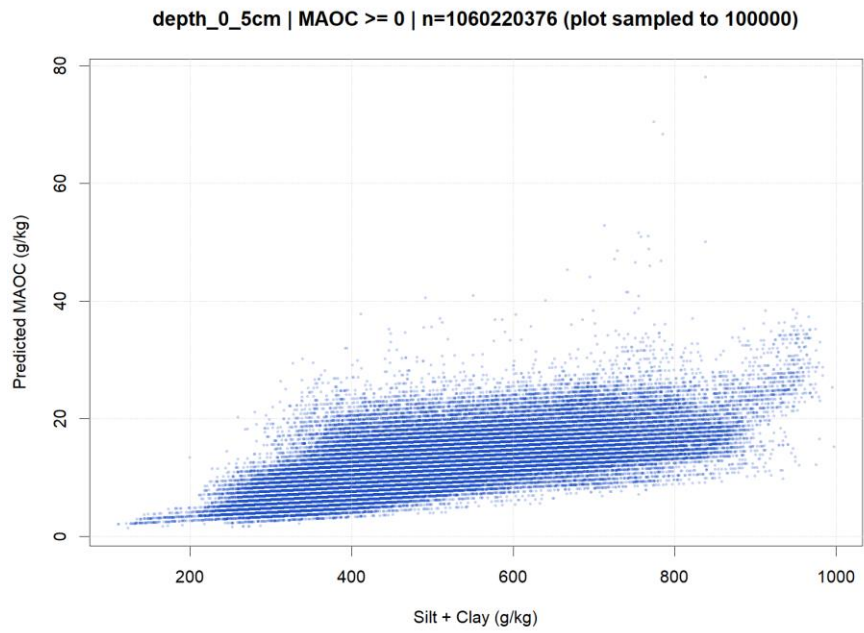
A visualização dos resultados foi realizada mediante pacote terra, a partir dos rasters por profundidade previamente salvos pelo pipeline: (i) MAOC predito (*_maoc_pred_from_extended_model.tif) e (ii) silte+argila em condição complete-case (*_clay_plus_silt_complete_case.tif). Para cada profundidade, o raster de silte+argila foi checado quanto à compatibilidade espacial com o MAOC, assegurando coincidência de Sistema de Referência de Coordenadas (CRS), resolução, extensão e alinhamento.

Devido ao grande volume de pixels, os rasters foram processados em blocos, evitando carregamento completo em memória. Em cada bloco, foram mantidos apenas pixels com valores finitos em ambas as camadas e, adicionalmente, foram excluídas predições de $\text{MAOC} < 0$ (com registro do número removido). Para os pixels retidos, foram calculadas estatísticas por profundidade: número total de células, pares finitos, valores negativos removidos, n final, mínimo, máximo, média e desvio-padrão de MAOC, além da média de silte+argila.

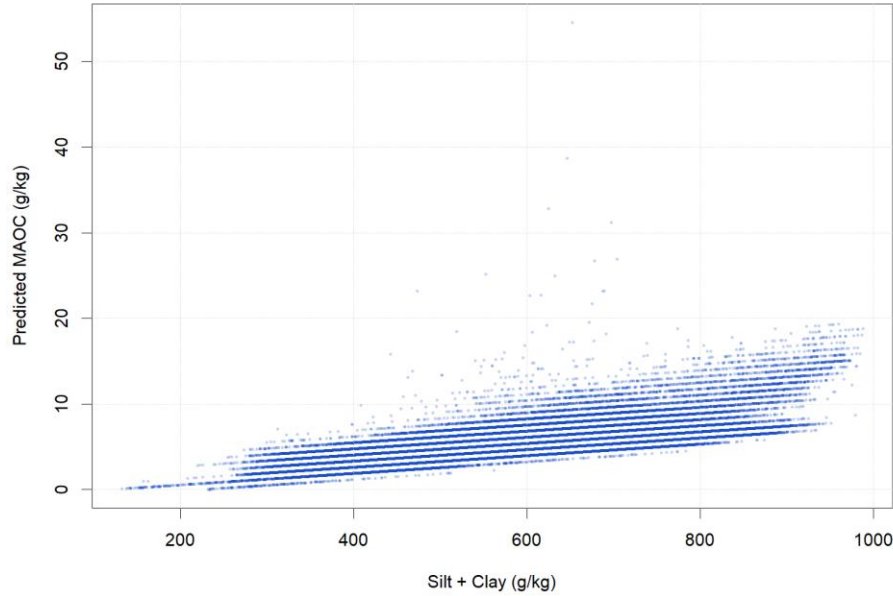
Os quantis de MAOC (25%, 50% e 75%) foram estimados por reservoir sampling com tamanho máximo controlado (até 1.000.000 valores por profundidade), garantindo estabilidade de tempo e memória. Para visualização, foram gerados gráficos de dispersão $\text{MAOC} \times (\text{silte} + \text{argila})$ por profundidade em PNG, usando um reservatório independente limitado a 100.000 pares para plotagem. Ao final, foram produzidos também um gráfico global (todas as profundidades) e estatísticas globais de MAOC; a média, mínimo, máximo e desvio-padrão globais foram acumulados ao longo da leitura em blocos, e os quantis globais foram obtidos de um reservatório (até 1.000.000).

As predições de carbono orgânico associado a minerais (MAOC, g kg⁻¹) foram processadas por profundidade a partir dos rasters complete-case. Para cada profundidade, o código identifica o raster contendo os valores preditos de MAOC correspondente, mascara valores negativos, definindo MAOC <0 como ausente. Os polígonos de biomas brasileiros foram lidos a partir do shapefile obtido no site do IBGE ([Biomas | IBGE](#)), reprojetados para o sistema de coordenadas do raster e dissolvidos por nome do bioma, de modo a representar cada bioma como uma única feição multipart. Para cada combinação bioma × profundidade, o raster de MAOC foi recortado e mascarado pelos limites do bioma. Os pixels com MAOC não ausente após a máscara são contabilizados (``n_used``), e são calculadas estatísticas descritivas da distribuição mascarada: mínimo, média, máximo e desvio-padrão. As medidas de posição incluem os quantis de 25%, mediana (50%), 75% e 95% (``q25_maoc``, ``median_maoc``, ``q75_maoc``, ``q95_maoc``). Os quantis são estimados de forma exata quando o número de células válidas é $\leq$ ``quantile_max_cells`` (padrão: 2.000.000) e, acima desse limite, por amostragem espacial regular (``terra::spatSample``), preservando viabilidade computacional e cobertura espacial. Os resultados por profundidade e um resumo agregado por bioma entre profundidades foram gravados em arquivo csv.. Mapas, em cada profundidade, com a média de MAOC por bioma como variável de preenchimento, contendo os rótulos de cada bioma foram gerados.

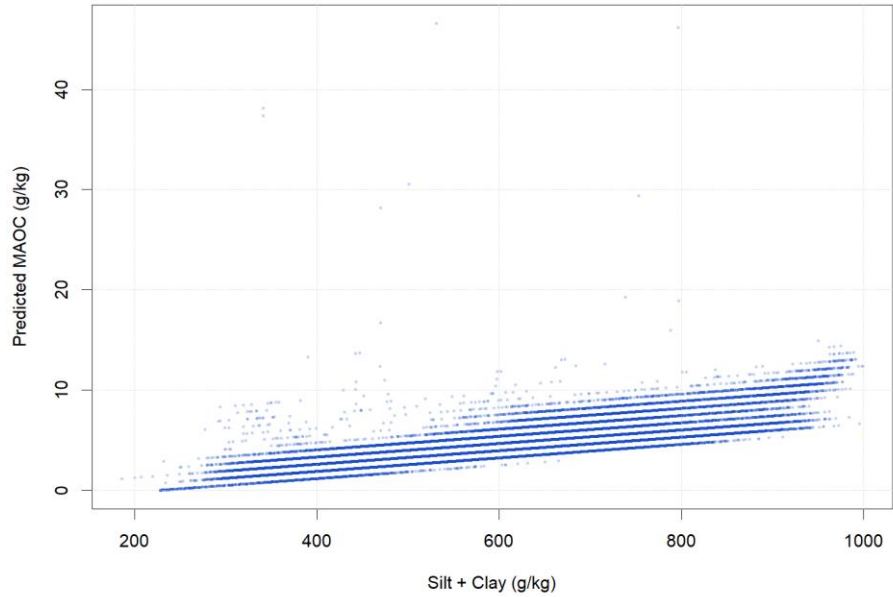
6. RESULTADOS OBTIDOS



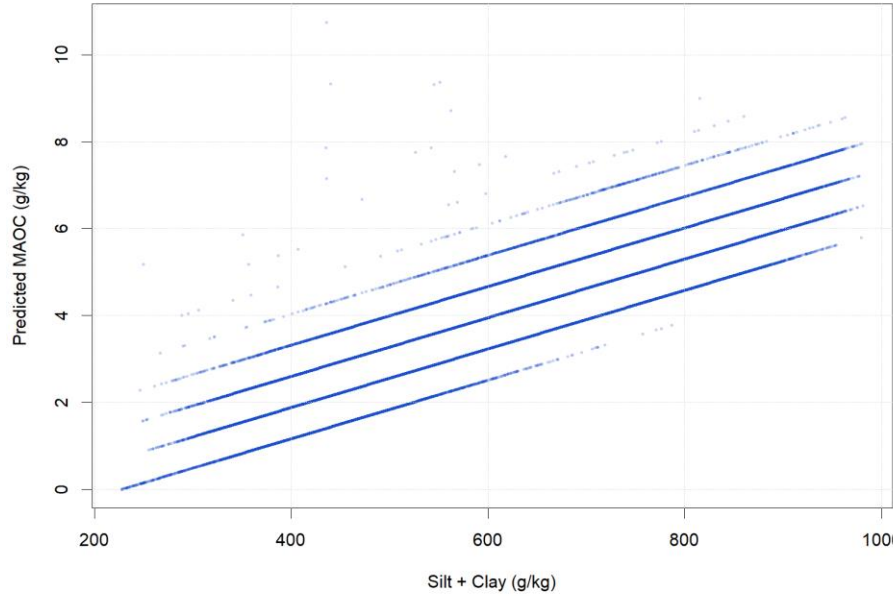
depth_30_60cm | MAOC >= 0 | n=1058846640 (plot sampled to 100000)



depth_60_100cm | MAOC >= 0 | n=1059065515 (plot sampled to 100000)



depth_100_200cm | MAOC >= 0 | n=1059065627 (plot sampled to 100000)



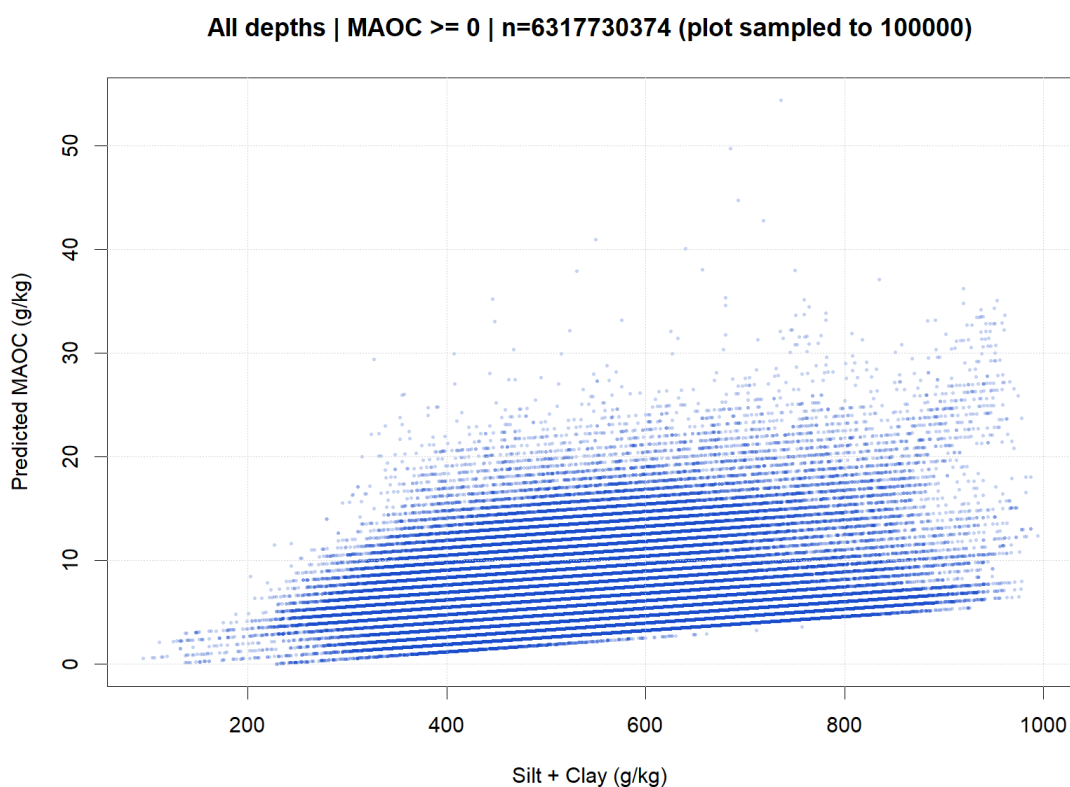


Figura 1. Relação entre carbono orgânico associado à fração mineral (MAOC) predito e o conteúdo de silte + argila ao longo do perfil do solo do Brasil. Painéis agrupados por profundidade (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 e 100–200 cm), mostrando gráficos de dispersão entre MAOC predito (g kg^{-1} ; eixo y) e silte + argila (g kg^{-1} ; eixo x). Cada ponto representa um pixel válido, considerando apenas pares com valores finitos em ambas as camadas e $\text{MAOC} \geq 0$. A visualização foi baseada em uma amostra representativa limitada a até 100.000 pixels por profundidade, preservando a estrutura da nuvem de pontos. O painel adicional “All depths” integra os pixels de todas as profundidades, permitindo avaliação conjunta do padrão textural–mineral ao longo do perfil.

Tabela 1. Estatísticas descritivas do carbono orgânico associado à fração mineral (MAOC) predito e do teor médio de silte+argila ao longo do perfil do solo (0–200 cm), com base em análise pixel a pixel em condição complete-case.

Profundidade	Número total de células	Observações finitas	Observações negativas identificadas	Observações utilizadas	Valor mínimo MAOC	Quantil 25% MAOC	Valor médio MAOC	Quantil 75% MAOC	Valor máximo MAOC	desvio padrão	Valor médio silte
depth_0_5cm	2.46E+09	1.06E+09	0	1.06E+09	0.296902	8.798786	12.09442	14.7126	136.6481	4.723293	497.7017
depth_5_15cm	2.75E+09	1.02E+09	0	1.02E+09	0.648169	7.965229	10.50152	12.74808	128.3428	3.923421	507.4689
depth_15_30cm	2.46E+09	1.06E+09	90659	1.06E+09	0.004251	6.037625	7.860746	9.22596	130.7092	3.103971	532.3932
depth_30_60cm	2.46E+09	1.06E+09	1373736	1.06E+09	0.004251	4.252785	5.538451	6.518799	102.7722	2.01102	575.9751
depth_60_100cm	2.46E+09	1.06E+09	1154861	1.06E+09	0.004251	3.33674	4.388659	5.229105	75.37321	1.591414	593.2653
depth_100_200cm	2.46E+09	1.06E+09	1154749	1.06E+09	0.004251	2.652598	3.575186	4.394058	37.86302	1.260012	586.0839

Os valores de MAOC e silte+argila estão expressos em g kg⁻¹.

Número total de células corresponde ao número total de células do raster por profundidade.

Observações finitas representa o número de pixels com valores finitos simultaneamente para MAOC e silte+argila.

Observações negativas identificadas indica o número de predições de MAOC < 0 removidas antes do cálculo das estatísticas.

Observações utilizadas corresponde ao número final de pixels considerados nas análises (MAOC ≥ 0).

Os quartis (Q25 e Q75), média, desvio-padrão (SD), valores mínimos e máximos foram calculados a partir dos pixels válidos por profundidade.

As estatísticas foram obtidas a partir de processamento em blocos de rasters de alta resolução (>2,4 × 10⁹ células por camada), com exclusão de valores não finitos e negativos.

Os resultados obtidos até o momento do presente relatório dão conta da abordagem nacional voltada ao estudo da hipótese de saturação de carbono nos solos brasileiros, a partir de dados do repositório institucional a EMBRAPA, Geoinfo. As demais atividades elencadas no resumo redigido no momento de submissão da proposta encontram-se em desenvolvimento, sem dados conclusivos e, portanto, não são apresentados no presente relatório. Os resultados das simulações com DayCent e balanço de carbono virão nos próximos relatórios, consonante ao cronograma anexado ao projeto inicialmente apresentado para apreciação.

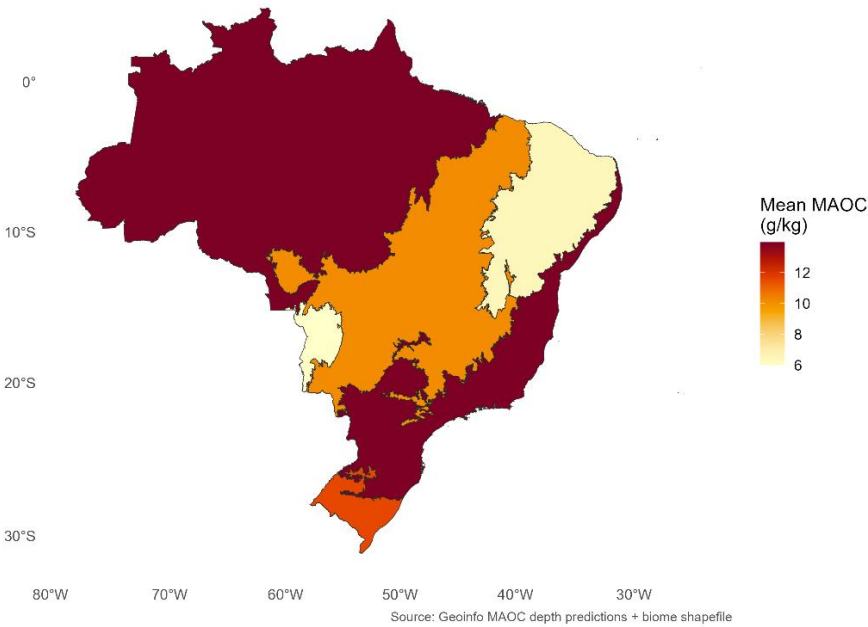
A análise pixel a pixel ($\approx 1,02-1,06 \times 10^9$ pares finitos por camada; $> 2,45 \times 10^9$ células totais) revelou que os valores preditos de MAOC reduzem de forma consistente com o aumento da profundidade. O valor médio de MAOC reduziu de $12,09 \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0–5 cm ($Q_{25}-Q_{75} = 8,80-14,71 \text{ g kg}^{-1}$) para $3,58 \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 100–200 cm ($Q_{25}-Q_{75} = 2,65-4,39 \text{ g kg}^{-1}$). Em paralelo, a variabilidade espacial diminuiu com a profundidade, com desvio-padrão reduzindo de 4,72 (0–5 cm) para $1,26 \text{ g kg}^{-1}$ (100–200 cm). Duas hipóteses plausíveis para explicar esse comportamento pode ser i) a distribuição mais homogênea de MAOC na subsuperfície e/ou ii) a menor disponibilidade de dados para predição dos valores de carbono orgânico e silte+argila para confecção dos mapas na malha de 90 m pixel, do qual os dados foram inicialmente extraídos. No entanto, uma vez que essa camada é menos acessível e susceptível à ação do manejo e mudança do uso da terra, pode-se justificar a utilização dos dados, ainda que cautela na elaboração de conclusões deva ser observada.

Apesar da redução de MAOC, observou-se aumento do teor médio de silte+argila com a profundidade (de $\sim 498 \text{ g kg}^{-1}$ na profundidade de 0–5 cm para $\sim 586-593 \text{ g kg}^{-1}$ na profundidade de 60–200 cm). Esses dados indicam que mesmo com maior potencial de estabilização mineral no subsolo, o MAOC predito permaneceu baixo, sugerindo limitação primária por aporte de C (menor entrada de resíduos e C radicular em profundidade), e não por capacidade textural, ou seja, superfície específica dos minerais, notadamente a argila. Valores negativos de MAOC foram raros e restritos às camadas mais profundas ($\approx 0,09-1,37 \times 10^6$ pixels removidos; $< 0,15\%$ dos pares finitos), sem impacto relevante sobre as estatísticas centrais.

Em conjunto, os resultados sustentam a hipótese central de que solos agrícolas tendem a não atingir saturação de C, especialmente na subsuperfície, onde o teor de C associado à fração mineral é substancialmente menor, mesmo apresentando maior teor de silte+argila e potencialmente sítios de estabilização de carbono no perfil do solo. Assim, os resultados indicam que a subsuperfície (15-200 cm) é um compartimento do solo potencial para estabilização de carbono em solos tropicais. Nesse sentido, a adoção de práticas de manejo que objetivem o aumento da fertilidade em subsuperfície pode reduzir restrições de entrada e transferência de C ao longo do perfil, aumentando a capacidade mitigatória de carbono pelos solos tropicais brasileiros.

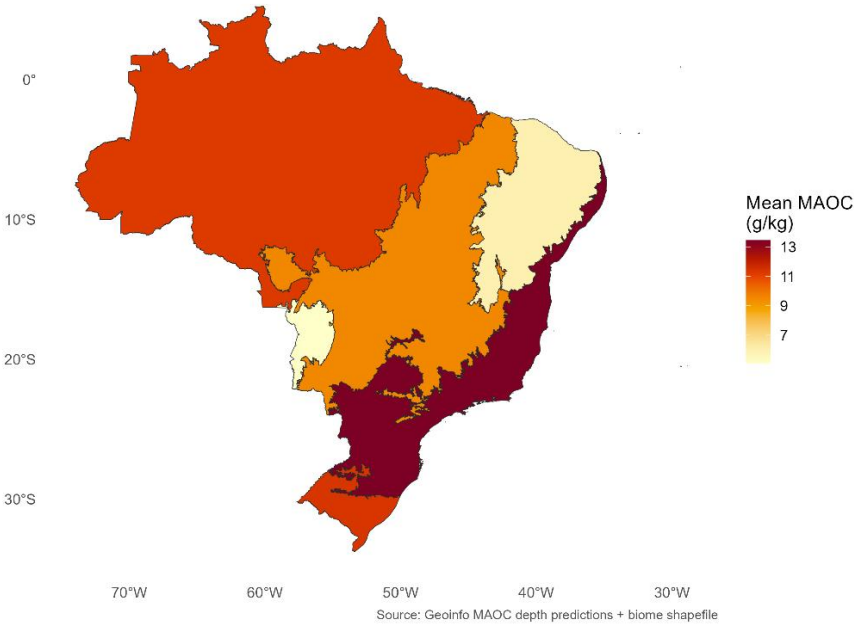
Predicted MAOC by Brazilian biome - 0_5cm

Complete-case pixels, MAOC >= 0



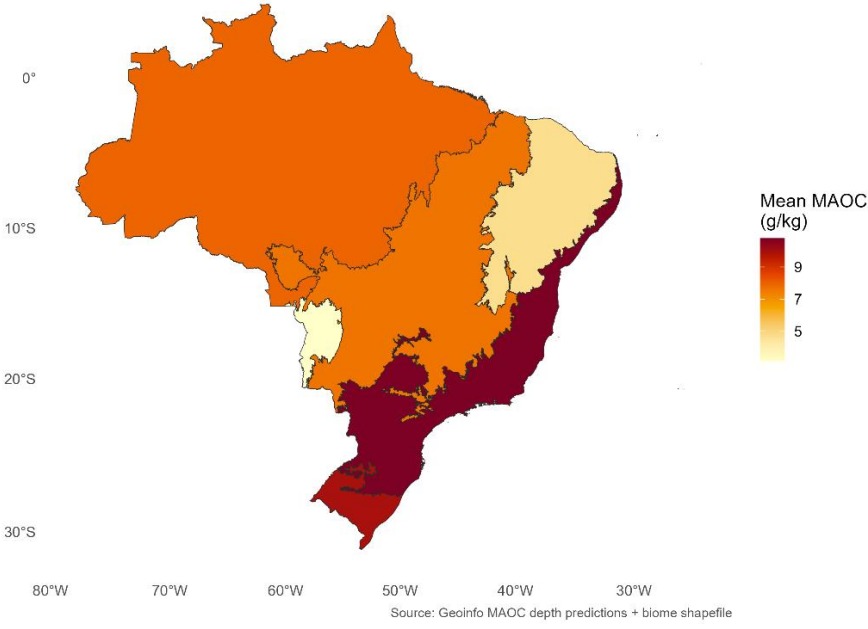
Predicted MAOC by Brazilian biome - 5_15cm

Complete-case pixels, MAOC >= 0



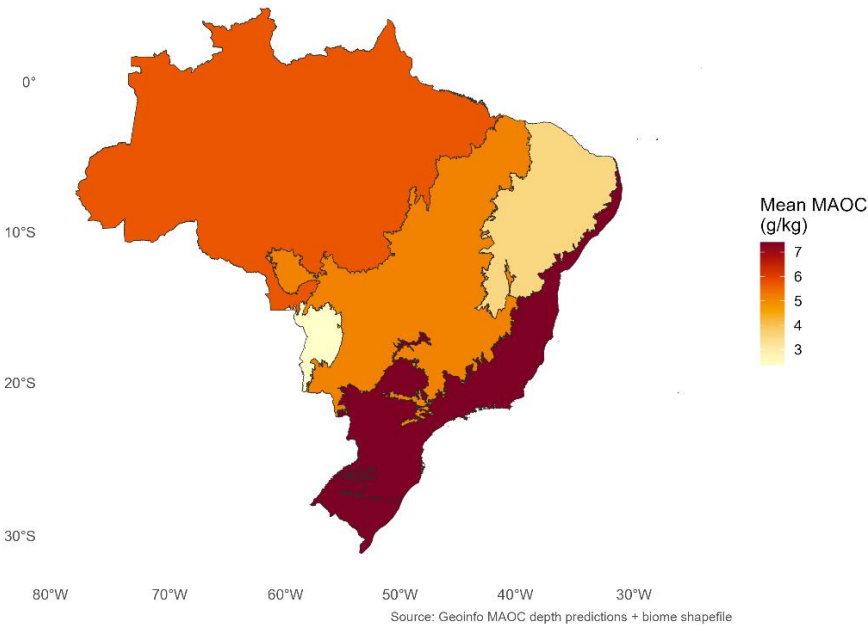
Predicted MAOC by Brazilian biome - 15_30cm

Complete-case pixels, MAOC >= 0



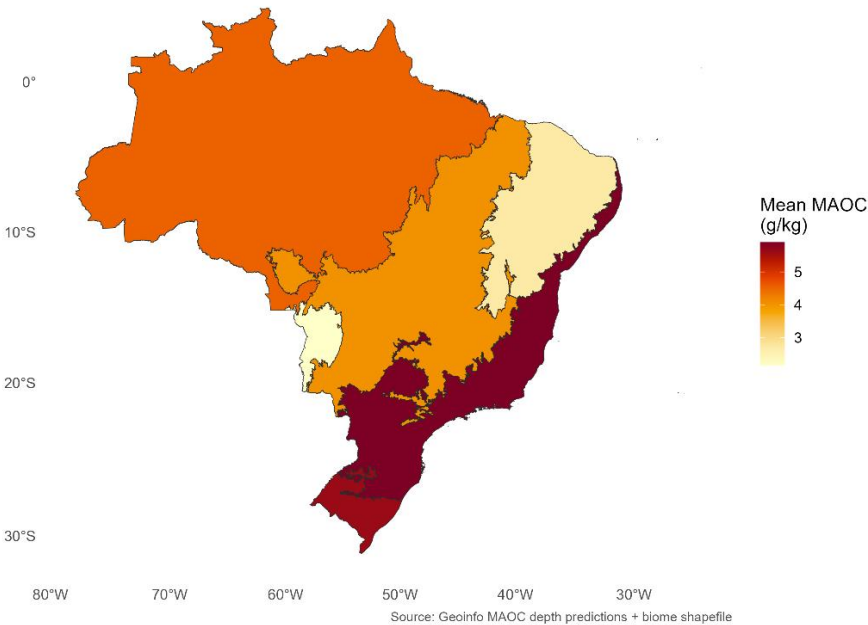
Predicted MAOC by Brazilian biome - 30_60cm

Complete-case pixels, MAOC >= 0



Predicted MAOC by Brazilian biome - 60_100cm

Complete-case pixels, MAOC >= 0



Predicted MAOC by Brazilian biome - 100_200cm

Complete-case pixels, MAOC >= 0

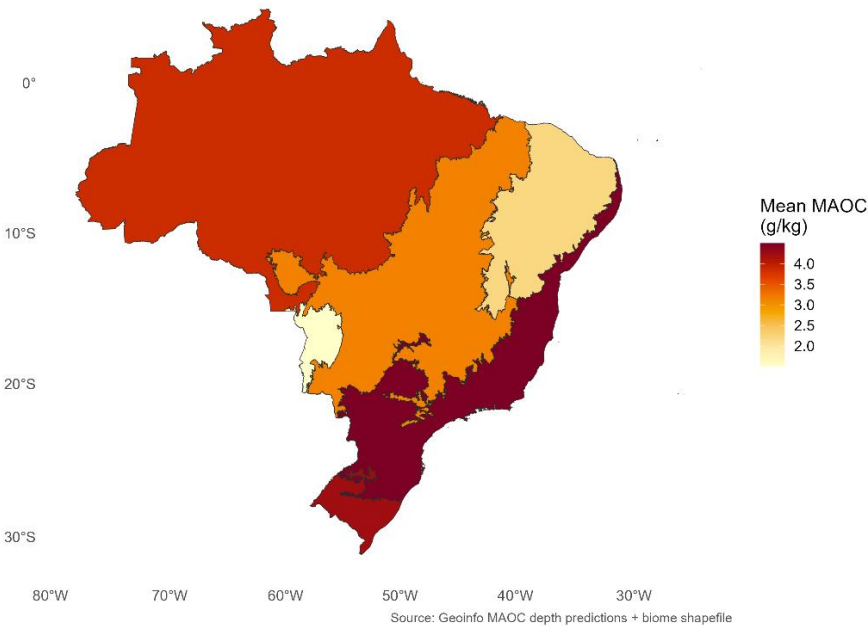


Tabela 2. Estatísticas descritivas de carbono orgânico associado à fração mineral (MAOC) estratificado por profundidade (0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 e 100-200 cm) e bioma brasileiro.

Depth (cm)	biome_name	n_used	min_maoc	q25_maoc	median_maoc	mean_maoc	q75_maoc	q95_maoc	max_maoc	sd_maoc
0-5	Amazon Rainforest	5.26E+08	1.284787	11.23355	13.35781	13.95582	16.13969	21.67986	52.91368	3.968696
	Caatinga	1.1E+08	0.296902	5.013583	6.122966	6.471694	7.630589	10.36041	34.85839	2.025835
	Cerrado	2.49E+08	0.890889	7.790651	9.644924	10.1403	12.08884	16.22263	48.28474	3.225785
	Atlantic Forest	1.35E+08	0.893296	10.06823	13.18907	13.94051	16.52878	25.18591	136.6481	5.88607
	Pampa	22481379	1.914931	9.629017	11.64529	11.55022	13.35781	15.89623	51.22862	2.783162
	Pantanal	18687200	0.792049	4.471188	5.94072	5.997946	7.363003	9.440022	19.2586	2.074074
5-15	Amazon Rainforest	4.96E+08	1.363591	9.363717	11.04081	11.25675	13.03678	15.67799	38.3997	2.593575
	Caatinga	1.02E+08	0.648169	4.457119	5.575839	5.997871	7.178159	10.02016	33.09509	2.079976
	Cerrado	2.43E+08	0.970077	7.265841	8.917528	9.523255	11.43537	15.41791	41.9931	3.090761
	Atlantic Forest	1.37E+08	1.055688	9.337208	12.583	13.44967	16.0978	24.95375	128.3428	6.065599
	Pampa	24572066	1.91282	9.704098	11.3536	11.37683	13.01032	15.59589	60.07702	2.761458
	Pantanal	18611461	0.724417	3.750242	4.97364	5.089314	6.325591	7.982981	18.79445	1.755233
15-30	Amazon Rainforest	5.26E+08	0.83014	6.772885	7.90299	7.948925	9.073121	10.56918	44.44314	1.655172
	Caatinga	1.1E+08	0.587146	3.453896	4.336191	4.694072	5.513072	8.456478	24.99257	1.836132
	Cerrado	2.49E+08	0.884139	5.816815	7.036603	7.644331	9.117963	12.64426	29.54098	2.526748
	Atlantic Forest	1.35E+08	0.317152	7.266098	9.586109	10.78579	13.11482	21.29705	130.7092	5.310237
	Pampa	22481379	0.846048	8.422729	9.883102	9.947525	11.29864	14.96668	63.54705	2.756169
	Pantanal	18596541	0.004251	1.905773	2.981406	3.137909	4.286534	5.918063	12.16068	1.656921
30-60	Amazon Rainforest	5.26E+08	0.233746	4.941269	5.697252	5.705235	6.496142	7.479685	28.13413	1.12327
	Caatinga	1.1E+08	0.334994	2.904751	3.35699	3.538694	4.077289	5.476915	22.37991	1.043251
	Cerrado	2.49E+08	0.587146	3.953384	4.752274	5.113803	6.077652	8.181668	23.53654	1.621418
	Atlantic Forest	1.35E+08	0.004251	5.211263	6.718887	7.3904	9.165212	13.91998	102.7722	3.339169
	Pampa	22481378	0.011001	6.431051	7.517776	7.402637	8.492161	10.26544	36.70158	2.008814

	Pantanal	17313626	0.004251	1.187882	2.247608	2.356433	3.518986	4.689117	11.27164	1.397546
60-100	Amazon Rainforest	5.26E+08	0.206747	3.885886	4.57437	4.541873	5.202106	6.052586	12.42393	0.936637
	Caatinga	1.1E+08	0.132498	2.078861	2.504102	2.700203	3.221993	4.324625	11.22198	0.838088
	Cerrado	2.49E+08	0.449741	3.071089	3.680983	4.031278	4.797115	6.732386	18.16465	1.372358
	Atlantic Forest	1.35E+08	0.004251	4.297626	5.569005	5.904503	7.43437	10.23603	75.37321	2.436823
	Pampa	22481376	0.038	5.035768	5.758	5.620957	6.291239	7.857203	66.85108	1.675779
	Pantanal	17532474	0.004251	1.25538	2.23845	2.154338	3.02384	3.827071	12.32268	1.10751
100-200	Amazon Rainforest	5.26E+08	0.004251	3.212836	3.921569	3.866268	4.475057	5.354944	10.493	0.90326
	Caatinga	1.1E+08	0.004251	1.684963	2.200359	2.219822	2.686347	3.626984	6.003403	0.770799
	Cerrado	2.49E+08	0.220246	2.274607	2.942842	3.146568	3.849729	5.303353	12.16262	1.161172
	Atlantic Forest	1.35E+08	0.004251	3.478487	4.355967	4.492294	5.559847	7.074221	37.86302	1.54446
	Pampa	22481379	0.267495	3.746073	4.24122	4.215455	4.754208	6.234832	10.76781	1.147291
	Pantanal	17533506	0.004251	0.93573	1.441968	1.51031	2.116953	2.861844	5.100858	0.795997

MAOC: carbono orgânico associado à fração mineral do solo.

n_used: número de observações válidas utilizadas no cálculo por estrato bioma × profundidade.

min_maoc e max_maoc: valores mínimo e máximo observados.

mean_maoc: média aritmética.

sd_maoc: desvio-padrão.

q25_maoc, q75_maoc e q95_maoc: percentis 25, 75 e 95, respectivamente.

As estatísticas são apresentadas por profundidade e bioma, permitindo comparação simultânea de tendência central e dispersão ao longo do perfil do solo.

A análise do MAOC por profundidade e bioma no Brasil evidencia um padrão decrescente dos valores médios da camada superficial (0-5 cm) até o subsolo (100-200 cm) em todos os biomas avaliados (Tabela 2). O número amostral elevado em todos biomas (n_{used} da ordem de 10^7 a 10^8) mostram que as diferenças observadas entre profundidades e biomas são diferenças de magnitude e não flutuações aleatórias. Na camada 0-5 cm, os maiores valores de MAOC foram observados na floresta Amazônica (13,96) e na Mata Atlântica (13,94), seguidos por Pampa (11,55) e Cerrado (10,14), enquanto Caatinga (6,47) e Pantanal (6,00) apresentaram os menores valores. Essa lógica foi alterada na profundidade 100-200 cm, com Mata Atlântica (4,49) e Pampa (4,22) mantendo valores de MAOC maiores do que Amazônia (3,87), Cerrado (3,15), Caatinga (2,22) e Pantanal (1,51). Em termos relativos, a redução entre 0-5 cm e 100-200 cm foi de 72,3% na Amazônia, 65,7% na Caatinga, 69,0% no Cerrado, 67,8% na Mata Atlântica, 63,5% no Pampa e 74,8% no Pantanal, confirmando redução do MAOC com a profundidade, provavelmente em função dos maiores aportes de resíduos vegetais nas camadas superficiais, assim como maior atividade microbiana, que promovem a transformação dos resíduos vegetais a moléculas menores passíveis de estabilização junto à superfície dos minerais de argila e silte (Cotrufo; Lavelle, 2022; Georgiou et al., 2025).

A comparação entre biomas também sugere controle eco-hidrológico importante. Biomas florestais úmidos (Amazônia e Mata Atlântica) apresentaram maiores valores de MAOC coerente com maior aporte de resíduos vegetais e condições hídricas mais favoráveis à formação e à estabilização de carbono na fração MAOC. Em contraste, Caatinga e Pantanal resultaram em menores valores, o que, possivelmente, deve-se i) a limitação hídrica sazonal que restringe a produtividade e os aportes de carbono na Caatinga e ii) a sazonalidade de inundação e a variabilidade deposicional no Pantanal. Assim, essas evidências, juntamente aos cenários de mudança climática, que predizem maior frequência de eventos de ondas de calor, veranicos e menor precipitação no território brasileiro (Alves et al., 2024), podem potencializar mudanças na dinâmica da matéria orgânica nesses ecossistemas; uma lacuna aberta para ser explorada. Não obstante, a heterogeneidade espacial entre biomas encontrou respaldo nos desvios-padrões computados. Por exemplo, o MAOC dentro da Mata Atlântica apresentou os maiores desvios-padrão ao longo do perfil (por exemplo, 5,89 em 0-5 cm e 1,54 em 100-200 cm) e máximos elevados (136,65 em 0-5 cm; 102,77 em 30-60 cm; 75,37 em 60-100 cm), o que sugere haver alta capacidade de estabilização de MAOC nesse bioma. O Pampa mostrou comportamento semelhante, com máximos em subsuperfície acima da média (66,85 em 60-100 cm). Com relação ao Pantanal, este apresentou quantis superiores menores (q95 de 9,44 em 0-5 cm e 2,86 em 100-200 cm), sugerindo baixo potencial de armazenamento de MAOC na maior parte das observações.

Desse modo, os resultados indicam que o teor de MAOC superficial é mais elevada e relevante nos biomas Amazônia e Mata Atlântica, enquanto Pantanal e Caatinga apresentam os menores teores de MAOC, sobretudo nos primeiros 30 cm. Nossos resultados demonstram que para inventários e modelagem de carbono do solo, a estratificação por bioma e profundidade é indispensável, uma vez que Mata Atlântica e Pampa mantêm contribuição proporcionalmente maior em subsuperfície se comparados a Caatinga e Pantanal.

7. CONCLUSÃO

Os resultados confirmam que os solos brasileiros não atingem saturação de carbono, especialmente em subsuperfície, onde o MAOC é baixo apesar do maior teor de silte+argila. A limitação ao acúmulo de C deve-se, provavelmente, ao baixo aporte de resíduos em profundidade, não à capacidade textural. Biomas florestais úmidos (Amazônia, Mata Atlântica) apresentam maior MAOC, enquanto Caatinga e Pantanal exibem os menores teores. Os dados indicam potencial para sequestro de C por meio de práticas de manejo que aumentem a transferência de C no perfil. As próximas etapas devem regionalizar os resultados de acordo com mapas de uso do solo, evitando áreas urbanas.

8. BIBLIOGRAFIA

ALVES, Lincoln Muniz *et al.* Projected changes in the frequency of compound hot and dry events over Tropical Brazil in CORDEX-CORE simulations. *Climate Dynamics*, v. 62, n. 11, p. 10203–10216, 1 nov. 2024.

AMUNDSON, Ronald; BIARDEAU, Léopold. Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 115, n. 46, p. 11652–11656, 13 nov. 2018.

ANGST, Gerrit *et al.* Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* Elsevier Ltd, , 1 maio 2021.

ANGST, Gerrit *et al.* Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 1 dez. 2023.

BOSSIO, D. A. *et al.* The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 5, p. 391–398, 1 maio 2020.

CASTELLANO, Michael J. *et al.* Integrating plant litter quality , soil organic matter stabilization , and the carbon saturation concept. p. 3200–3209, 2015.

CASTRO, Gustavo S. A. *et al.* Management Impacts on Soil Organic Matter of Tropical Soils. *Vadose Zone Journal*, v. 14, n. 1, p. vzj2014.07.0093, jan. 2015.

COTRUFO, M. Francesca *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, v. 12, pages9, p. 989–994, 2015a.

COTRUFO, M. Francesca *et al.* Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, v. 8, n. 10, p. 776–779, 2015b.

COTRUFO, M. Francesca *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, v. 12, n. 12, p. 989–994, 2019a.

COTRUFO, M. Francesca *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, v. 12, n. 12, p. 989–994, 1 dez. 2019b.

COTRUFO, M. Francesca; LAVALLEE, Jocelyn M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *In: Advances in Agronomy. [S.l.]: Academic Press Inc., 2022. v. 172 p. 1–66.*

FAGERIA, Nanda K.; NASCENTE, Adriano S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *In: Advances in Agronomy. [S.l.]: Academic Press Inc., 2014. v. 128 p. 221–275.*

FRANCESCA COTRUFO, M. *et al.* In-N-Out: A hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling. *Global Change Biology* John Wiley and Sons Inc, , 1 out. 2021.

GALDOS, M. V. *et al.* Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. *Geoderma*, v. 337, n. November 2018, p. 1126–1135, 2019.

GEORGIU, Katerina *et al.* Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022a.

GEORGIU, Katerina *et al.* Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022b.

GEORGIU, Katerina *et al.* Soil Carbon Saturation: What Do We Really Know? *Global Change Biology*, v. 31, n. 5, 9 maio 2025.

GREGORICH, Edward G. *et al.* Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. *Global Change Biology*, v. 23, n. 4, p. 1725–1734, 2017.

HADDIX, Michelle L. *et al.* Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, v. 363, n. January, p. 114160, 2020.

JILLING, Andrea *et al.* Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes. *Biogeochemistry*, v. 139, n. 2, p. 103–122, 1 jul. 2018.

JILLING, Andrea *et al.* Rapid and distinct responses of particulate and mineral-associated organic nitrogen to conservation tillage and cover crops. *Geoderma*, v. 359, n. November 2019, p. 114001, 2020.

KINDLER, R. *et al.* Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance. *Global Change Biology*, v. 17, p. 1167–1185, 2011.

KÖGEL-KNABNER, Ingrid *et al.* Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 171, n. 1, p. 61–82, fev. 2008.

KUZYAKOV, Yakov; BLAGODATSKAYA, Evgenia. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 83, p. 184–199, 2015.

LIANG, Chao;; SCHIMEL, Joshua P. .; JASTROW, Julie D. . The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*Nature Publishing Group, , 25 jul. 2017a.

LIANG, Chao; SCHIMEL, Joshua P.; JASTROW, Julie D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*Nature Publishing Group, , 25 jul. 2017b.

LIANG, Guopeng; STARK, John; WARING, Bonnie Grace. Mineral reactivity determines root effects on soil organic carbon. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 1 dez. 2023.

LUGATO, Emanuele *et al.* Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nature Geoscience*, v. 14, n. 5, p. 295–300, 2021.

MANGALASSERY, Shamsudheen *et al.* To what extent can zero tillage lead to a reduction in greenhouse gas emissions from temperate soils? *Scientific Reports*, v. 4, p. 1–8, 2014.

MIKUTTA, Robert *et al.* Microbial and abiotic controls on mineral-associated organic matter in soil profiles along an ecosystem gradient. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

MOTA NETO, Laudelino Vieira da *et al.* Soil fertility matters! A new conceptual model for carbon stewardship in neotropical croplands taking climate-smart agricultural practices into account. *Science of the Total Environment*, v. 978, 25 maio 2025.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, v. 76, p. 319–337, 1984.

POSSINGER, Angela R. *et al.* Organo–organic and organo–mineral interfaces in soil at the nanometer scale. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, 1 dez. 2020.

SHABTAI, Itamar A. *et al.* Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 1 dez. 2023.

SIX, J. *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils *Plant and Soil*. [*S.l.*: *S.n.*].

SIX, Johan *et al.* The six rights of how and when to test for soil C saturation. *SOIL*, v. 10, n. 1, p. 275–279, 15 abr. 2024a.

SIX, Johan *et al.* The six rights of how and when to test for soil C saturation. *SOIL*, v. 10, n. 1, p. 275–279, 15 abr. 2024b.

SMITH, Pete *et al.* Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 7, p. 40, 2019.

STEINFELD, Jonas P. *et al.* Increasing complexity of agroforestry systems benefits nutrient cycling and mineral-associated organic carbon storage, in south-eastern Brazil. *Geoderma*, v. 440, 1 dez. 2023.

STEWART, Catherine E. *et al.* Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 41, n. 2, p. 357–366, 2009.

TSAI, David *et al.* Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. *[S.l.: S.n.]*.

VON LÜTZOW, Margit *et al.* SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 39, n. 9, p. 2183–2207, set. 2007.

YU, Wenjuan *et al.* Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biology and Biochemistry*, v. 172, 1 set. 2022.