

**FLUXOS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE CACAU:
UMA REVISÃO SOBRE IMPACTOS DE MANEJO E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS****GREENHOUSE GAS FLUXES IN COCOA PRODUCTION SYSTEMS: A REVIEW OF
MANAGEMENT IMPACTS AND ECOSYSTEM SERVICES****FLUJOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LOS SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN DE CACAO: UNA REVISIÓN DE LOS IMPACTOS DE LA GESTIÓN Y
LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS**

10.56238/revgeov17n1-166

Danilo Gomes de Oliveira
DoutorandoInstituição: Instituto Federal Goiano – Campus Posse, Universidade Federal do Sul da Bahia
E-mail: danilo.gomes@ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5397962705006146>**João Carlos Medeiros**
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Universidade Federal do Sul da Bahia
E-mail: joao.medeiros@ufsb.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3509111034386583>**Beata Emoke Madari**
Doutora Agronomia e ênfase em Ciência do Solo
Instituição: Embrapa Arroz e Feijão
E-mail: beata.madari@embrapa.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0302689027695014>**Delvanei Gomes das Neves**
Graduando em Agronomia
Instituição: Instituto Federal Goiano – Campus Posse
E-mail: delvanei.neves@estudante.ifgoiano.edu.br
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/9134160708715411>**Paulo Cesar Lima Marrocos**
Doutor em Fitotecnia
Instituição: Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira
E-mail: Paulo.marrocos@agro.gov.br
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/5029362659812138>

Maria Caroline Aguiar Amaral

Mestra em Agronomia

Instituição: Universidade Federal do Sul da Bahia

E-mail: mariacarolineagm@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1444619550065123>**Sarah Cristine Martins Neri**

Doutora em Engenharia Florestal

Instituição: Instituto Federal Goiano – Campus Posse

E-mail: sarah.neri@ifgoiano.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5994210989712978>**Janderson de Jesus Lacerda**

Mestre em Agronomia

Instituição: Universidade Federal do Sul da Bahia

E-mail: janderson.lacerda@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3627347962041699>

RESUMO

Diante da crise climática global, a Mata Atlântica, um hotspot de biodiversidade com apenas 24% de sua cobertura original, enfrenta o desafio crítico de conciliar produção agrícola e conservação. Neste contexto, a conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas tem intensificado as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente, em regiões tropicais. Por outro lado, a cacaicultura desempenha papel relevante na conservação da Mata Atlântica, com diferentes arranjos produtivos como os sistemas agroflorestais complexos, cabruca e monocultivos a pleno sol. Esta revisão sistematiza o conhecimento sobre os fluxos de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 e N_2O) na cacaicultura, comparando o impacto de monocultivos convencionais com a resiliência dos sistemas agroflorestais (SAFs). Enquanto a produção a pleno sol intensifica as emissões e a degradação do solo, as evidências revelam que o sistema cabruca atua como um regulador vital, proporcionando estabilidade microclimática e estoques de carbono comparáveis aos de florestas nativas. A análise demonstra que a complexidade estrutural dos SAFs não apenas mitiga o aquecimento global, mas regenera atributos físicos, químicos e biológicos do solo, garantindo serviços ecossistêmicos essenciais. No entanto, persistem lacunas relacionadas à escassez de estudos de longo prazo, à padronização metodológica e à calibração de modelos biogeoquímicos para sistemas agroflorestais tropicais. Conclui-se que a adoção de sistemas agroflorestais na cacaicultura constitui estratégia promissora para conciliar produção agrícola, conservação ambiental e mitigação das mudanças climáticas na Mata Atlântica.

Palavras-chave: Sistemas Agroflorestais. Mudanças Climáticas. Emissão de Gases de Efeito Estufa. Sequestro de Carbono. Mata Atlântica.

ABSTRACT

In the face of the global climate crisis, the Atlantic Forest, a biodiversity hotspot with only 24% of its original coverage remaining, faces the critical challenge of reconciling agricultural production and conservation. In this context, the conversion of natural ecosystems into agricultural systems has intensified greenhouse gas (GHG) emissions, especially in tropical regions. On the other hand, cocoa



farming plays a relevant role in the conservation of the Atlantic Forest, with different production arrangements such as complex agroforestry systems, cabruca (coastal plantation systems), and full-sun monocultures. This review systematizes knowledge about greenhouse gas fluxes (CO_2 , CH_4 , and N_2O) in cocoa farming, comparing the impact of conventional monocultures with the resilience of agroforestry systems (AFS). While full-sun production intensifies emissions and soil degradation, evidence reveals that the cabruca system acts as a vital regulator, providing microclimatic stability and carbon stocks comparable to those of native forests. The analysis demonstrates that the structural complexity of agroforestry systems (AFS) not only mitigates global warming but also regenerates the physical, chemical, and biological attributes of the soil, guaranteeing essential ecosystem services. However, gaps persist related to the scarcity of long-term studies, methodological standardization, and calibration of biogeochemical models for tropical agroforestry systems. It is concluded that the adoption of agroforestry systems in cocoa farming constitutes a promising strategy to reconcile agricultural production, environmental conservation, and climate change mitigation in the Atlantic Forest.

Keywords: Agroforestry Systems. Climate Change. Greenhouse Gas Emissions. Carbon Sequestration. Atlantic Forest.

RESUMEN

Ante la crisis climática global, el Bosque Atlántico, un punto crítico de biodiversidad con solo el 24% de su cobertura original restante, enfrenta el desafío crítico de reconciliar la producción agrícola y la conservación. En este contexto, la conversión de ecosistemas naturales en sistemas agrícolas ha intensificado las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente en las regiones tropicales. Por otro lado, el cultivo de cacao desempeña un papel relevante en la conservación del Bosque Atlántico, con diferentes arreglos de producción como sistemas agroforestales complejos, cabruca (sistemas de plantación costera) y monocultivos a pleno sol. Esta revisión sistematiza el conocimiento sobre los flujos de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O) en el cultivo de cacao, comparando el impacto de los monocultivos convencionales con la resiliencia de los sistemas agroforestales (SAF). Si bien la producción a pleno sol intensifica las emisiones y la degradación del suelo, la evidencia revela que el sistema de cabruca actúa como un regulador vital, proporcionando estabilidad microclimática y reservas de carbono comparables a las de los bosques nativos. El análisis demuestra que la complejidad estructural de los sistemas agroforestales (SAF) no solo mitiga el calentamiento global, sino que también regenera las características físicas, químicas y biológicas del suelo, garantizando servicios ecosistémicos esenciales. Sin embargo, persisten brechas relacionadas con la escasez de estudios a largo plazo, estandarización metodológica y calibración de modelos biogeoquímicos para sistemas agroforestales tropicales. Se concluye que la adopción de sistemas agroforestales en el cultivo del cacao constituye una estrategia prometedora para conciliar la producción agrícola, la conservación ambiental y la mitigación del cambio climático en el Bosque Atlántico.

Palabras clave: Sistemas Agroforestales. Cambio Climático. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Secuestro de Carbono. Bosque Atlántico.



1 INTRODUÇÃO

1.1 MATA ATLÂNTICA, BIODIVERSIDADE, IMPORTÂNCIA ECOLÓGICA E VULNERABILIDADE

A Mata Atlântica é a segunda maior floresta tropical americana, composta por diferentes formações e subsistemas associados, apresenta elevada heterogeneidade ambiental. Esse bioma estende-se pelo território brasileiro e por áreas da Argentina e do Paraguai, é constituído por um mosaico de formações vegetais, como Florestas Estacional Semidecidual e Decidual, Florestas Ombrófilas Mista, Aberta e Densa, além de Manguezais, Restingas e Campos de Altitude (IBGE, 2012). A Mata Atlântica ocupa aproximadamente 15% do território nacional, distribuída em 17 estados brasileiros, e abriga cerca de 72% da população do país (IBGE, 2022), desempenhando papel fundamental na regulação climática e na distribuição hidrográfica das regiões Sudeste e Sul (Scarano e Ceotto, 2015; Rezende et al., 2018).

Atualmente, a Mata Atlântica permanece como um dos biomas brasileiros mais transformados e fragmentados, resultado da longa história de ocupação e uso da terra. Estudos baseados em mapeamentos espaciais indicam que apenas cerca de 24% de sua cobertura florestal original permanece distribuída em fragmentos isolados ao longo do leste do Brasil, em sua maioria com áreas reduzidas e em diferentes estágios sussepcionais e de degradação (MapBiomass/SOS Mata Atlântica/INPE, 2025). Estes remanescentes incluem tanto formações florestais maduras quanto vegetação secundária regenerada, refletindo processos históricos de desmatamento e, mais recentemente, dinâmicas de regeneração compensando parcialmente as perdas de floresta mais antiga (MapBiomass, 2024-2025). A elevada fragmentação e a reduzida proporção de cobertura contínua tornam o bioma especialmente vulnerável à perda de biodiversidade e à redução de serviços ecossistêmicos, como regulação climática, provisão de água e sequestro de carbono (MapBiomass/SOS Mata Atlântica/INPE, 2024).

O elevado grau de degradação antrópica confere à Mata Atlântica a classificação de hotspot mundial de biodiversidade (Myers et al., 2000; Mittermeier et al., 2005). Apesar de sua elevada produtividade e importância ecológica, estima-se que os impactos associados à sua devastação resultem em perdas superiores a 2,3 bilhões de dólares anuais em créditos de carbono (Lima et al., 2022).

1.2 RELEVÂNCIA DA CULTURA DO CACAU NO CONTEXTO SOCIOECONÔMICO E AMBIENTAL

No contexto da conservação da biodiversidade aliada a mecanismos produtivos sustentáveis, o cultivo do cacau (*Theobroma cacao* L.) associado a espécies arbóreas nativas tem se destacado como estratégia capaz de promover a manutenção da biodiversidade e proteção do solo (Maney et al., 2022; Suárez et al., 2021). Sistemas agroflorestais de cacau também têm sido associados a melhorias na



qualidade do solo e nas funções ecossistêmicas, o que contribui, indiretamente, para a produtividade e potencial melhoria da qualidade dos frutos de cacau (Tinoco-Jaramillo et al., 2024).

A cultura do cacau possui relevância histórica, cultural e socioeconômica para a região sul da Bahia, onde constitui elemento central da economia regional e nacional, especialmente, diante dos desafios produtivos registrados nas últimas décadas em função de doenças como a vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa*) e mudanças nos padrões de produção (Saputra et al., 2020; Maney et al., 2022).

Historicamente, a expansão do cultivo do cacau esteve associada à conversão de florestas nativas e à intensificação do uso da terra em paisagens tropicais, refletindo modelos de produção agrícola voltados à maximização da produtividade e à resposta à crescente demanda por *commodities* agrícolas. Esse processo contribuiu para a simplificação estrutural dos ecossistemas, a fragmentação da paisagem e a degradação de atributos ambientais, especialmente do solo e da biodiversidade, em diferentes regiões produtoras de cacau (Wainaina et al., 2021).

Contudo, evidências recentes indicam que abordagens agroecológicas baseadas na integração entre lavouras e florestas, como sistemas agroflorestais de cacau, têm mitigado impactos ambientais, promovendo conservação de biodiversidade, melhoria da qualidade do solo e sustentabilidade produtiva da cacaicultura (Saputra et al., 2020; Tinoco-Jaramillo et al., 2024).

2 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO DOS FLUXOS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS DE CACAU

A agricultura figura entre as principais fontes globais de emissões de gases de efeito estufa, sobretudo em função das mudanças no uso da terra, do desmatamento, do uso de fertilizantes, da fermentação entérica e do manejo de dejetos animais (Kamyab et al., 2024; Mapanda et al., 2010). Diante do agravamento das mudanças climáticas globais, impulsionadas principalmente pela emissão contínua de gases de efeito estufa (GEE), tornou-se essencial o desenvolvimento de estudos que avaliem alternativas de produção agrícola com menores níveis de emissão desses gases (IPCC, 2023). Sistemas agroflorestais (SAFs), especialmente, o sistema cabruca, têm demonstrado elevado potencial para o armazenamento de carbono e redução dos fluxos de GEE, apresentando valores de estoque de carbono comparáveis aos de florestas nativas (Heming et al., 2022; Tinoco-Jaramillo et al., 2024).

3 METODOLOGIA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão foi conduzida com o objetivo de sistematizar e discutir o conhecimento científico disponível sobre os fluxos dos principais gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 e N_2O) em sistemas de produção de cacau, com ênfase em sistemas agroflorestais, monocultivos a pleno sol e áreas de floresta nativa no bioma Mata Atlântica.



A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Web of Science, Scopus e SciELO, por serem amplamente reconhecidas pela cobertura de periódicos científicos de alto impacto nas áreas de ciências agrárias, ambientais e florestais. Foram utilizadas combinações de palavras-chave em português e inglês, incluindo os termos: “cacao”, “*Theobroma cacao*”, “greenhouse gas fluxes in cacao crops”, “CO₂”, “CH₄”, “N₂O”, “cacao agroforestry systems”, “cabruca”, “soil greenhouse gases” e “Atlantic Forest”, “cacao monoculture”.

O recorte temporal da busca concentrou-se em estudos publicados entre 2010 e 2025, priorizando pesquisas realizadas em regiões tropicais e, sempre que possível, no contexto da Mata Atlântica. Foram incluídos artigos originais, revisões científicas, relatórios técnicos e documentos institucionais que abordassem medições diretas de fluxos de GEE, estoques de carbono no solo e na biomassa, atributos físicos, químicos e biológicos do solo ou modelagem biogeoquímica aplicada a sistemas de produção de cacau.

Como critérios de exclusão, foram descartados estudos que não apresentavam informações metodológicas claras, que tratavam exclusivamente de emissões industriais ou pecuárias sem relação com sistemas agrícolas de cacau, bem como trabalhos fora do contexto tropical. A análise dos estudos selecionados foi conduzida de forma qualitativa e comparativa, buscando identificar padrões, tendências e lacunas de conhecimento relacionadas aos efeitos do manejo agrícola sobre os fluxos de GEE e a provisão de serviços ecossistêmicos.

4 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE CACAU NA MATA ATLÂNTICA

Os sistemas de produção de cacau na Mata Atlântica apresentam ampla diversidade de arranjos produtivos, variam desde sistemas agroflorestais complexos até monoculturas convencionais a pleno sol (Pinto et al., 2019; Wainaina et al., 2021; Heming et al., 2022).

O sistema agroflorestal conhecido como cabruca é caracterizado pelo cultivo do cacaueiro sob o dossel remanescente da floresta nativa, mantendo diferentes níveis de sombreamento e reduzida intervenção no solo. Trata-se de um sistema tradicional, com histórico superior a dois séculos, amplamente difundido no sul da Bahia (Pinto et al., 2019; Heming et al., 2022). Esse sistema favorece a conservação da estrutura do solo, a ciclagem de nutrientes e a estabilidade microclimática, além de contribuir para a manutenção da biodiversidade (Heming et al., 2022; Tinoco-Jaramillo et al., 2024).

Os sistemas agroflorestais biodiversos incluem arranjos multiestratificados que combinam o cacau com espécies arbóreas nativas e exóticas, como seringueira, palmeiras e espécies madeireiras, além de culturas anuais ou semiperenes (Wainaina et al., 2021). Esses sistemas promovem maior complexidade estrutural, incremento da matéria orgânica do solo, melhoria da infiltração e retenção de água e aumento da diversidade funcional da biota edáfica (Saputra et al., 2020; Bettoli et al., 2023).



Em contraste, as monoculturas convencionais de cacau a pleno sol apresentam maior exposição do solo à radiação solar, maior variabilidade térmica e, frequentemente, maior dependência de insumos externos. Essas condições podem intensificar processos de degradação do solo, reduzir a eficiência no uso da água e dos nutrientes e aumentar a vulnerabilidade do sistema às variações climáticas (Wainaina et al., 2021; IPCC, 2023). Entretanto, a adoção de sistemas a pleno sol tem sido historicamente impulsionada pela elevada demanda por aumento de produtividade, uma vez que a redução do sombreamento favorece maior incidência luminosa sobre as plantas, resultando, em muitos casos, em incrementos significativos de rendimento no curto prazo. Assim, a expansão desses sistemas reflete uma estratégia produtiva voltada à maximização da produção, embora frequentemente associada a maiores custos ambientais e menor resiliência em longo prazo (Wainaina et al., 2021).

5 IMPORTÂNCIA DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA AGRICULTURA TROPICAL

A agricultura é reconhecida como um dos principais setores responsáveis pelas emissões globais de gases de efeito estufa, em função do uso intensivo da terra, da conversão de ecossistemas naturais e do manejo inadequado dos solos (IPCC, 2023; Han e Zhu, 2020). Os principais GEE associados às atividades agrícolas são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), os quais desempenham papel central na intensificação do efeito estufa e nas mudanças climáticas globais (IPCC, 2015; IPCC, 2023). Os processos de emissão e sequestro desses gases em sistemas agrícolas tropicais envolvem complexas interações entre solo, planta e atmosfera (Butterbach-Bahl et al., 2011).

O CO_2 está associado, principalmente, à respiração do solo e da biomassa vegetal, resultante da atividade microbiana e da decomposição da matéria orgânica, bem como da respiração radicular e dos organismos do solo (Sousa Neto et al., 2011; Alves et al., 2017). Além disso, as emissões de CO_2 provenientes da agricultura estão fortemente relacionadas à combustão de combustíveis fósseis, à degradação do solo e à conversão de florestas para a expansão de terras agrícolas, processos que intensificam a liberação de carbono previamente estocado nos ecossistemas naturais (Filonchyk et al., 2024).

De acordo Sterling et al., (2025) os fluxos de CO_2 em agroecossistemas de cacau são fortemente influenciados pela interação entre a zona climática, o tipo de sistema e o estágio de desenvolvimento. Os autores observaram maiores emissões de CO_2 nos solos sob sistemas convencionais durante a fase de crescimento na zona úmida, enquanto os valores mais baixos foram evidenciados em sistemas biodiversos durante a fase produtiva dentro da mesma zona climática. Práticas de manejo mais intensivas típicas dos sistemas convencionais, combinadas com menor complexidade da cobertura vegetal, aumentam as emissões de CO_2 do solo, elevando a temperatura do solo e alterando a dinâmica da umidade do solo (Kouadio., 2024; Wolf et al., 2023).



Miharza et al., (2023) em estudo realizado na Indonésia, observaram que os sistemas agroflorestais com cacau apresentaram maiores estoques totais de carbono em comparação aos sistemas de monocultivo, $134,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ e $104,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente. Em contrapartida, os monocultivos apresentaram pegadas de carbono maiores do que sistemas agroflorestais, registrando emissões de $11914,4 \text{ kg de CO}_2\text{e ha}^{-1}$ e $932,1 \pm 251,6 \text{ kg de CO}_2\text{e ha}^{-1}$, respectivamente.

O CH₄, por sua vez, é resultado de processos de produção e oxidação microbiana no solo, controlados pela disponibilidade de oxigênio, umidade e qualidade da matéria orgânica (Sousa Neto et al., 2011). Esse gás é produzido predominantemente em condições anaeróbias, por meio da atividade de microrganismos metanogênicos durante a fermentação entérica e a decomposição da matéria orgânica em solos saturados ou pouco aerados, podendo ser parcialmente consumido por microrganismos metanotróficos em condições aeróbias (Filonchyk et al., 2024).

Quanto ao N₂O, embora presente em concentrações mais baixas, têm um potencial de aquecimento global 273 vezes maior que o CO₂ (IPCC, 2013) e está fortemente relacionado aos processos de nitrificação e desnitrificação, frequentemente intensificados pelo uso de fertilizantes (IPCC, 2023; Han e Zhu, 2020; Sousa Neto et al., 2011).

A tabela 1 sintetiza evidências quantitativas e qualitativas sobre o comportamento dos gases de efeito estufa em diferentes sistemas de produção de cacau. Valores numéricos diretos de fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O estão disponíveis apenas em estudos que utilizaram medições *in situ*, como Sousa Neto et al. (2011). Nos demais trabalhos, as inferências sobre o potencial emissor ou mitigador de GEE baseiam-se em atributos físicos, químicos e biológicos do solo e em estoques de carbono, reconhecidamente relacionados aos processos biogeoquímicos que controlam a emissão e o consumo desses gases.



Tabela 1. Evidências quantitativas e qualitativas sobre gases de efeito estufa (GEE) em sistemas de produção de cacau e ecossistemas florestais tropicais.

Estudo	Bioma / Região	Sistema avaliado	Evidências relacionadas aos GEE	Tipo de evidência
Sousa Neto et al. (2011)	Mata Atlântica (Brasil)	Floresta nativa	Fluxos de CO ₂ com variação sazonal; solos predominantemente atuando como sumidouros de CH ₄ ; emissões de N ₂ O baixas, com picos episódicos associados à umidade do solo	Fluxos diretos medidos (câmaras estáticas)
Sousa Neto et al. (2011)	Mata Atlântica (Brasil)	Cabruca	Padrões de fluxos de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O semelhantes aos da floresta nativa, com estabilidade microclimática e menor variabilidade temporal	Fluxos diretos medidos (câmaras estáticas)
Suárez et al. (2021)	Amazônia Colombiana	SAF de cacau	Maior porosidade, agregação e carbono orgânico do solo, indicando menor potencial para emissões de N ₂ O e maior capacidade de consumo de CH ₄	Indicadores edáficos (inferência mecanística)
Tinoco-Jaramillo et al. (2024)	Amazônia Equatoriana	SAF biodiverso	Estoques de carbono no solo e na biomassa comparáveis aos de ecossistemas florestais, sugerindo papel relevante na mitigação climática	Estoque de carbono (biomassa e solo)
Wainaina et al. (2021)	Revisão global	Cacau a pleno sol	Maior variabilidade térmica e hídrica do solo, maior dependência de insumos e maior risco de emissões de GEE, caracterizando trade-offs entre produtividade e sustentabilidade	Síntese conceitual (revisão)

Fonte: Autores.

6 MÉTODOS DE COLETA E MODELAGEM DOS FLUXOS DE GEE

A quantificação dos fluxos de gases de efeito estufa em ambientes tropicais requer abordagens metodológicas capazes de capturar a elevada variabilidade espacial e temporal inerente a esses sistemas, especialmente em função da dinâmica climática, da heterogeneidade edáfica e da complexidade estrutural da vegetação.

Nesse contexto, as câmaras estáticas têm sido amplamente empregadas em estudos de campo por permitirem medições diretas das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, além de apresentarem viabilidade operacional em áreas agrícolas e florestais (Alves et al., 2017). Esse método possibilita a obtenção de séries temporais de fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O, útil em estudos comparativos entre diferentes sistemas de uso e manejo do solo.

Entretanto, em ambientes tropicais úmidos e sombreados, como sistemas agroflorestais de cacau e áreas de floresta nativa, fatores como a elevada umidade do solo, a heterogeneidade espacial dos atributos físicos e químicos e a influência do dossel florestal sobre o microclima podem introduzir incertezas adicionais nas medições, exigindo maior número de repetições espaciais e temporais e rigor na padronização dos protocolos de amostragem (Sousa Neto et al., 2011).

As amostras de gases coletadas em campo são, em geral, analisadas por cromatografia gasosa, técnica reconhecida por sua alta precisão e sensibilidade na quantificação de CO₂, CH₄ e N₂O, considerada padrão em estudos de fluxos de GEE em solos (Alves et al., 2017). Métodos



complementares, como a espectroscopia no infravermelho, também têm sido utilizados, sobretudo em estudos de monitoramento contínuo.

Paralelamente às medições empíricas, modelos biogeoquímicos, como DNDC, DayCent, RothC e SimCafé, vêm sendo aplicados para simular os fluxos de carbono e nitrogênio em sistemas agrícolas. Contudo, a aplicação desses modelos em sistemas agroflorestais tropicais ainda apresenta limitações significativas, relacionadas à escassez de dados para calibração e validação sob condições de elevada complexidade estrutural e biológica, conforme destacado em avaliações recentes do IPCC (2023).

Apesar do amplo uso de modelos biogeoquímicos, como DNDC e DayCent, para a simulação dos fluxos de carbono e nitrogênio em agroecossistemas, sua aplicação em sistemas agroflorestais tropicais ainda apresenta limitações relevantes. Esses modelos foram majoritariamente desenvolvidos e calibrados para sistemas agrícolas simplificados, apresentando dificuldades em representar adequadamente a heterogeneidade estrutural dos SAFs, como a presença de serapilheira multiestratificada, o sombreamento variável do dossel e a elevada variabilidade espacial dos atributos físicos e biológicos do solo (Butterbach-Bahl et al., 2011; IPCC, 2023).

Em sistemas de cacau sob sombreamento, essas limitações comprometem a simulação precisa da dinâmica da umidade do solo, da temperatura e dos processos microbianos associados à nitrificação e desnitrificação, resultando em incertezas na estimativa dos fluxos de N₂O e CH₄. Dessa forma, a calibração desses modelos para condições tropicais e sistemas agroflorestais permanece como uma lacuna científica prioritária, reforçando a necessidade de dados empíricos de longo prazo para aprimorar sua aplicabilidade em paisagens cacaueiras (Sousa Neto et al., 2011; IPCC, 2023).

7 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A redução dos fluxos de GEE em sistemas agroflorestais de cacau, especialmente no sistema cabruca, está associada à melhoria da estrutura e da qualidade biológica do solo promovida pela manutenção da cobertura arbórea e pelo aporte contínuo de serapilheira. Esses fatores favorecem o acúmulo de carbono orgânico, a agregação e a porosidade do solo, modulando a distribuição de água e oxigênio nos poros e reduzindo a formação de microssítios anaeróbios responsáveis pela intensificação da desnitrificação e das emissões de N₂O (Sousa Neto et al., 2011; Butterbach-Bahl et al., 2011; Han e Zhu, 2020).

Além disso, a maior estabilidade do espaço poroso preenchido por água (WFPS) em sistemas cabruca limita oscilações extremas entre condições aeróbias e anaeróbias, restringindo a produção de N₂O quando comparado a sistemas de cacau a pleno sol, nos quais a compactação e a exposição do solo favorecem picos de umidade após eventos de precipitação (Sousa Neto et al., 2011; IPCC, 2023). No caso do metano, a predominância de condições aeróbias e a maior diversidade funcional da



microbiota do solo estimulam a atividade metanotrófica, fazendo com que sistemas agroflorestais atuem frequentemente como sumidouros de CH₄, em contraste com sistemas agrícolas simplificados (Butterbach-Bahl et al., 2011; Wainaina et al., 2021).

Apesar dos avanços na compreensão dos fluxos de GEE em sistemas de produção de cacau, persistem lacunas importantes, relacionadas à escassez de estudos de longo prazo, à padronização metodológica e à integração de atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Sousa Neto et al., 2011; Alves et al., 2017; Han e Zhu, 2020). A calibração de modelos biogeoquímicos para condições tropicais e sistemas agroflorestais também representa um desafio relevante (IPCC, 2023).

Pesquisas futuras devem priorizar abordagens integradas e de longo prazo, capazes de contemplar múltiplas escalas espaciais e temporais, bem como de quantificar de forma comparativa o desempenho dos diferentes sistemas de produção de cacau em relação aos fluxos de gases de efeito estufa e à provisão de serviços ecossistêmicos. Evidências recentes indicam que sistemas agroflorestais, especialmente o sistema cabruca, tendem a apresentar menores fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O e maior estabilidade desses fluxos ao longo do tempo quando comparados às monoculturas convencionais a pleno sol, aproximando-se, em alguns casos, do comportamento observado em áreas de floresta nativa (Heming et al., 2022; Tinoco-Jaramillo et al., 2024).

Do ponto de vista edáfico, esses sistemas se destacam por promover maior acúmulo de carbono orgânico no solo, melhoria da estrutura e da porosidade, maior retenção de água e intensificação da atividade biológica, fatores que influenciam diretamente os processos de nitrificação, desnitrificação e respiração do solo, modulando os fluxos de GEE (Bettoli et al., 2023; Sousa Neto et al., 2011). Em contraste, sistemas simplificados a pleno sol tendem a apresentar maior variabilidade térmica e hídrica, menor estoque de carbono no solo e maior dependência de insumos externos, o que se reflete em maior vulnerabilidade climática e menor provisão de serviços ecossistêmicos em longo prazo. Nesse sentido, a integração de indicadores físicos, químicos e biológicos do solo torna-se fundamental para compreender os trade-offs entre produtividade, emissões de GEE e sustentabilidade dos agroecossistemas de cacau.

A compreensão dos fluxos de gases de efeito estufa em sistemas de produção de cacau também possui implicações diretas para a valoração de serviços ecossistêmicos e para a implementação de mecanismos de pagamento por serviços ambientais (PSA). Evidências indicam que sistemas agroflorestais de cacau, especialmente o sistema cabruca, apresentam estoques de carbono no solo e na biomassa comparáveis aos de florestas nativas, além de fluxos de GEE mais estáveis ao longo do tempo, reforçando seu papel como estratégia de mitigação climática em paisagens produtivas da Mata Atlântica (Heming et al., 2022; Tinoco-Jaramillo et al., 2024).

Considerando que a degradação desse bioma está associada a perdas econômicas expressivas relacionadas a créditos de carbono e outros serviços ecossistêmicos, a mensuração consistente dos



fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O representa um passo fundamental para subsidiar políticas públicas, programas de PSA e incentivos à manutenção de sistemas biodiversos na região cacaueira. Nesse contexto, a cacaicultura sombreada emerge como alternativa capaz de conciliar produção agrícola, conservação ambiental e benefícios econômicos de longo prazo (Lima et al., 2022; IPCC, 2023).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências descritas nesta revisão confirmam que a arquitetura dos sistemas de produção de cacau na Mata Atlântica é a principal reguladora dos fluxos de gases de efeito estufa. A transição de modelos simplificados para arranjos mais complexos não altera apenas a produtividade, mas redefine o papel ambiental da cacaicultura, movendo-a de uma fonte de emissão para uma ferramenta de mitigação.

O sistema cabruca se consolidou como a alternativa mais resiliente, pois apresenta uma estabilidade microclimática e estoques de carbono no solo e na biomassa que se aproximam dos níveis encontrados em florestas nativas. Em contrapartida, o manejo a pleno sol, embora historicamente associado a ganhos imediatos de rendimento, resulta em maior variabilidade térmica do solo e eleva o potencial de emissão de gases como o N₂O, cujo impacto no aquecimento global é significativamente superior ao do CO₂.

Do ponto de vista científico, fica claro que o benefício dos SAFs reside na proteção dos atributos edáficos. A manutenção da cobertura vegetal e do aporte de matéria orgânica otimiza a ciclagem de nutrientes e a atividade biológica, processos fundamentais para a regulação hídrica e a contenção das emissões gasosas.

Entretanto, o estudo aponta que ainda enfrentamos desafios para quantificar esses serviços com precisão. A escassez de dados de longo prazo e a necessidade de calibrar modelos biogeoquímicos como o DNDC e o DayCent para as particularidades dos solos tropicais são lacunas que precisam ser priorizadas em pesquisas futuras.

A adoção de diferentes sistemas de produção de cacau envolve um trade-off entre produtividade no curto prazo e sustentabilidade em longo prazo. Sistemas a pleno sol tendem a apresentar maiores rendimentos iniciais, porém associados à maior variabilidade microclimática, degradação do solo e maior risco de emissões de gases de efeito estufa. Em contraste, os sistemas agroflorestais, especialmente o cabruca, apresentam maior estabilidade ambiental e resiliência produtiva, embora a quantificação econômica dessa compensação ainda represente uma lacuna relevante na literatura para a Mata Atlântica (Wainaina et al., 2021; Heming et al., 2022; IPCC, 2023).

Em última análise, o fortalecimento de políticas públicas e incentivos à produção de cacau sombreado é uma estratégia indispensável. Em um bioma reduzido a apenas 24% de sua cobertura



original, promover sistemas biodiversos é o caminho mais viável para conciliar a viabilidade socioeconômica da região com a conservação ambiental e a adaptação às mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal Goiano - Campus Posse.

A Universidade Federal do Sul da Bahia.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biossistemas.



REFERÊNCIAS

- Alves, B. J. R.; Urquiaga, S.; Jantalia, C. P.; Madari, B. E.; Marchão, R. L.; Boddey, R. M. Protocolo para medições de fluxos de gases de efeito estufa em solos agrícolas. Brasília, DF: Embrapa, 2017. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1074412>
- Bettiol, W. et al. Entendendo a matéria orgânica do solo. Brasília: Embrapa, 2023. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1144679>
- Butterbach-Bahl, K.; Gunderson, P.; Ambus, P.; Augustin, J.; Beier, C.; Boeckx, P.; Dannenmann, M.; Gimeno, B. S.; Ibrom, A.; Kiese, R.; Kitzler, B.; Rees, R. M.; Smith, K. A.; Stevens, C. J.; Vesala, T.; Zechmeister-Boltenstern, S. Nitrogen processes in terrestrial ecosystems. In: SUTTON, Mark A. et al. (Eds.). The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. p. 99-125.
- Filonchyk, M.; Hurynovich, V.; Yang, S.; Zhang, Z.; Li, Y. Agricultural greenhouse gas emissions and their drivers: a global perspective. Environmental Science and Pollution Research, Berlin, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32119-4>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. A Mata Atlântica em números: dados atualizados de cobertura florestal. São Paulo: SOS Mata Atlântica, 2025. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/causas/mata-atlantica/>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- Han, G.; Zhu, X. Changes in soil greenhouse gas fluxes by land use change from primary forest: a global meta-analysis. Global Change Biology, v. 26, p. 3220–3234, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14993>
- Heming, Neander Marcel; Schroth, Goetz; Talora, Daniela C.; Faria, Deborah. Cabruca agroforestry systems reduce vulnerability of cacao plantations to climate change in southern Bahia. Agronomy for Sustainable Development, v. 42, art. 48, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00780-w>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2^a ed. revisada e ampliada. p. 271, 2012.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: IPCC, 2015. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 13 dez. 2025.
- IPCC. 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. Geneva: IPCC, 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Kamyab, H.; SaberiKamarposhti, M.; Hashim, H.; Yusuf, M. Dinâmica de Carbono em Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa Agrícolas: Uma Revisão Abrangente. Carbono. Lett. 2024, 34, 265–289.
- Kouadio, K.A.L.; Kouakou, A.T.M.; Zanh, G.G.; Jagoret, P.; Bastin, J.-F.; Barima, Y.S.S. Estrutura Florística, Potenciais Estoques de Carbono e Dinâmica em Sistemas Agroflorestais Baseados em Cacau na Costa do Marfim (África Ocidental). Agrofor. Syst. 2024, 99, 12.



Lima, L. J. B.; Hamzagic, M. Greenhouse Gases and Air Pollution: Commonalities and Differentiators. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, São Paulo, 27 set. 2022. 102-144.

Masson-Delmotte et al. (eds.) (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press.

Maney, C. et al. Modelling biodiversity responses to land use in areas of cocoa-based agroforestry systems and open land systems. Agriculture, Ecosystems e Environment, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>

Mapanda, F.; Mupini, J.; Wuta, M.; Nyamangara, J.; Rees, R.M. Uma avaliação interecossistema dos efeitos da cobertura e do uso do solo sobre a emissão do solo de gases de efeito estufa selecionados e propriedades relacionadas do solo no Zimbábue. Eur. J. Soil Sci. 2010, 61, 721–733.

MAPBIOMAS. Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. São Paulo: MapBiomass, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 16 jan. 2026.

Mittermeier, R.A., Fonseca, G.A.B., Rylands, A.B., Brandon, K., 2005. A brief history of biodiversity conservation in Brazil. Conservation Biology 19, 601-611.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00709>.

Mudanças Climáticas do IPCC 2013: A Base das Ciências Físicas. contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas; Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, Reino Unido; Nova York, NY, EUA, 2013.

Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>.

Pinto, L. P. et al. A Mata Atlântica no sul da Bahia: composição florística, estrutura e conservação. Paubrasilia, v. 2, n. 1, p. 1–15, 2019.
<https://periodicos.ufba.br/index.php/paubrasilia/article/view/30890>

Rezende, C. L.; Scarano, F. R.; Assad, E. D.; et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. Science Advances, v. 4, n. 4, eaat9174, 2018.

Saputra, D. D. et al. Can cocoa agroforestry restore degraded soil structure following conversion from forest to agricultural use? Agroforestry Systems, v. 94, p. 2041–2054, 2020.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-020-00548-9>

Scarano, F. R.; Ceotto, P. Brazilian Atlantic Forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. Biodiversity and Conservation, v. 30, p. 1–16, 2015.

SOS MATA ATLÂNTICA; INPE. Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica período 2019-2020. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2022. Disponível em:
<https://www.sosma.org.br/iniciativas/atlas-da-mata-atlantica>.

SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica: Período 2022–2023. São Paulo: Fundação SOS



Mata Atlântica; São José dos Campos: INPE, 2024. Disponível em:
<https://www.sosma.org.br/projeto/atlas-da-mata-atlantica/>. Acesso em: 16 jan. 2026.

Sousa Neto, E. R.; Carmo, J. B.; Keller, M.; Martins, S. C.; Alves, L. F.; Vieira, S. A.; Piccolo, M. C.; Camargo, P. B. Soil–atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in the Atlantic Forest of Brazil. *Biogeosciences*, Göttingen, v. 8, n. 3, p. 733–742, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-8-733-2011>. Acesso em: 16 jan. 2026.

Sterling, A., Suárez-Córdoba, Y. D., Orlandi, F. D. B., & Rodríguez-León, C. H.. Soil–Atmosphere GHG Fluxes in Cacao Agroecosystems on São Tomé Island, Central Africa: Toward Climate-Smart Practices. *Land*, v. 14, n. 9, p. 1918, 2025.

Sterling, A., Suárez-Córdoba, Y. D., Orlandi, F. D. B., & Rodríguez-León, C. H.. Soil–Atmosphere GHG Fluxes in Cacao Agroecosystems on São Tomé Island, Central Africa: Toward Climate-Smart Practices. *Land*, v. 14, n. 9, p. 1918, 2025.

Suárez, L. R.; Suárez Salazar, J. C.; Casanoves, F.; Bieng, M. A. N. Cacao agroforestry systems improve soil quality: comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>

TINOCO-JARAMILLO, L. et al. Agroforestry systems of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the Ecuadorian Amazon. *Forests*, v. 15, 195, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15010195>

Wainaina, P. W. et al. A review of the trade-offs across different cocoa production systems: implications for sustainability and biodiversity conservation. *Sustainability*, v. 13, n. 19, 10945, 2021. <https://doi.org/10.3390/su131910945>

Wolf, S.; Paul-Limoges, E. Seca e calor reduzem a absorção de carbono nas florestas. *Comun Natural*. 2023, 14, 6217.

