

CARBONO EDÁFICO: O ELO PARA O EQUILÍBRIO CLIMÁTICO E A SEGURANÇA ALIMENTAR

EDAPHIC CARBON: THE NEXUS TO CLIMATE STABILITY AND FOOD SECURITY

CARBONO EDÁFICO: EL XEXO PARA EL EQUILIBRIO CLIMÁTICO Y LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n6-146>

Data de submissão: 13/05/2025

Data de publicação: 13/06/2025

Anna Hoffmann Oliveira
Prof^a. Dr^a.

Doutora Ciéncia do Solo
Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciéncias Agrárias (CCA-UFSCar)
E-mail: annahoffmann@ufscar.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5479-8359>

Gustavo Klinke Neto

Doutorando em Geografia
Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Geociéncias
E-mail: gus.klinke@@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5876-7138>

Manoela Hoffmann Oliveira

Doutora em Ciéncias Sociais.
Universidade de São Paulo, USP, Brasil.
E-mail: manoela.hoffmann@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-6751>

RESUMO

O presente trabalho aborda a críteca alteração do ciclo global do carbono, um pilar da homeostase planetária, intensificada pelas atividades humanas desde a era industrial. Nesse contexto, a pedosfera desponta como um reservatório de carbono de singular magnitude, cuja saúde é vital para a fertilidade do solo, a resiliéncia dos ecossistemas, a segurança alimentar e a modulação climática global. A capacidade do solo de sequestrar carbono atmosférico representa, assim, uma via promissora para a mitigação das mudanças climáticas. O objetivo principal é investigar as interações multifacetadas entre o carbono do solo, as mudanças climáticas e as atividades humanas, buscando, através da análise de literatura científica recente publicada em fontes conceituadas, identificar ações que promovam a resiliéncia dos agroecossistemas e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. As principais considerações indicam que, embora o solo seja um vasto reservatório de carbono orgânico (COS) e inorgânico (CIS), práticas insustentáveis como desmatamento, aração intensiva e manejo inadequado o convertem de sumidouro em fonte de emissões. Projeções climáticas apontam para a exacerbção dessas pressões. Contudo, a adoção de práticas como agricultura conservacionista, sistemas agroflorestais, uso de biochar e restauração de ecossistemas degradados pode significativamente aumentar o COS, melhorar a saúde edáfica e reduzir emissões. Iniciativas globais como RECSOIL e nacionais como o Plano ABC+ exemplificam esforços para reverter essa tendência e promover uma

gestão do solo climaticamente inteligente e regenerativa, embora persistam desafios na quantificação, monitoramento e superação de barreiras socioeconômicas.

Palavras-chave: Pedosfera. Aquecimento Global. Agroecossistemas. Matéria Orgânica do Solo.

ABSTRACT

This study addresses the critical alteration of the global carbon cycle, a cornerstone of planetary homeostasis, intensified by anthropogenic activities since the Industrial Revolution. Within this context, the pedosphere emerges as a carbon reservoir of significant magnitude, its integrity being crucial for soil fertility, ecosystem resilience, food security, and global climate regulation. Consequently, the soil's capacity to sequester atmospheric carbon represents a promising avenue for climate change mitigation. The primary objective is to investigate the multifaceted interactions among soil carbon, climate change, and human activities. This is achieved through an analysis of recent scientific literature from peer-reviewed sources, aiming to identify strategies that enhance agroecosystem resilience and mitigate greenhouse gas emissions. Principal findings indicate that, while the soil constitutes a vast reservoir of both soil organic carbon (SOC) and soil inorganic carbon (SIC), unsustainable practices—including deforestation, intensive tillage, and improper management—convert it from a carbon sink to an emission source. Climate projections suggest an exacerbation of these pressures. Nevertheless, the adoption of practices such as conservation agriculture, agroforestry systems, biochar application, and the restoration of degraded ecosystems can significantly augment SOC, improve edaphic health, and reduce emissions. Global initiatives, such as RECSOIL, and national policies, like Brazil's ABC+ Plan, exemplify efforts to reverse this trend and promote climate-smart, regenerative soil management. However, challenges persist in quantification, monitoring, and overcoming socioeconomic barriers to widespread implementation.

Keywords: Pedosphere. Global Warming. Agroecosystems. Soil Organic Matter.

RESUMEN

Este estudio aborda la alteración crítica del ciclo global del carbono, un pilar de la homeostasis planetaria, intensificada por las actividades antropogénicas desde la Revolución Industrial. En este contexto, la pedosfera emerge como un reservorio de carbono de magnitud singular, cuya integridad es crucial para la fertilidad del suelo, la resiliencia de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y la modulación climática global. Por consiguiente, la capacidad del suelo para secuestrar carbono atmosférico representa una vía prometedora para la mitigación del cambio climático. El objetivo principal es investigar las interacciones multifacéticas entre el carbono del suelo, el cambio climático y las actividades humanas, mediante el análisis de la literatura científica reciente publicada en fuentes revisadas por pares, con el fin de identificar acciones que promuevan la resiliencia de los agroecosistemas y la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los principales hallazgos indican que, si bien el suelo constituye un vasto reservorio tanto de carbono orgánico del suelo (COS) como de carbono inorgánico del suelo (CIS), prácticas insostenibles como la deforestación, la labranza intensiva y el manejo inadecuado lo convierten de sumidero en fuente de emisiones. Las proyecciones climáticas apuntan a una exacerbación de estas presiones. No obstante, la adopción de prácticas como la agricultura de conservación, los sistemas agroforestales, el uso de biochar y la restauración de ecosistemas degradados puede aumentar significativamente el COS, mejorar la salud edáfica y reducir las emisiones. Iniciativas globales como RECSOIL y nacionales como el Plan ABC+ ejemplifican los esfuerzos para revertir esta tendencia y promover una gestión del suelo climáticamente inteligente y regenerativa, aunque persisten desafíos en la cuantificación, el monitoreo y la superación de barreras socioeconómicas.

Palabras clave: Pedosfera. Calentamiento Global. Agroecosistemas. Materia Orgánica del Suelo.

1 INTRODUÇÃO

O ciclo global do carbono, um pilar fundamental da homeostase planetária, encontra-se profundamente alterado pela intensificação das atividades humanas, particularmente desde o advento da era industrial. A crescente concentração atmosférica de dióxido de carbono, principal motor do aquecimento global, é uma consequência direta da queima de combustíveis fósseis e, de forma igualmente significativa, das transformações no uso da terra (IPCC, 2023). A conversão de ecossistemas naturais para fins agropecuários e a adoção de práticas de manejo insustentáveis têm historicamente liberado vastas quantidades de carbono previamente estocado, perturbando equilíbrios biogeoquímicos milenares e comprometendo a capacidade do sistema terrestre de regular sua própria temperatura (LAL, 2023). Este cenário impõe uma reavaliação urgente do papel dos diferentes compartimentos terrestres no ciclo do carbono, com ênfase em sua dinâmica sob a pressão das mudanças climáticas.

Sob tal perspectiva, a pedosfera desponta como um reservatório de carbono de magnitude singular, superando consideravelmente os estoques presentes na biomassa vegetal e na própria atmosfera. O carbono orgânico do solo (COS) não apenas sustenta a fertilidade e a resiliência dos ecossistemas terrestres, influenciando diretamente a produtividade agrícola e a segurança alimentar, mas também desempenha um papel central na modulação do clima global. Assim, a capacidade do solo de sequestrar e estabilizar carbono atmosférico representa uma via promissora para a mitigação das mudanças climáticas. Contudo, esta função vital está intrinsecamente ligada à integridade do solo, que por sua vez é fortemente influenciada pelas práticas de manejo adotadas e pelas condições ambientais vigentes, tornando imperativo o aprofundamento do conhecimento sobre sua dinâmica (OLIVEIRA et al., 2023).

A degradação dos solos, impulsionada por desmatamento, práticas de aração intensiva e manejo inadequado de nutrientes, acelera a mineralização da matéria orgânica, convertendo o solo de sumidouro em fonte líquida de gases de efeito estufa (SHAO et al., 2023). Este processo não só contribui para o aquecimento global, mas também compromete a qualidade do solo, reduzindo sua capacidade de retenção de água, ciclagem de nutrientes e suporte à biodiversidade (AZEVEDO et al., 2024). As consequências se estendem para além da esfera climática, afetando a sustentabilidade dos sistemas produtivos e a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, evidenciando a interconexão entre a saúde do solo, a segurança alimentar e a estabilidade climática (SHEN; TENG, 2023).

As projeções climáticas para o século XXI apontam para uma exacerbação das pressões sobre os estoques de COS (NAZIR et al., 2024; SHAO et al., 2023). Diante da complexidade e da urgência do tema, este trabalho objetiva abordar as interações multifacetadas entre o carbono do solo, as

mudanças climáticas e as atividades humanas. Busca-se ainda, através da análise da literatura científica recente, investigar ações que promovam a resiliência dos agroecossistemas e a mitigação das emissões.

2 O EQUILÍBRIO GLOBAL DO CARBONO

O equilíbrio do ciclo do carbono é dinâmico, mantido quando as taxas de sequestro de carbono pelos ecossistemas terrestres se igualam às taxas de emissão, mas é sensível a perturbações. O deslocamento do carbono de um reservatório, impulsionado por qualquer mudança no ciclo, acarreta mais carbono nos outros reservatórios. Dessa forma, eventos que provocam maior emissão de gases de carbono na atmosfera resultam em temperaturas mais altas na Terra.

O fluxo cíclico de carbono entre os reservatórios do sistema terrestre possui componentes lentos e rápidos. No ciclo lento, o carbono leva entre 100 e 200 milhões de anos para se mover entre rochas, solo, oceano e atmosfera. No ciclo rápido, cerca de 10^{15} a 10^{17} gramas (1 a 100 Gt; 1 Gt = 10^{15} g) de carbono se movimentam todos os anos através das formas de vida na Terra, ou biosfera (RIEBEEK, 2011). Por conter a maior parte do carbono circundante do planeta, a quantidade de carbono da biosfera é de grande importância, mesmo sendo um pequeno reservatório (cerca de 2000 Gt) quando comparado ao que é encontrado na litosfera (superior a 75.000 Gt), nos oceanos (38.400 Gt) e nos fósseis (4.130 Gt) (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Processos biológicos fundamentais, como a fotossíntese e a respiração estimulam o ciclo do carbono terrestre (SHAO et al., 2023). Antes de atingir os sedimentos oceânicos, onde acumula nas camadas mais profundas, principalmente em formas inorgânicas, o carbono circula pelos componentes da biosfera. As plantas removem dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera, incorporando-o em sua biomassa. Parte desse carbono é transferida ao solo através da deposição de serapilheira, exsudatos radiculares e decomposição de resíduos vegetais, formando a matéria orgânica do solo (MOS), um vasto reservatório de carbono (LAL, 2023). A respiração do solo, realizada por microrganismos e raízes, devolve CO₂ para a atmosfera (CHAPLOT; SMITH, 2023).

Gases como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) são componentes da atmosfera capazes de absorver e emitir radiação em comprimentos de onda específicos do espectro infravermelho. Essa radiação é em parte refletida pela superfície terrestre, pela atmosfera e pelas nuvens e em parte retida. Os gases atmosféricos retêm uma parcela significativa dessa radiação, devolvendo parte ao espaço e resultando em um efeito líquido de aprisionamento de energia. Esse fenômeno, denominado efeito estufa, tende a aumentar a temperatura da superfície do planeta. Sem os gases de efeito estufa (GEE), a Terra teria uma temperatura média cerca de 33°C mais baixa do que a atual, provavelmente congelada

(CERRI et al., 2023). O ciclo do carbono é, portanto, um processo fundamental para a regulação climática do planeta, possibilitando condições favoráveis para a evolução da vida.

Globalmente, os solos representam o maior reservatório de carbono terrestre, armazenando entre 1500 e 2400 Gt de carbono no primeiro metro, significativamente mais do que o carbono contido na vegetação e na atmosfera combinadas (PARAMESHA et al., 2025). Este reservatório terrestre contém aproximadamente três vezes mais carbono que a atmosfera e quatro vezes mais que a vegetação (OLIVEIRA et al., 2023; TONUCCI et al., 2023). A atmosfera, embora seja um reservatório menor em termos de estoque total, é significativa devido ao impacto direto das concentrações de GEE no clima global (NAZIR et al., 2024). Por outro lado, o solo, um reservatório considerável de carbono e decisivo para o equilíbrio climático, possui seus estoques sob contínua ameaça (AZEVEDO et al., 2024).

2.1 CARBONO DO SOLO

O carbono do solo é reconhecido como indispensável ao funcionamento e manutenção de sua sustentabilidade para a produção de alimentos, além de atuar como um grande sumidouro de carbono que pode mitigar as mudanças climáticas (SHARIFIFAR et al., 2023). A capacidade do solo em sequestrar carbono é influenciada pelo tipo de solo, clima, manejo e vegetação (YEASMIN et al., 2023). O balanço entre entrada (resíduos, exsudatos) e saída (respiração, erosão) de carbono determina se o solo é fonte ou sumidouro.

No solo, o carbono existe em diferentes compartimentos, com distintas taxas de ciclagem e estabilidade, distinguindo-se o carbono inorgânico do solo (CIS) e o carbono orgânico do solo (COS) (LAL, 2023). A quantidade de estoques de CIS e COS até 2 m de solo é comparável (Zamanian et al., 2021). Estimativas apontam entre 700 a mais de 1.000 Gt de CIS (BATJES, 2014) e aproximadamente 1550 Gt referente ao COS (SIDDIQUE et al., 2024; GONÇALVES et al., 2025). Estes montantes superam a atmosfera (~760 GtC) e a biomassa terrestre (~560 GtC) (FU et al., 2023; ZHUANG et al., 2023).

O COS é um complexo heterogêneo derivado da decomposição de resíduos orgânicos e atividade microbiana, subdividido em frações lábeis (ativas, ex: carbono orgânico dissolvido, biomassa microbiana), particuladas (intermediárias, MOS particulada) e passivas (estáveis, protegidas, MOS associada aos minerais) (LAL, 2023; YEASMIN et al., 2023). O CIS é composto principalmente por carbonatos, subdividido em carbonatos litogênicos, referentes aos carbonatos herdados de materiais de origem calcária; carbonatos biogênicos, formados em animais e plantas terrestres como parte de seu esqueleto; e carbonatos pedogênicos, formados no solo por processos de intemperismo, seja por dissolução e reprecipitação de carbonatos pedogênicos, litogênicos e biogênicos, ou pela precipitação

de Ca^{2+} do intemperismo de silicato e bicarbonato (HCO^{3-}) da raiz e da respiração microbiana em solos alcalinos (SHARIFIFAR et al, 2023).

O tempo médio que grande parte do COS permanece no solo até ser mineralizada e liberada como CO_2 na atmosfera (tempo de residência) é relativamente curto, de dias a anos, enquanto o tempo de residência do CIS em condições naturais é longo, na escala de milênios (SHARIFIFAR et al, 2023). Globalmente, a influência antropogênica direta (como práticas agrícolas e fertilização) afeta tanto o tempo de permanência do COS como do CIS (SHARIFIFAR et al, 2023), este último podendo ser reduzido para anos ou décadas (KIM et al., 2020).

As perdas anuais de CIS devido à fertilização são estimadas em 7,5 Gt, enquanto a aplicação de calcário na calagem alcança 273 Gt (ZAMANIAN et al., 2021). As perdas de CIS são irreversíveis, ou seja, não há um equilíbrio esperado quando a fertilização é aplicada (RAZA et al., 2021). Para o COS, a degradação do solo está frequentemente associada à diminuição do estoque de carbono neste compartimento (LI et al., 2025), na ordem de 1,93 Gt, atribuídas às mudanças na cobertura da terra (PADARIAN et al., 2021). Felizmente, os estoques de COS podem ser aumentados por meio de um melhor gerenciamento. O sequestro de COS representa, dessa forma, uma estratégia natural de mitigação da mudança climática comprovada e economicamente viável, com vários benefícios associados (SHARIFIFAR et al, 2023).

O COS melhora a agregação e estabilidade estrutural, capacidade de retenção de água e aeração, e reduz a suscetibilidade à erosão (MA; JIANG, 2025). Quimicamente, aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC), atua como tampão de pH e é fonte de nutrientes (WANG et al., 2024). Biologicamente, serve como fonte de energia para a biomassa microbiana (MA; JIANG, 2025). Assim, o COS influencia as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (PARAMESHA et al., 2025; AZEVEDO et al., 2024), sendo considerado o principal componente da saúde do solo, ou seja, relativo à sua capacidade de sustentar produtividade, diversidade e serviços ambientais (SHEN; TENG, 2023; SONG et al., 2025).

3 USO DA TERRA E INTENSIFICAÇÃO DA CRISE CLIMÁTICA

O aumento das emissões de gases de efeito estufa, originadas predominantemente pela crescente industrialização e urbanização, tem intensificado o aquecimento global e provocado mudanças significativas nos padrões climáticos, incluindo alterações nos regimes de precipitação, com maior frequência de chuvas intensas e eventos climáticos extremos (ZHENG et al., 2021). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) confirma inequivocamente a influência humana no aquecimento da atmosfera, oceanos e territórios continentais, de aproximadamente 1,0 °C

acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2023; XU et al., 2024). Durante a segunda metade do século XX, foi registrado um aumento médio de 0,6°C na temperatura global, evidenciando o aquecimento do planeta.

O histórico da mudança climática está intrinsecamente ligado à Revolução Industrial, quando o uso intensivo de combustíveis fósseis iniciou um aumento exponencial das emissões de CO₂. Subsequentemente, a expansão agrícola e as mudanças no uso da terra exacerbaram esse problema. Desde a Revolução Industrial, as atividades humanas emitiram quantidades significativas de GEE, resultando em um aumento de aproximadamente 50% na concentração de CO₂ atmosférico em relação aos níveis pré-industriais (FRONZA et al., 2024).

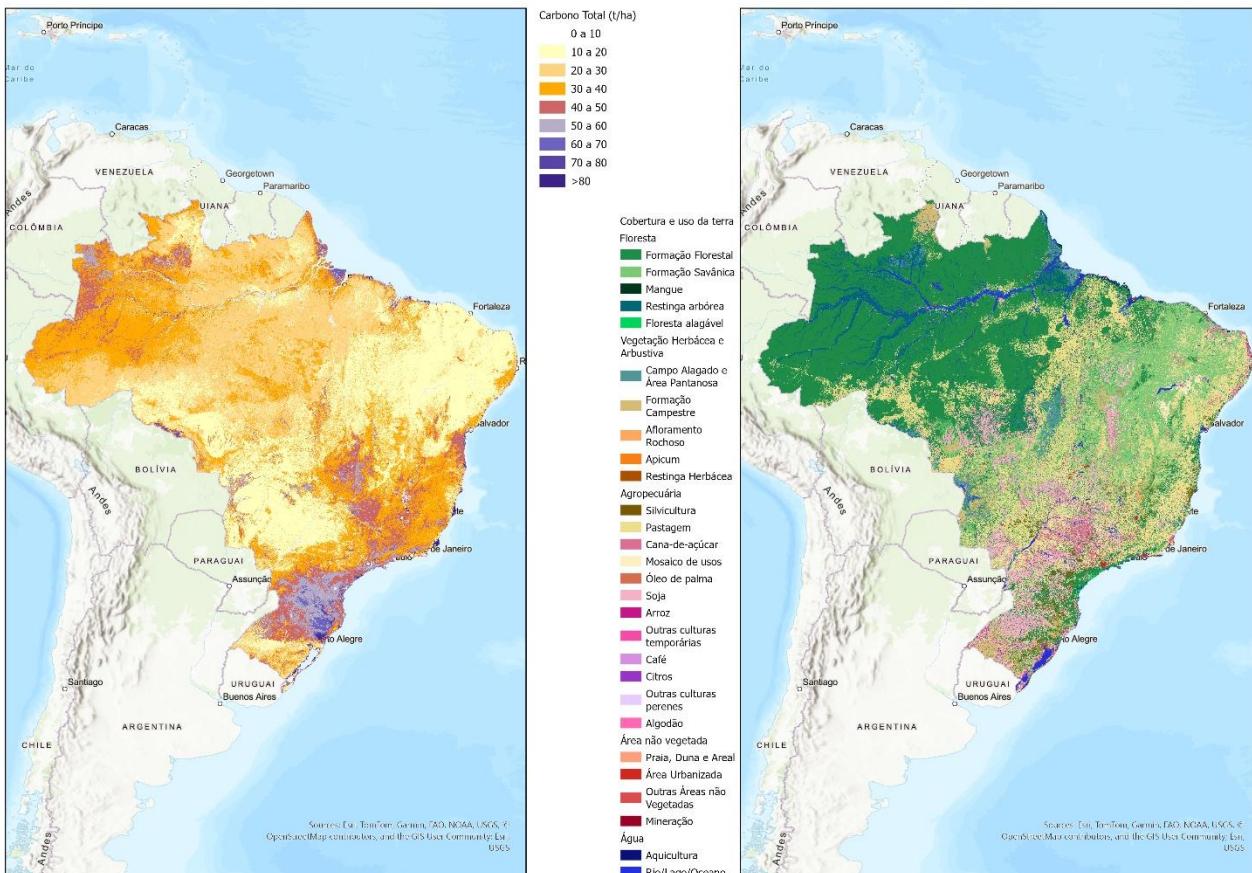
O desmatamento, a queima de biomassa, a agricultura e as conversões de ecossistemas nativos para agrossistemas, junto com o aquecimento global, afetam profundamente o ciclo do C (SHAO et al., 2023). A alteração no balanço entre sequestro e emissão oriundas destas atividades humanas têm historicamente perturbado esse equilíbrio, levando à perda de MOS e contribuído com uma parcela expressiva das emissões de GEE em todo o planeta (TABOADA et al., 2021; LAL, 2023; CHAPLOT; SMITH, 2023; RIBEIRO et al., 2023; NAZIR et al., 2024). Especificamente, cerca de 21% das emissões antropogênicas de CO₂ são atribuídas ao setor de Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (CHOWDHURI; PAL, 2025). Fonte significativa desses gases, a agricultura (LAL, 2023) contribui ainda para as emissões de CH₄ (p. ex., fermentação entérica e cultivo de arroz inundado) e N₂O (por ex., uso de fertilizantes nitrogenados e decomposição de resíduos orgânicos).

No Brasil, a conversão da vegetação nativa (Amazônia, Cerrado, Caatinga) para uso agrícola tem levado a perdas significativas de carbono do solo (OLIVEIRA et al., 2023; TONUCCI et al., 2023), e aproximadamente 75% das emissões brutas do país (tCO₂e - toneladas de carbono equivalente) provêm dos setores agrícola e de uso da terra (IPCC, 2023; FRONZA et al., 2024). Apenas no período de 2019 a 2024, 9.880.551 hectares foram desmatados, sendo 33% fora da região da Amazônia Legal. Em 2024, de acordo com o Relatório Anual de Desmatamento (MapBiomass, 2025), apesar da redução de 32,4% do desmatamento em todos os biomas, o Cerrado foi o ecossistema mais desmatado, com 652.197 hectares, concentrados principalmente (75%) na região do Matopiba (acrônimo de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Na região da Amazônia Legal foram desmatados 377.708 hectares, configurando o segundo bioma mais desmatado.

O levantamento anual mais recente, de 2023, apresenta o panorama estimado para uso e cobertura da terra (MapBiomass, 2024a) e para COS na camada de 0-30 cm (MapBiomass, 2024b), observados na Figura 1. Os dados apontam que 66,72% do território nacional está sob cobertura natural e o uso antrópico responde por 33,06%, com 32,52% atribuídos à agropecuária (Figura 1). Os estoques

de COS nas faixas de 40 a 50 t/ha (42,15%) e de 30 a 40 t/ha (34%) abrangem grande parte do Brasil, concentrados nas regiões norte, sul e sudeste (Figura 1). Aproximadamente 23% da área total possui estoques acima de 50 t/ha, concentrados principalmente na região sul.

Figura 1. Distribuição do estoque de carbono orgânico total na camada de 0-30 cm e uso e cobertura da terra, relativos ao ano 2023, no Brasil (Fonte: Mapbiomas, 2024a e b).



Elaborado pelos autores.

Já na Europa, as práticas intensivas na agricultura representam uma dívida histórica de carbono (PETERSSON et al., 2025). O preparo convencional do solo na agricultura, por exemplo, expõe a MOS à oxidação, acelerando sua decomposição e emissão de CO₂, sendo um fator significativo na perda de MOS (CHAPLOT; SMITH, 2023). Adicionalmente, a exportação de nutrientes pelas colheitas sem reposição adequada pode levar à "mineração" da MOS, contribuindo para a perda de carbono do solo (CHAPLOT; SMITH, 2023). No entanto, conforme apontado por Efthimiou (2025), a degradação do solo continua a ser uma ameaça significativa, com 60-70% dos solos da União Europeia em estado não saudável, exacerbando a perda de carbono para a atmosfera.

3.1 PROJEÇÕES CLIMÁTICAS: DESAFIOS E METAS

Os modelos climáticos projetam um futuro com temperaturas médias globais mais elevadas, alterações nos padrões de precipitação e aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (TABOADA et al., 2021; CHOWDHURI; PAL, 2025; NAZIR et al., 2024). As consequências incluem redução da disponibilidade de água, aumento do nível do mar, perda de biodiversidade, impactos na saúde humana e ameaças à produção de alimentos, podendo levar à desertificação e perda de terras agricultáveis (LI et al., 2025). Shao et al. (2023) alertam que o orçamento de C das florestas e a dinâmica do C no solo serão alterados, com potencial para transformar sumidouros em fontes.

Em resposta, o Acordo de Paris (COP 21, 2015) emergiu como o principal instrumento político multilateral, visando limitar o aquecimento global bem abaixo de 2°C, preferencialmente a 1,5°C, acima dos níveis pré-industriais. O documento frisa a lacuna entre os compromissos atuais e a ambição necessária, exigindo reduções de emissões de 43% até 2030 ou 69% até 2040 em relação a 2019. Corroborando este descompasso, a análise de amostras de núcleos de gelo da Antártica revelou que, em 2023, o aquecimento global causado por atividades humanas atingiu 1,49°C acima dos níveis pré-industriais (JARVIS; FORSTER, 2024). Os níveis de CO₂ aumentaram em 142 ppm em comparação ao período anterior a 1700, confirmando que o impacto humano no clima elevou a temperatura em 1,49°C (JARVIS; FORSTER, 2024). Progressivamente, o ano de 2024 marcou pela primeira vez a violação do Acordo de Paris, ou seja, houve um aquecimento médio global acima de 1,5 °C em relação ao período pré-industrial em todos os meses (BEVACQUA et al., 2025).

Para articular uma análise prospectiva sobre o significado de anos isoladamente quentes em relação às metas de longo prazo do Acordo de Paris, Bevacqua et al. (2025) investigaram a probabilidade de um único ano indicar a entrada iminente ou concomitante no período de 20 anos cujo aquecimento médio atingiria esse mesmo limiar. Este limiar é relevante, pois o IPCC utiliza médias de 20 anos para avaliar o aquecimento global induzido por atividades humanas e os riscos climáticos associados. Os autores indicaram que, para níveis de aquecimento já alcançados (0,6 °C a 1,0 °C), o primeiro ano singular a exceder esses limiares consistentemente ocorreu dentro do primeiro período de 20 anos em que a temperatura média atingiu os mesmos valores. Consequentemente, o registro de 2024 sinaliza que a Terra provavelmente já adentrou um período de 20 anos com aquecimento médio de 1,5 °C e indica que a tendência de aquecimento acima de 1,5°C é de longo prazo, implicando que os impactos climáticos associados a este nível de aquecimento podem começar a surgir.

A longevidade do C sequestrado sob diferentes cenários climáticos e de manejos é incerta. O impacto do aumento da temperatura e alteração hídrica na decomposição e estabilidade do COS

sequestrado precisa ser mais bem compreendido (KONG et al., 2025; XU et al., 2024). Há uma dimensão de sensibilidade dos ecossistemas tropicais aos aumentos de temperatura e reduções na precipitação que impactam a umidade efetiva do ecossistema (SOUZA et al., 2021) e afetam a estrutura e atividade das comunidades biológicas do solo (AZEVEDO et al., 2024), determinantes para os ciclos de carbono. As mudanças climáticas, especialmente o aquecimento, podem acelerar a decomposição da MOS, liberando CO₂ (SHAO et al., 2023; QIU et al., 2023), e afetar o metabolismo microbiano, influenciando a ciclagem de C e N (SHAO et al., 2023). Assim, o aquecimento global também afeta diretamente os processos biogeoquímicos do solo.

Xu et al. (2024) demonstraram que o aquecimento experimental alterou as razões N:P do solo e P para microrganismos e plantas. Na estepe alpina do Planalto Tibetano, o aumento da temperatura, embora correlacionado com aumento do estoque de COS, também levou a uma maior respiração do solo (ZHAO et al., 2025). Ainda, alterações na precipitação afetam a umidade do solo, um controlador chave da atividade microbiana (WANG et al., 2013). O tempo médio de residência do carbono nos ecossistemas tropicais (vegetação e solo combinados) pode ser inferior a 20 anos, tornando absolutamente necessária a avaliação dos impactos de mudanças ambientais sobre esses estoques (SOUZA et al., 2021). É evidente a importância da quantificação precisa dos estoques de COS, porém ainda há incertezas que dificultam previsões sobre as respostas carbono-clima (FLYNN et al., 2024; LIN et al., 2024).

O setor agrícola destaca-se como um dos mais afetados pelos efeitos do aquecimento global. A produção agrícola, essencial para a segurança alimentar, possui pegadas de carbono e hídrica significativas que tendem a ser exacerbadas pelas mudanças climáticas (NAYAK et al., 2023) e também a exibir grande variabilidade espacial (TABOADA et al., 2021). Simulações indicam aumentos de temperatura e variações na precipitação que podem levar a perdas substanciais de COS em sistemas de monocultura, enquanto sistemas agroflorestais podem apresentar maior resiliência (JIANG et al., 2025; PARAMESHA et al., 2025). Em cenários de redução da precipitação e aumentos de temperatura em regiões tropicais, há tendência de diminuição dos estoques de COS, especialmente em pastagens degradadas (RIBEIRO et al., 2023).

A conversão de ecossistemas naturais para agricultura convencional geralmente resulta em perdas de COS (PARAMESHA et al., 2025), entretanto, certas práticas podem reverter essa tendência. Nesse contexto, a crise climática desponta como um dos maiores e mais complexos desafios ambientais que a humanidade terá de enfrentar no século XXI. Os países signatários do Acordo de Paris devem apresentar o segundo ciclo de suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que vigorarão de 2031 a 2035. Essas novas metas são fundamentais para determinar se o aquecimento global poderá

ser limitado a menos de 2°C, conforme previsto no Acordo de Paris, ou se será possível alcançar o objetivo mais ambicioso de 1,5°C [isso já não é mais possível de acordo com os níveis de emissão atuais], reforçado pelo Balanço Global da COP28 em 2023. Para isso, as emissões globais precisam cair 60% até 2035 em relação a 2019, com um corte de pelo menos 42% até 2030. No entanto, as NDCs atuais, se totalmente implementadas, resultariam em uma redução de apenas 5,9% até 2030, evidenciando a necessidade de maior ambição na ação climática (IPCC, 2023).

O Brasil, como anfitrião da COP30 em 2025, comprometeu-se a ser um dos primeiros países a apresentar sua nova NDC. Atualmente, o país tem metas absolutas de redução de emissões de 48% até 2025 e 53% até 2030, em relação aos níveis de 2005. A nova NDC será baseada em trajetórias de mitigação do Plano Clima Mitigação, visando zerar as emissões líquidas até 2050 (BRASIL, 2025). O Observatório do Clima (2024), propôs uma NDC mais ambiciosa, sugerindo que o Brasil alcance emissões líquidas de 400 milhões de toneladas de CO₂ até 2030 e 200 milhões até 2035, o que exigiria zerar o desmatamento e ampliar ações em setores como energia, agropecuária e resíduos.

4 A SOLUÇÃO CLIMÁTICA NA AGRICULTURA

O estoque global de carbono do solo armazenado em áreas agrícolas é estimado em cerca de 12%, o equivalente a 12,6% da área terrestre do planeta (CERRI et al., 2023). Considerando a importância do COS e os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra sobre seus estoques, o manejo adequado do solo é uma ferramenta poderosa para seu incremento (LAL, 2023; SHAO et al., 2023; SONG et al., 2025). Uma agricultura conservacionista é climaticamente inteligente: prevê o mínimo revolvimento do solo (preparo reduzido, plantio direto), rotação de culturas, culturas de cobertura, fertilização orgânica e sistemas integrados (COLUNGA et al., 2025; GONÇALVES et al., 2025; MA; JIANG, 2025; USMAN, 2025; LAL, 2023; CHAPLOT; SMITH, 2023; OLIVEIRA et al., 2023; TABOADA et al., 2023), promovendo o aumento de COS. Este tipo de agricultura é também referida como “carbon farming” (agricultura de carbono), que designa a adoção de usos da terra restauradores e melhores práticas de manejo para criar um balanço positivo de C, gerando renda adicional (LAL, 2023).

A utilização de plantas de cobertura e adubação verde adicionam biomassa, protegem contra erosão, melhoram a estrutura do solo e podem fixar nitrogênio (USMAN, 2025). Além disso, o retorno de resíduos culturais (palha) otimiza a produtividade e o balanço de C (WANG et al., 2024; NAZIR et al., 2024). Nesse conjunto de medidas, as práticas conservacionistas mecânicas de controle da erosão, como o terraceamento e o cultivo em contorno previnem não apenas a perda de solo, mas também de MOS (USMAN, 2025). Já as práticas conservacionistas edáficas devem considerar a complexidade da

relação entre N, C e emissões de GEE (WANG et al., 2024), de modo que, para a reposição de nutrientes exportados pode-se optar pela adubação orgânica (esterco, compostos) que, para além da melhoria da fertilidade, traz como benefícios evitar a mineralização e aumentar diretamente o teor da MOS (CHAPLOT; SMITH, 2023; USMAN, 2025; SIDDIQUE et al., 2024).

Os sistemas que integram árvores, culturas e/ou pastagens (sistemas agroflorestais e agrossilvipastoris) são frequentemente relacionados ao aumento do COS. PAN et al. (2025) estimaram esta taxa em 10,7% globalmente, especialmente em áreas áridas. Em regiões semiáridas, TONUCCI et al. (2023) verificaram aumento de COS e N em profundidade em sistemas agroflorestais. A conversão de pastagens degradadas para sistemas agrossilvipastoris no Cerrado aumentou o COS (RIBEIRO et al., 2023; OLIVEIRA et al., 2023). PARAMESHA et al. (2025) mostraram tendência crescente de COS sob condições de mudanças climáticas em sistemas de consórcio coco + abacaxi.

Outras técnicas e tecnologias podem ser citadas. O biochar (biocarvão), por exemplo, é uma biomassa carbonizada para uso agrícola que, por ser alterada termicamente, possui uma decomposição muito mais lenta capaz de criar no solo um grande estoque de carbono de longo prazo (REZENDE et al., 2011). O biochar é cerca de 1500 a 2000 vezes mais estável do que a matéria orgânica não pirolisada e seu tempo de residência no solo é de centenas a milhares de anos (REZENDE et al., 2011; QIU et al., 2023).

A agricultura de precisão otimiza o uso de insumos associados à emissão de GEE; o melhoramento genético de plantas desenvolve culturas com sistemas radiculares mais profundos que depositam o carbono em locais onde ele tende a ser menos suscetível à decomposição rápida e liberação para a atmosfera (LAL, 2023); e as micorrizas e microrganismos promotores do crescimento de plantas contribuem para o influxo e armazenamento de C (AZEVEDO et al., 2024). Ademais, a restauração de ecossistemas degradados pode converter áreas fontes para sumidouros de carbono, como no caso da recuperação de pastagens degradadas, cujo potencial de sequestro de carbono é significativo e alcançam cerca de 2,50 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para pastagens bem manejadas (FRONZA et al., 2024).

A adoção de agricultura de carbono e demais práticas depende da integração de fatores socioeconômicos, políticos, culturais e de mercado (EFTHIMIOU, 2025; CHOWDHURI; PAL, 2025). Da mesma forma, a modelagem preditiva necessita ser aprimorada e também deve ser integrada, com processos biogeoquímicos, clima, manejo e socioeconomia convergindo para gerar informações de variabilidade espacial e incertezas associadas aos processos de monitoramento e análise de cenários de sequestro de carbono (FLYNN et al., 2024; LIN et al., 2024; WANG et al., 2013; PARAMESHA et al., 2025; DOU et al., 2022; REN et al., 2025; JIANG et al., 2025).

Apesar de dados regionais específicos serem escassos para áreas como MATOPIBA e regiões semiáridas (OLIVEIRA et al., 2023; TONUCCI et al., 2023), é importante considerar a necessidade de otimizar e regionalizar práticas para diferentes agroecossistemas (USMAN, 2025; MA; JIANG, 2025). O conhecimento das especificidades locais, aliado ao engajamento dos agricultores, apoio técnico e políticas de incentivo são inerentes às políticas e governança focadas na implementação bem-sucedida da agricultura de carbono (USMAN, 2025; LAL, 2023). Bons exemplos são a iniciativa RECSOIL (Recarbonizing Global Soils - Recarbonização Global dos Solos), em âmbito global, e a política pública brasileira designada Plano ABC (Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária), em nível nacional.

4.1 A ESTRATÉGIA GLOBAL PARA RESTAURAR O CARBONO DOS SOLOS

RECSOIL ((Recarbonizing Global Soils - Recarbonização Global dos Solos) é uma iniciativa abrangente cuja meta fundamental consiste em aumentar os estoques de COS em escala mundial através da implementação de um conjunto diversificado de práticas de uso e manejo sustentável do solo. O conceito do RECSOIL remete ao esforço e objetivo de melhorar a saúde e a funcionalidade dos solos em todo o mundo, tornando-os maiores reservatórios de carbono. Liderada pela Parceria Global sobre Solos (GSP) da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO/ONU) e pelo Painel Técnico Intergovernamental sobre Solos (ITPS), o RECSOIL iniciou no ano de 2017 como uma resposta direta à necessidade de desbloquear o potencial do COS para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas pelo sequestro de CO₂, aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas (adaptação), incrementar a segurança alimentar, conservar a biodiversidade do solo e combater a degradação do solo (FAO; ITPS, 2021).

O resultado do trabalho coletivo e da competência de uma vasta comunidade científica internacional resultou em um manual técnico sobre o manejo do COS em escala nacional e local, incluindo recomendações sobre o balanço de GEE e interações C-N, bem como as respectivas adaptações a contextos locais. O termo recarbonização envolve a iniciativa e o processo de: 1- reverter a tendência da perda de carbono, uma vez que muitos solos ao redor do mundo perderam quantidades significativas de seu carbono orgânico original devido à práticas de manejo insustentáveis, desmatamento e outras atividades humanas; 2- aumentar o sequestro de carbono ao promover a absorção de CO₂ da atmosfera pelas plantas e sua subsequente incorporação e estabilização no solo na forma de matéria orgânica; e 3- implementar práticas de manejo sustentável do solo com a adoção de diversas técnicas agrícolas, florestais e de gestão de outros ecossistemas (como pastagens, áreas úmidas e solos urbanos) que são conhecidas por proteger o COS existente e/ou adicionar novo carbono

ao solo (FAO; ITPS, 2021). O manual RECOSSOIL compila e detalha muitas dessas práticas para agricultura, pastagens, sistemas integrados, silvicultura, zonas úmidas e solos urbanos.

4.2 A ESTRATÉGIA BRASILEIRA PARA UMA AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL E RESILIENTE AO CLIMA

O Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030), denominado ABC+, representa uma política pública estratégica do Brasil, voltada a consolidar um paradigma de produção agropecuária que concilie produtividade, resiliência climática e sustentabilidade ambiental. Sua criação foi motivada pela crescente urgência da ação climática, pelas demandas dos consumidores e da sociedade civil por práticas mais sustentáveis, e pela necessidade de alinhar a agropecuária brasileira aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), notadamente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) (BRASIL, 2021).

O Plano ABC+ sucede e expande o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), implementado entre 2010 e 2020, que surgiu como um compromisso do setor agropecuário brasileiro frente aos desafios das mudanças climáticas e às metas nacionais de redução de GEE. O novo ciclo, ABC+, visa ampliar os avanços da década anterior, incorporando novas estratégias e aprimorando a governança. Ele se fundamenta em três bases conceituais principais.

A primeira é a abordagem integrada da paisagem, onde a gestão do território agropecuário é feita de forma sistêmica, integrando os diversos elementos da paisagem rural em suas diferentes escalas, promovendo o uso eficiente de áreas aptas, a regularização ambiental, a conservação de solo, água e biodiversidade, e a valorização das especificidades locais. A segunda é a combinação de estratégias de adaptação e mitigação, que reconhece a necessidade de ações que simultaneamente reduzam as emissões de GEE (mitigação) e diminuam a vulnerabilidade dos sistemas produtivos aos impactos climáticos, aumentando sua resiliência (adaptação). Por último, o estímulo à adoção e manutenção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis, cujo fomento a tecnologias e manejos agropecuários conservacionistas, cientificamente embasados, garantam eficiência produtiva e rentabilidade, ao mesmo tempo que conservam recursos naturais e fortalecem a resiliência dos ecossistemas (BRASIL, 2021).

Entre as estratégias do plano ABC+, está o estímulo à adoção e manutenção de sistemas integrados (p. ex. Agroflorestas e agrossilvipastorais), plantio direto, fixação biológica de nitrogênio, florestas plantadas, recuperação de pastagens degradadas e tratamento de dejetos animais. Além disso, a dimensão socieconômica é contemplada a partir do fomento, ampliação e diversificação de fontes e

instrumentos econômicos, financeiros e fiscais, incluindo créditos de carbono e fontes diversificadas de financiamento; e ações de transferência e difusão de tecnologias, capacitação e assistência técnica para ampliar o alcance e a qualidade da assistência técnica e extensão rural, utilizando também tecnologias digitais (BRASIL, 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O COS constitui um componente crítico do sistema climático global, cuja dinâmica é intrinsecamente moldada tanto por processos naturais quanto por intervenções antrópicas. As atividades humanas, notadamente a conversão de paisagens naturais e a agricultura convencional, desencadearam perdas substanciais de COS, transmutando vastas áreas de sumidouros em fontes de emissão de gases de efeito estufa e, simultaneamente, degradando a capacidade produtiva e a resiliência dos solos. As mudanças climáticas em curso, com o aumento da temperatura e a alteração dos padrões de precipitação, exacerbaram essa vulnerabilidade, ameaçando acelerar a mineralização da matéria orgânica e intensificar os processos erosivos, com implicações particularmente severas para ecossistemas vulneráveis e ricos em carbono, como florestas tropicais, turfeiras e solos permanentemente congelados (permafrost), que podem liberar volumes massivos de carbono, criando ciclos de retroalimentação positiva que podem amplificar o aquecimento global.

Em contrapartida, manifesta-se claramente o significativo potencial do manejo sustentável do solo para enfrentar a crise climática e promover a segurança alimentar. A adoção de práticas como a agricultura conservacionista, os sistemas agroflorestais, a integração lavoura-pecuária-floresta e a aplicação de biochar demonstram capacidade de reverter tendências de degradação, aumentar o sequestro de carbono no solo, melhorar a saúde edáfica e reduzir as emissões líquidas de gases do efeito estufa. Iniciativas globais e nacionais, como o RECSOIL e o Plano ABC+ no Brasil, refletem um reconhecimento crescente dessa potencialidade. Todavia, há desafios consideráveis, incluindo a necessidade de avanços na quantificação e monitoramento dos estoques de COS, a superação de barreiras socioeconômicas e culturais para a adoção de novas práticas, e a formulação de políticas públicas eficazes e integradas que incentivem a transição para uma gestão do solo climaticamente inteligente e regenerativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Ciências Agrárias da UFSCar (CCA) - projeto FAI RTI-CCA pelo financiamento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, L. C. B.; BERTINI, S. C. B.; FERREIRA, A. S.; RODOVALHO, N. S.; FERREIRA, L. F. R.; KUMAR, A. Microbial contribution to the carbon flux in the soil: A literature review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, e0230065, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230065>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- BATJES, N.H., 2014. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 65, 10–21.
- BEVACQUA, E.; SCHLEUSSNER, C.; ZSCHEISCHLER, J. A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nature Climate Change*, v. 15, p. 262-265, Mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02246-9>. Acesso em: 12 de fev. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo. Brasília, DF: MAPA, 2021. ISBN 978-65-86803-41-9. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/arquivos/abc_final.pdf. Acesso em: 12 de mar. 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Rumo à COP30. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/rumo-a-cop-30>. Acesso em: 5 fev. 2025.
- CERRI, C. E. P. ABBRUZZINI, T. F.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; FRAZAO, L. A.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, D. M. S. Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono. In: Bettiol, W., Silva, C.A., Cerri, C.E.P., Martin-Neto, L., Andrade, C.A.. (Org.). Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. 1ed. Brasília: DF: Embrapa, 2023, v. 1, p. 211-254.
- CHAPLOT, V.; SMITH, P. Cropping leads to loss of soil organic matter: How can we prevent it?. *Pedosphere*, v. 33, n. 1, p. 8–10, 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.002. Acesso em: 15 dez. 2024.
- CHOWDHURI, I.; PAL, S. C. Challenges and potential pathways towards sustainable agriculture crop production: A systematic review to achieve sustainable development goals (SDGs). *Soil & Tillage Research*, v. 248, p. 106442, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106442>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- COLUNGA, S. L.; WAHAB, L.; FIERRO CABO, A.; PEREIRA, E. Carbon sequestration through conservation tillage in sandy soils of arid and semi-arid climates: A meta-analysis. *Soil & Tillage Research*, v. 245, p. 106310, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106310>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- CONFERENCE OF THE PARTIES (COP 21) OF THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 21., 2015, Paris. Meetings... Paris: [s.n.], 2015. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cop21/>. Acesso em: 23 de mar. 2025.

DOU, X. et al. Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. *Catena*, v. 212, 106056, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106056>. Acesso em: 10 set. 2024.

EFTHIMIOU, N. Governance and degradation of soil in the EU. An overview of policies with a focus on soil erosion. *Soil & Tillage Research*, v. 245, p. 106308, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106308>. Acesso em: 15 dez. 2024.

FLYNN, T.; KOSTECKI, R.; REBI, A.; TAQI, R. Accessing global soil raster images and equal-area splines to estimate soil organic carbon stocks on the regional scale. *Pedosphere*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.07.004>. Acesso em: 15 dez. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS (ITPS). Recarbonizing global soils: a technical manual of recommended management practices. Volume 1: Introduction and methodology. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb6386en>. ISBN 978-92-5-134838-3.

FRONZA, E. E.; TEN CATEN, A.; BITTENCOURT, F.; ZAMBIAZI, D. C.; SCHMITT FILHO, A. L.; SEÓ, H. L. S.; LOSS, A. Carbon sequestration potential of pastures in Southern Brazil: A systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, e0230121, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230121>. Acesso em: 15 dez. 2024.

FU, Z.; HU, W.; BEARE, M.; BAIRD, D.; LI, S. Response of soil organic carbon stock to land use is modulated by soil hydraulic properties. *Soil & Tillage Research*, v. 233, p. 105793, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105793>. Acesso em: 15 dez. 2024.

GONÇALVES, D. R. P.; CANISARES, L. P.; WOOD, H. A. J.; BARTH, G.; PEPER, A.; GALVAN, J.; ANSELMI, A. Agriculture intensification in subtropical crop systems and its potential to sequester carbon in soils. *Soil & Tillage Research*, v. 246, p. 106330, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106330>. Acesso em: 15 dez. 2024.

IPCC-SYR-SPM, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em jan. 2025.

JARVIS, A.; FORSTER, P. M. Estimated human-induced warming from a linear temperature and atmospheric CO₂ relationship. *Nature Geoscience*, v. 17, p. 1222-1224, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01580-5>. Acesso em: 23 de mai. 2025.

JIANG, B. et al. Wetland CH₄ and CO₂ emissions show opposite temperature dependencies along global climate gradients. *Catena*, v. 248, 108557, nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108557>. Acesso em: 10 set. 2024.

KIM, J. H.; JOBBÁGY, E. G.; RICHTER, D. D.; TRUMBORE, S. E.; JACKSON, R. B. Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology*, v. 26, p. 5988-6002, 2020.

KONG, F.; XU, Y.; DU, H.; HE, Y.; ZHENG, C. Spatio-temporal evolution of water erosion in the western Songnen Plain: Analysis of its response to land use dynamics and climate change. *Soil & Tillage Research*, v. 245, p. 106299, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106299>. Acesso em: 15 dez. 2024.

LAL, R. Carbon farming by recarbonization of agroecosystems. *Pedosphere*, v. 33, n. 5, p. 676–679, 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2023.07.024. Acesso em: 15 dez. 2024.

LI, J.; LIU, F.; SHI, W.; DU, Z.; DENG, X.; MA, Y.; SHI, X.; ZHANG, M.; LI, Q. Including soil depth as a predictor variable increases prediction accuracy of SOC stocks. *Soil & Tillage Research*, v. 238, p. 106007, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106007>. Acesso em: 15 dez. 2024.

LI, R.; HU, W. Y.; JIA, Z. J.; LIU, H. Q.; ZHANG, C.; HUANG, B.; YANG, S. H.; ZHAO, Y. G.; ZHAO, Y. C.; SHUKLA, M. K.; TABOADA, M. A. Soil degradation: A global threat to sustainable use of black soils. *Pedosphere*, v. 35, n. 1, p. 264–279, 2025. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2024.06.011. Acesso em: 15 dez. 2024.

LIN, Z. Q.; DAI, Y. J.; MISHRA, U.; WANG, G. C.; SHANGGUAN, W.; ZHANG, W.; QIN, Z. C. Global and regional soil organic carbon estimates: Magnitudes and uncertainties. *Pedosphere*, v. 34, n. 4, p. 685-698, 2024. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2023.06.005. Acesso em: 15 dez. 2024.

MA, Y.; JIANG, Z. Effects of long-term modified conservation tillage on carbon sequestration, microbial communities, and crop productivity in northeastern Chinese Mollisols. *Pedosphere*, 2025. Disponível em: doi:10.1016/j.pedsph.2025.03.009. Acesso em: 15 dez. 2024.

MAPBIOMAS. 2024a. Projeto MapBiomass – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Acesso em 21 de mai. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/XXUKA8>

MAPBIOMAS. 2024b. Coleção 2 (beta) da série de mapas anuais do estoque de carbono orgânico do solo do Brasil (1985-2023). Acesso em 21 de mai. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/TVRX77>.

MAPBIOMAS. 2025. RAD2024: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2024. São Paulo: MapBiomass, 2025. 209 p. Disponível em: https://alerta.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/17/2025/05/RAD2024_15.05.pdf. Acesso em: 15 de mai. de 2025.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

NAYAK, A. K.; TRIPATHI, R.; DEBNATH, M.; SWAIN, C. K.; DHAL, B.; VIJAYKUMAR, S.; NAYAK, A. D.; MOHANTY, S.; SHAHID, M.; KUMAR, A.; RAJAK, M.; MOHARANA, K. C.; CHATTERJEE, D.; MUNDA, S.; GURU, P.; KHANAM, R.; LAL, B.; GAUTAM, P.; PATTANAIK, S.; SHUKLA, A. K.; FITTON, N.; SMITH, P.; PATHAK, H. Carbon and water footprints of major crop production in India. *Pedosphere*, v. 33, n. 3, p. 448–462, 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.045. Acesso em: 15 dez. 2024.

NAZIR, M. J.; LI, G.; NAZIR, M. M.; ZULFIQAR, F.; SIDDIQUE, K. H. M.; IQBAL, B.; DU, D. Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. *Soil & Tillage Research*, v. 237, p. 105959, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105959>. Acesso em: 15 dez. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Nota Técnica - Bases para proposta de 2a NDC para o Brasil - OC | Observatório do Clima. 2024. Disponível em:<<https://oc.eco.br/nota-tecnica-bases-para-proposta-de-2a-ndc-para-o-brasil/>>. Acesso em: 3 mai. 2025.

OLIVEIRA, D. M. S.; TAVARES, R. L. M.; LOSS, A.; MADARI, B. E.; CERRI, C. E. P.; ALVES, B. J. R.; PEREIRA, M. G.; CHERUBIN, M. R. Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e0220055, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220055>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PADARIAN, J.; MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; SMITH, P. Additional soil organic carbon storage potential in global croplands. *SOIL Discuss.*, preprint, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/soil-2021-73>.

PAN, J. et al. Agroforestry increases soil carbon sequestration, especially in arid areas: A global meta-analysis. *Catena*, v. 249, 108667, dez. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108667>. Acesso em: 10 set. 2024.

PARAMESHA, V. et al. Evaluating land use and climate change effects on soil organic carbon: a simulation study in coconut and pineapple systems in west coast India. *Catena*, v. 248, 108587, nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108587>. Acesso em: 10 set. 2024.

PETERSSON, T.; ANTONIELLA, G.; PERUGINI, L.; CHIRIACO, M. V.; CHITI, T. Carbon farming practices for European cropland: A review on the effect on soil organic carbon. *Soil & Tillage Research*, v. 247, p. 106353, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106353>. Acesso em: 15 dez. 2024.

QIU, J. C.; SONG, M. H.; WANG, C. M.; DOU, X. M.; LIU, F. F.; WANG, J. X.; ZHU, C. Y.; WANG, S. Q. Five-year warming does not change soil organic carbon stock but alters its chemical composition in an alpine peatland. *Pedosphere*, v. 33, n. 5, p. 776–787, 2023. Disponível em: doi: [10.1016/j.pedsph.2023.03.021](https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.03.021). Acesso em: 15 dez. 2024.

RAZA, S. et al. Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon sequestration and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, v. 319, 128036, out. 2021.

REN, T. et al. Asymmetric responses of soil dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen to warming: A meta-analysis. *Catena*, v. 252, 108871, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108871>. Acesso em: 10 set. 2024.

REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; SANTOS, S. S. dos; MANGRICH, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. *Rev. Virtual Quim.*, v. 3, n. 5, p. 426-433, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110046>. Acesso em: 12 de jan. 2025.

RIBEIRO, J. M.; FREITAS, I. C.; BRITO, B. G. S.; FERNANDES, L. A.; LEITE, L. F. C.; BARBOSA, D. L. A.; SANTOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral system as a potential model for increasing soil carbon stocks: a century model approach. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e0220136, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220136>. Acesso em: 15 dez. 2024.

RIEBEEK, H. O ciclo do carbono. *Earth Observatory* – NASA. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page1.php>. Acesso em: 25 de mar. 2025.

SHAO, P. S.; HAN, H. Y.; SUN, J. K.; XIE, H. T. Effects of global change and human disturbance on soil carbon cycling in boreal forest: A review. *Pedosphere*, v. 33, n. 1, p. 194–211, 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.035. Acesso em: 15 dez. 2024.

SHARIFIFAR, A. et al. Soil inorganic carbon, the other and equally important soil carbon pool: distribution, controlling factors, and the impact of climate change. In: SPARKS, Donald L. (Ed.). *Advances in Agronomy*. London: Academic Press, 2023. v. 178, p. 165-231. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.005>.

SHEN, R. F.; TENG, Y. The frontier of soil science: Soil health. *Pedosphere*, v. 33, n. 1, p. 6–7, 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.007. Acesso em: 15 dez. 2024.

SIDDIQUE, K. H. M.; BOLAN, N.; REHMAN, A.; FAROOQ, M. Enhancing crop productivity for recarbonizing soil. *Soil & Tillage Research*, v. 235, p. 105863, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105863>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SONG, X.; CORTI, G.; SHEN, R. F.; ZHANG, J. B. Soil health for future generations: Ensuring sustainable agriculture and ecosystem resilience. *Pedosphere*, v. 35, n. 1, p. 1–2, 2025. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2025.01.007. Acesso em: 15 dez. 2024.

SOUZA, I. F.; GOMES, L. C.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, I. R. Hierarchical feedbacks of vegetation and soil carbon pools to climate constraints in Brazilian ecosystems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0210079, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210079>. Acesso em: 15 dez. 2024.

TABOADA, M. Á.; COSTANTINI, A. O.; BUSTO, M.; BONATTI, M.; SIEBER, S. Climate change adaptation and the agricultural sector in South American countries: Risk, vulnerabilities and opportunities. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0210072, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210072>. Acesso em: 15 dez. 2024.

TONUCCI, R. G.; VOGADO, R. F.; SILVA, R. D.; POMPEU, R. C. F. F.; ODA-SOUZA, M.; SOUZA, H. A. Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e0220124, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220124>. Acesso em: 15 dez. 2024.

USMAN, S. Advanced soil conservation for African drylands: from erosion models to management theories. *Pedosphere*, 2025. Disponível em: doi:10.1016/j.pedsph.2025.01.012. Acesso em: 15 dez. 2024.

WANG, L.; WANG, E.; CHEN, G.; QIAN, X.; LIU, Q.; GAO, Y.; ZHANG, H.; LIU, K.; LI, Z. Optimizing straw return to enhance grain production and approach carbon neutrality in the intensive cropping systems. *Soil & Tillage Research*, v. 248, p. 106447, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106447>. Acesso em: 15 dez. 2024.

WANG, M. Y.; SHI, X. Z.; YU, D. S.; XU, S. X.; TAN, M. Z.; SUN, W. X.; ZHAO, Y. C. Regional differences in the effect of climate and soil texture on soil organic carbon. *Pedosphere*, v. 23, n. 6, p. 799-807, 2013. Disponível em: www.elsevier.com/locate/pedosphere. Acesso em: 15 dez. 2024.

WANG, S.; SUN, N.; ZHANG, X.; HU, C.; WANG, Y.; XIONG, W.; ZHANG, S.; COLINET, G.; XU, M.; WU, L. Assessing the impacts of climate change on crop yields, soil organic carbon sequestration and N₂O emissions in wheat-maize rotation systems. *Soil & Tillage Research*, v. 240, p. 106088, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106088>. Acesso em: 15 dez. 2024.

XU, H.; WANG, M.; YOU, C.; TAN, B.; XU, L.; LI, H.; ZHANG, L.; WANG, L.; LIU, S.; HOU, G.; LIU, Y.; XU, Z.; SARDANS, J.; PENUELAS, J. Warming effects on C:N:P stoichiometry and nutrient limitation in terrestrial ecosystems. *Soil & Tillage Research*, v. 235, p. 105896, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105896>. Acesso em: 15 dez. 2024.

YEASMIN, S.; SINGH, B.; JOHNSTON, C. T.; HUA, Q.; SPARKS, D. L. Changes in particulate and mineral-associated organic carbon with land use in contrasting soils. *Pedosphere*, v. 33, n. 3, p. 421–435, 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.042. Acesso em: 15 dez. 2024.

ZAMANIAN, K.; ZHOU, J.; KUZYAKOV, Y. Soil carbonates: The unaccounted, irrecoverable carbon source. *Geoderma*, v. 384, 114817, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114817>.

ZHAO, Y.; WANG, X.; JIANG, S.; WU, J.; YUAN, M.; LI, Y.; LI, J.; DUAN, W.; WANG, J. Successive utilization of carbon from different biogenic sources leads to continuous enhancement of soil respiration. *Soil & Tillage Research*, v. 246, p. 106327, 2025b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106327>. Acesso em: 15 dez. 2024.

ZHENG, J. et al. Interactive effects of mulching practice and nitrogen rate on grain yield, water productivity, fertilizer use efficiency and greenhouse gas emissions of rainfed summer maize in northwest China. *Agricultural Water Management*, v. 248, 106778, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106778>.

ZHUANG, Q.; SHAO, Z.; KONG, L.; HUANG, X.; LI, Y.; YAN, Y.; WU, S. Assessing the effects of agricultural management practices and land-use changes on soil organic carbon stocks. *Soil & Tillage Research*, v. 231, p. 105716, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105716>. Acesso em: 15 dez. 2024.