INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

VAN GIAP RAMALHO CARDOSO

BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NOS BIOMAS CAATINGA E MATA ATLÂNTICA EM ALAGOAS, BRASIL

Marechal Deodoro – AL
2026

VAN GIAP RAMALHO CARDOSO

BALANÇO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NOS BIOMAS CAATINGA E MATA ATLÂNTICA EM ALAGOAS, BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia

Marechal Deodoro – AL

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
***Campus* Marechal Deodoro**
Biblioteca Dorival Apratto

363.7
C268b Cardoso, Van Giap Ramalho.
Balanço de emissões de gases de efeito estufa em sistemas agroflorestais nos biomas caatinga e mata atlântica em Alagoas, Brasil / Van Giap Ramalho Cardoso. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 2.321 KB). – 2026.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.
Modo de acesso: Internet.
Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Marechal Deodoro, Marechal Deodoro, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia.

1. Agricultura de baixo carbono. 2. GHG Protocol. 3. Agroecologia. 4. Mudanças climáticas. 5. Pegada de carbono. I. Maia, Stoécio Malta Ferreira. II. Título.

Andreia Gomes de Azevedo | Bibliotecária – CRB-4/AL-2164

VAN GIAP RAMALHO CARDOSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Aprovado em: 30/01/2026

Orientador:

Documento assinado digitalmente
STOECIO MALTA FERREIRA MAIA
Data: 19/03/2026 07:34:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia (Orientador)
Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
TAMARA CLAUDIA DE ARAUJO GOMES
Data: 20/03/2026 09:23:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Tamara Cláudia de Araújo Gomes
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa)

Documento assinado digitalmente
LUCAS SUASSUNA DE ALBUQUERQUE WANDER
Data: 19/03/2026 09:04:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Lucas Suassuna de Albuquerque Wanderley
Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

Documento assinado digitalmente
CRISLANY CANUTO DOS SANTOS
Data: 19/03/2026 07:42:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Crislany Canuto dos Santos

Marechal Deodoro – AL

2026

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não é um mérito individual, mas o resultado de uma caminhada trilhada com o apoio, a paciência e a inspiração de muitas mãos e corações.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Stoécio Maia, pela confiança depositada, pela condução brilhante deste estudo e pela partilha de conhecimento, que foi fundamental para o meu amadurecimento acadêmico e profissional.

Ao meu pai, Ricardo Ramalho, meu maior exemplo de integridade e dedicação. Sua trajetória de vida de amor e defesa da Natureza é o que guia e sua inspiração é o alicerce de todas as minhas conquistas.

À minha querida mãe Rosilene Ramalho, pelo cuidado zeloso e apoio irrestrito em todas as fases da minha vida. Seu amor incondicional foi a força silenciosa que me permitiu chegar até aqui.

À minha amada esposa Juliana e aos meus filhos (Luan, Anita e Inez), por serem meu porto seguro e a razão de todo o meu esforço. Agradeço pela compreensão nas horas de ausência, pelo incentivo nos momentos de cansaço e por preencherem meus dias com alegria e propósito. Vocês são o meu bem mais precioso.

Ao programa PPGTEC do IFAL e a todo o corpo docente, pela excelência no ensino e pela oportunidade de imersão em um ambiente de constante inovação e aprendizado técnico-científico.

Aos agricultores familiares que abriram as porteiras de suas propriedades e de suas vidas para esta pesquisa. Sem a sua colaboração, o conhecimento aqui gerado não teria o mesmo sentido. Agradeço por preservarem a terra e por serem os verdadeiros guardiões dos sistemas que este trabalho buscou compreender.

Por fim, agradeço à Natureza, mestre maior desta pesquisa, e a todas as forças do universo que conspiraram a favor deste ciclo. Que este estudo possa retribuir, ainda que minimamente, toda a abundância e o equilíbrio que a vida nos oferece.

CARDOSO, Van Giap Ramalho. **Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Sistemas Agroflorestais nos Biomas Caatinga e Mata Atlântica em Alagoas, Brasil**. 109 f. 2026. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – *campus* Marechal Deodoro, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, 2026.

RESUMO

O agravamento das mudanças climáticas, promovidas pelo aumento das emissões de gases do efeito estufa – GEE, intensifica a demanda por sistemas produtivos resilientes e mitigadores. No Brasil, o setor de agropecuária e mudança de uso da terra responde por cerca de dois terços das emissões nacionais, o que posiciona os Sistemas Agroflorestais (SAFs) como tecnologia-chave do Plano ABC+ (2020–2030). Este estudo objetivou estimar, analisar e comparar o balanço de GEE, para um horizonte de 40 anos, em 16 propriedades com SAFs localizadas nos biomas Mata Atlântica e Caatinga, em Alagoas. Utilizou-se a metodologia do GHG Protocol (Ferramenta Florestas e SAFs) para inventariar emissões e remoções. As emissões operacionais médias foram de 44,57 t CO_2e ha^{-1}, compostas 51% pelo Escopo 1 (calagem, adubação orgânica e consumo de combustíveis fósseis para maquinário), 45% Escopo 2 (energia elétrica) e 4% por processos biogênicos. Em contrapartida, a conversão de áreas degradadas e monocultivos em SAFs gerou um potencial de remoção expressivo via Mudança de Uso e Ocupação do Solo (MUOS) e fluxos biogênicos. A remoção média estimada foi de –304,83 t CO_2e ha^{-1}, com os maiores valores absolutos registrados na Mata Atlântica (–370,73 t CO_2e. ha^{-1}) e a maior eficiência individual por planta na Caatinga (–0,53 t CO_2e $planta^{-1}$). Práticas agroecológicas de manejo sucessional, alta densidade arbórea e aporte de biomassa via podas correlacionaram-se com as maiores taxas de sequestro de C. Os resultados confirmam que os SAFs avaliados atuam como sumidouros líquidos de carbono, apresentando-se como uma estratégia de mitigação superior aos sistemas convencionais e fundamental para a descarbonização da agricultura regional.

Palavras-chave: agricultura de baixo carbono; GHG Protocol; agroecologia; mudanças climáticas; pegada de carbono.

CARDOSO, Van Giap Ramalho**. Greenhouse Gas Emissions Balance in Agroforestry Systems in the Caatinga and Atlantic Forest Biomes in Alagoas, Brazil**. 109 f. 2026. Master's Thesis (Master's Degree in Environmental Technologies) – *campus* Marechal Deodoro, Federal Institute of Alagoas, Marechal Deodoro, 2026.

ABSTRACT

The escalation of climate change, promoved by increasing of greenhouse gas (GEE) emition intensifies the demand for resilient and mitigating production systems. In Brazil, the agriculture and land-use change sectors account for approximately two-thirds of national emissions, positioning Agroforestry Systems (AFS) as a key technology within the ABC+ Plan (2020–2030). This study aimed to estimate, analyze and compare the Greenhouse Gas (GHG) balance over a 40-year horizon for 16 properties practicing AFS across the Atlantic Forest and Caatinga biomes in Alagoas, Brazil. The GHG Protocol methodology (Brazil Forests and AFS Tool) was applied to inventory emissions and removals. Average operational emissions were 44.57 t CO_2e ha^{-1}, primarily composed of Scope 1 (liming, organic fertilization, and fossil fuel consumption for machinery) and Scope 2 (purchased electricity). In contrast, the conversion of degraded pastures and conventional monocultures into AFS generated significant removal potential through Land Use and Land Change (LULUCF) and biogenic fluxes. The estimated average removal was –304.83 t CO_2e ha^{-1}, with higher absolute values recorded in the Atlantic Forest (–370.73 t CO_2e ha^{-1}) and greater individual tree efficiency in the Caatinga (–0.53 t CO_2e. $tree^{-1}$). Management agroecology practices such as successional planting, high tree density, and biomass input through pruning were correlated with the highest sequestration rates. The results confirm that the evaluated AFS act as net carbon sinks, representing a superior mitigation strategy compared to conventional systems and a fundamental tool for regional agricultural decarbonization.

Keywords: low-carbon agriculture; GHG Protocol; agroecology; climate change; carbon footprint.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABC – Agricultura de baixa emissão de carbono

AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Uses (Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra)

FGV – Fundação Getúlio Vargas

GEE – Gases de Efeito Estufa

GHG – Greenhouse Gás Protocol

HFC – Gases hidrofluorcarbonos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografria e Estatística

ILP – Integração Lavoura-Pecurária

ILPF – Integração Lavoura-Pecurária-Floresta

IPF – Integração Pecuária-Floresta

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

LULUCF – Land Use, Land-Use Change, and Forestry

MUOS – Mudança de Uso e Ocupação do Solo

ONU – Organização das Nações Unidas

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SAF – Sistema Agroflorestal

SPSABC – Sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis

t CO_2e – Tonelada de dióxido de carbono equivalente

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização geográfica dos SAFs analisados. 24
Figura 2. Balanço geral de estimativas de emissões líquidas de GEE por hectare (A) e por planta (B) e desvios padrão, geral e por bioma, em toneladas de CO_2 equivalente, para um período de 40 anos..... 32
Figura 3. Contribuição relativa (%) dos escopos de emissão de CO2 eq./hectare nos 16 SAFs estudados. 41
Figura 4. Comparação das estimativas de emissões de GEE por escopo e total (com desvios padrão), entre os biomas Caatinga e Mata Atlântica..... 42
Figura 5. Sequestro de Carbono[1] (t CO_2e ha^{-1}) por mudança de uso e ocupação do solo, distribuído na biomassa e no solo, em sistemas agroflorestais, nos biomas Caatinga e Mata Atlântica, em Alagoas. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Balanço de GEE por hectare e por planta, densidade de árvores e adubação verde por fazenda em sistemas agroflorestais nos biomas Caatinga e Mata Atlântica. 35
Tabela 2. Estimativas de emissões e remoções de GEE por área cultivada, nos biomas Caatinga e Mata Atlântica por escopo (1 e 2), emissão/remoção biogênica e por mudança de uso e ocupação do solo (MUOS)..... 38
Tabela 3. Avaliação comparativa das emissões de GEE[1], por área (hectare) cultivada (AC) e por árvore plantada (AP), em toneladas de CO_2e, em sistemas agroflorestais inseridos nos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA)..... 43
Tabela 4. Emissões de gases de efeito estufa do Escopo 1 por tipo de fonte (em t CO_2e/hectare), em SAFs dos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA)..... 44
Tabela 5. Remoções acumuladas[1] de GEE (t.CO_2e) por processos biogênicos e mudança de uso do solo em SAFs, por área cultivada (AC) e árvore plantada (AP), nos biomas Mata Atlântica (MA) e Caatinga (CT), em Alagoas. 49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
2. OBJETIVOS 15
2.1. Geral 15
2.2. Específicos 15
3. REVISÃO DE LITERATURA 16
3.1. Mudanças Climáticas e Emissões de Gases de Efeito Estufa 16
3.2. Sistemas Agroflorestais e a Mitigação das Emissões 16
3.3. Os Biomas Caatinga e Mata Atlântica no Contexto Climático 21
3.4. O GHG Protocol para Florestas e Sistemas Agroflorestais 22
4. MATERIAL E MÉTODOS 24
4.1. Áreas de estudo 24
4.2. Levantamento de fontes de emissão – coleta de dados 25
4.2.1. Caracterização florística e densidade de espécies 26
4.2.2. Estimativas de emissões e remoções de GEE (GHG Protocol): escopos, recorte temporal e fluxos biogênicos 27
4.2.2. Parâmetros assumidos 28
4.3. Análise estatística 30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
5.1. Balanço geral de emissões líquidas 31
5.2. Fontes de Emissão de GEE 40
5.3. Remoções de gases de efeito estufa (GEE) 48
6. CONCLUSÃO 52
7. REFERÊNCIAS 54
APÊNDICE 1- LISTA DE ESPÉCIES DOS SAFS E DENSIDADE (ÁRVORES·HA^{-1}) POR PROPRIEDADE 60
APÊNDICE 2- PRODUTO TÉCNICO/TECNOLÓGICO – MANUAL/PROTOCOLO 70

1. INTRODUÇÃO

O avanço das mudanças climáticas, impulsionado pelo aumento da concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera e aquecimento global, preocupa a comunidade científica internacional. Nesse contexto, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima (IPCC) reúne especialistas para monitorar a temperatura global, identificar as principais fontes de emissão e concentrações de GEE, além de realizar previsões e propor estratégias para mitigar os impactos climáticos (IPCC, 2024).

No Brasil em 2020, os setores Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas, Agropecuária e Energia tiveram participação em 38,0%, 28,5% e 23,2% nas emissões totais, respectivamente, de acordo com as Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022). Dentre as estratégias que vem sendo empregadas para mitigação de GEE pelo governo brasileiro destaca-se adoção de Tecnologias para Agricultura de Baixa Emissão de Carbono – Tec ABC. A agricultura de baixa emissão de carbono é aquela capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) provenientes da atividade agropecuária através de práticas agrícolas e tecnologias capazes de diminuir a intensidade de emissões ou promover o sequestro de C (GURGEL & LAURENZANA 2016).

Em 2010, foi elaborado pelo Governo Federal do Brasil o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC). O Plano ABC teve por finalidade a organização e o planejamento de ações a serem realizadas para a adoção de tecnologias de produção sustentáveis com ganhos produtivos e baixa emissão de carbono entre os anos de 2010 e 2020. Devido ao seu sucesso, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) lançou em abril de 2021 o Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (ABC+), a ser executado de 2020 a 2030, com vistas à consolidação de uma agropecuária nacional alicerçada sobre sistemas sustentáveis, resilientes e produtivos (MAPA 2021).

Nesta segunda fase, o ABC+ continuará a agir como um instrumento promotor de uma agropecuária sustentável, considerando uma abordagem integrada da paisagem e contribuindo para a mitigação de gases de efeito estufa. Para tal, reforçam-se as estratégias de sucesso adotadas e consolidadas no primeiro ciclo (2010-2020), focadas no estímulo à adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis (SPSABC), fundamentados sobre bases técnico-científicas, considerados no ciclo anterior, quais sejam: (i) sistemas em integração (nas modalidades Integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF, Integração

Lavoura-Pecuária - ILP, Integração Pecuária-Floresta - IPF e Sistemas Agroflorestais - SAFs) e em plantio direto (SPD); (ii) fixação biológica do nitrogênio (FBN); (iii) florestas plantadas; (iv) recuperação de pastagens degradadas; e (v) tratamento de dejetos animais (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023).

Os SAFs são modelos de agricultura que buscam replicar os princípios e processos ecológicos observados em ambientes naturais que servem de base na formação e manutenção dos ecossistemas, favorecendo a abundância de recursos para a criação de mais quantidade e qualidade de vida. Dessa forma, o sistema vai tomando complexidade na medida da composição do material orgânico oferecido ao solo. São agroecossistemas que consorciam, em uma mesma área, espécies florestais e culturas agrícolas, forrageiras e/ou produção animal. Nos SAF's, o componente central são as árvores e todos os demais elementos de produção são planejados e distribuídos dentro da área de manejo em função desse componente (POLETTO et al., 2020). Conforme destaca Götsch (1994), nos sistemas agroflorestais, as dinâmicas de sucessão natural devem ser incorporadas à agricultura, favorecendo, tal como em uma floresta, o estabelecimento de ecossistemas com níveis de organização cada vez mais amplos e, segundo suas conclusões, a saúde da planta não depende exclusivamente do tratamento dado a ela como indivíduo. Tampouco se resume a rotação de culturas ou consórcios. É preciso considerar o ecossistema por completo, tanto as relações intraespecíficas quanto as interespecíficas (AGENDA GOTSCH, 2024). Os benefícios desse sistema de cultivo transcendem as barreiras do meio ambiente e da produção de alimentos, englobando também questões socioeconômicas, pois os SAF's almejam o desenvolvimento sustentável, permitindo a melhoria da qualidade de vida das populações locais e a preservação dos recursos naturais para as gerações futuras (Machado Filho; Silva, 2012).

Os SAFs desempenham um papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas, atuando de duas formas: remoção direta de CO_2 atmosférico e as emissões evitadas. No semiárido brasileiro, a conversão de áreas nativas para cultivos convencionais com revolvimento intenso do solo interrompe a proteção física da matéria orgânica, resultando em perdas severas que podem atingir 17% do estoque de carbono orgânico do solo (COS) em 20 anos e até 26% em um horizonte de 40 anos (Medeiros; Maia, 2020). Ao implementar um SAF, essa trajetória de degradação é cessada, evitando que o carbono estocado em agregados estáveis seja oxidado e liberado para a atmosfera (Lal, 2004; Medeiros *et al*., 2023).

Além de preservar os estoques edáficos, os SAFs mitigam emissões indiretas de alto impacto. A cobertura permanente do solo e o componente arbóreo reduzem em cerca de 84% a perda de carbono via sedimentos e erosão hídrica em comparação ao manejo intensivo (MAIA et al., 2010). Adicionalmente, a integração de leguminosas favorece a Fixação Biológica de

Nitrogênio (FBN), o que reduz a dependência de fertilizantes sintéticos e, consequentemente, evita a emissão de óxido nitroso N_2O. De acordo com as métricas adotadas pelo GHG Protocol, este gás possui um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 298 vezes superior ao do CO_2 para um horizonte de 100 anos (IPCC, 2013). Essa capacidade de transformar áreas degradadas em sumidouros ativos que podem superar os estoques da vegetação nativa (Maia *et al*., 2019), constitui o "coração" da transição para uma agropecuária de baixo carbono.

Para quantificar com rigor esse balanço entre emissões evitadas e remoções biogênicas, alinhando-se às diretrizes do Plano ABC+ (2020-2030), torna-se indispensável o uso de protocolos de inventário robustos. Nesse cenário, o GHG Protocol surge como o elo necessário para traduzir o desempenho biofísico dos sistemas em métricas de mitigação reconhecidas internacionalmente. No Brasil, essa demanda resultou na criação das Diretrizes Agrícolas Brasileiras (DAB) e da ferramenta de cálculo desenvolvida pelo World Resources Institute (WRI), em parceria com Embrapa e Unicamp.

Embora as diretrizes originais tenham focado em fontes mecânicas e pecuária, a necessidade de atender às particularidades do setor florestal levou à criação da Ferramenta de Cálculo para Balanço de GEE em Florestas e SAFs (WRI BRASIL, 2024). Desenvolvida especificamente para a realidade nacional e baseada em dados científicos brasileiros, essa ferramenta permite estimar fluxos de GEE em plantações homogêneas e sistemas agroflorestais multidiversos, incorporando fatores de emissão para 307 espécies. Assim, o uso desse recurso técnico garante a consistência metodológica necessária para avaliar o impacto ambiental dos SAFs nos biomas de Alagoas, fundamentando sua eficiência na gestão de emissões e no aumento da produtividade sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Estimar, analisar e comparar as emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) em sistemas agroflorestais (SAFs) localizados nos biomas Mata Atlântica e Caatinga, no estado de Alagoas

2.2. Específicos

- Aplicar as ferramentas do GHG protocol para determinar as emissões de GEE em fazendas com SAFs nos biomas Caatinga e Mata Atlântica de Alagoas;
- Realizar o levantamento e compilação de dados agronômicos e florestais de diferentes SAFs nos biomas Caatinga e Mata Atlântica de Alagoas;
- Calcular a pegada de carbono dos diferentes sistemas agroflorestais analisados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Mudanças Climáticas e Emissões de Gases de Efeito Estufa

A intensificação do efeito estufa e suas consequências para o clima global têm sido atribuídas, prioritariamente, às atividades humanas, com destaque para os setores de energia, indústria, processos industriais e transportes. No entanto, o setor de Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas (LULUCF – sigla em inglês), juntamente com a agropecuária, desempenha um papel ambivalente e crítico nesse cenário (IPCC, 2021). No Brasil, o setor LULUCF é historicamente um dos principais responsáveis pelas emissões nacionais, especialmente devido à conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas e pastagens, processo que resulta na oxidação e liberação de grandes estoques de carbono orgânico do solo para a atmosfera (Medeiros; Maia, 2020; Santos *et al*., 2024). Paralelamente, a atividade agropecuária contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), notadamente o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Essas emissões são oriundas de processos como a queima de combustíveis fósseis em máquinas agrícolas, a fermentação entérica em ruminantes, o manejo de dejetos animais e, de forma acentuada, a aplicação de fertilizantes nitrogenados (Maia *et al*., 2022; Cerri *et al*., 2025). Em regiões tropicais e semiáridas, o impacto dessas atividades é potencializado pela degradação da matéria orgânica do solo, tornando a adoção de sistemas conservacionistas uma estratégia urgente para a mitigação climática (Assis *et al*., 2011; Maia *et al*., 2019).

O setor agropecuário é um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil e no mundo. Segundo o relatório do IPCC (2019), o setor denominado Agricultura, Florestas e Uso da Terra (AFOLU) responde por aproximadamente 23% das emissões globais de GEE, considerando emissões diretas da agricultura e mudanças no uso da terra, como desmatamento e degradação florestal. Apesar de ser um importante emissor, o setor agropecuário também oferece grande potencial de mitigação, por meio da adoção de práticas como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), sistemas agroflorestais (SAFs), plantio direto, restauração de pastagens degradadas, entre outras estratégias de agricultura de baixo carbono (Assis *et al*., 2011; Maia *et al*., 2022; Cerri *et al*., 2025).

3.2. Sistemas Agroflorestais e a Mitigação das Emissões

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) configuram-se como estratégias sustentáveis de uso da terra, que integram espécies arbóreas perenes com culturas agrícolas e, eventualmente, com a criação de animais, em uma mesma unidade de manejo. Essa integração promove interações ecológicas positivas entre os componentes do sistema, resultando em sinergias produtivas,

ecológicas e sociais (Gliessman, 2021). Os SAFs se destacam pela capacidade de restaurar a fertilidade do solo, proteger a biodiversidade e promover serviços ecossistêmicos cruciais, entre os quais se encontra a mitigação das mudanças climáticas (Penereiro, 1999; AGENDA GOTSCH, 2024).

Em contraste com os sistemas convencionais de monocultura, geralmente dependentes de insumos externos e causadores de degradação ambiental, os SAFs operam com base em princípios ecológicos fundamentais, como estratificação vertical da vegetação, sucessão ecológica planejada, adensamento funcional, uso eficiente da luz e cobertura permanente do solo. Segundo Nair (1993), os SAFs integram diversas espécies de plantas de diferentes estratos, promovendo a diversidade biológica e o aproveitamento eficiente dos recursos naturais, o que resulta em maior resiliência ambiental e aumento do sequestro de carbono. Altieri (2012) também destaca que esses sistemas, ao replicar processos naturais, favorecem a ciclagem de nutrientes e a recuperação da fertilidade do solo, ao mesmo tempo em que minimizam o uso de insumos externos e reduzem os impactos ambientais. A literatura aponta que o sequestro de carbono nos SAFs está diretamente associado a dinâmica ecológica dos sistemas vegetais e ao estado sucessional das plantas presentes, como evidenciado nos estudos de Gliessman (2021) e Bunch (1982), que enfatizam o papel desses sistemas no armazenamento de carbono e na melhoria da qualidade do solo.

A mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em sistemas agroflorestais ocorre por dois mecanismos principais: (i) as emissões evitadas, por meio da substituição de práticas agrícolas intensivas que são altamente emissoras; e (ii) a remoção ativa de carbono da atmosfera, promovida pelo crescimento da biomassa vegetal e pelo aumento dos estoques de matéria orgânica no solo. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019), “sistemas agroflorestais bem manejados removem carbono da atmosfera e reduzem a necessidade de fertilizantes nitrogenados, contribuindo para menores emissões líquidas”. Nesse mesmo sentido, a FAO (2017) reconhece que “a integração de árvores em sistemas agrícolas pode aumentar substancialmente o estoque de carbono, além de melhorar a resiliência climática dos sistemas de produção”.

A literatura nacional corrobora essa perspectiva. Ferreira e Aguiar (2021) apontam ainda que a substituição de monoculturas por sistemas diversificados reduz significativamente as emissões associadas à mecanização intensiva, à queima de resíduos e à dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos. De acordo com Almeida (2023) em estudo que aplicou a metodologia do GHG Protocol – Florestas e Uso da Terra demonstram que os SAFs apresentam balanços líquidos negativos de carbono, atuando como sumidouros de GEE. Em propriedades rurais que migraram de monoculturas para sistemas agroflorestais, os resultados apontam para

remoções médias entre -200 e -400 t CO_2eq por hectare ao longo de 20 a 40 anos, respecivamente (Leite *et al*., 2020; GHG PROTOCOL, 2022). Em contextos com alta densidade arbórea, como nos sistemas agroflorestais sintrópicos descritos por Götsch (1994), esses valores podem ser ainda superiores.

No componente edáfico, contudo, é necessário qualificar a interpretação: usos convencionais e pastagens degradadas não devem ser tratados como sistemas que "sequestram menos", mas, com frequência, como usos que induzem perdas líquidas de carbono do solo, sobretudo em ambientes semiáridos e em solos arenosos. Nesse sentido, Medeiros *et al*. (2021) estimaram que a conversão Caatinga–pastagem no semiárido, considerando 0-30 cm em 20 anos, resulta em fator de mudança de 0,75 (±0,11), correspondente a perda média de 25% do carbono orgânico do solo em relação à Caatinga. Em Alagoas, resultados convergentes indicam perdas em sistemas convencionais em Delmiro Gouveia e Pariconha, com tendência média de redução da ordem de 0,591 Mg C ha^{-1} ano^{-1} (0-30 cm), e forte dependência da textura, com perdas mais intensas em solos arenosos (Maia *et al*., 2015). Ainda no semiárido alagoano, Medeiros et al. (2023) observaram reduções de até 28,9% (0-30 cm) em Arenosols sob lavoura e perdas também em Regosols, enquanto Argissolos mais argilosos podem apresentar manutenção relativa em séries longas.

Em escala regional, a síntese de Greschuk *et al*. (2025) para as terras secas brasileiras mostra que sistemas integrados com componente arbóreo (incluindo arranjos agroflorestais e silvipastoris) apresentam estoques médios de carbono orgânico do solo próximos aos da vegetação nativa e superiores aos de lavouras. No perfil 0-50 cm, os estoques médios foram 87,6 Mg C ha^{-1} em sistemas integrados, 86,6 Mg C ha^{-1} na vegetação nativa e 60,3 Mg C ha^{-1} em lavouras; no perfil 0-30 cm, 60,2 Mg C ha^{-1}, 59,3 Mg C ha^{-1} e 46,1 Mg C ha^{-1}, respectivamente (Greschuk *et al*., 2025).

No semiárido cearense, estudos experimentais evidenciam que o efeito sobre os estoques de carbono do solo depende criticamente do grau de distúrbio e do manejo da biomassa, mesmo em sistemas com componente arbóreo. Maia *et al*. (2007) registraram, no perfil 0-40 cm, 73,63 Mg C ha^{-1} na Caatinga e 68,65 Mg C ha^{-1} no sistema silvipastoril (SILV), enquanto sistemas mais perturbados apresentaram menores estoques, como 49,08 Mg C ha^{-1} no agrossilvipastoril (AGP) e 44,31 Mg C ha^{-1} no cultivo intensivo (IC). Em consonância, Maia et al. (2006) observaram perdas expressivas de carbono orgânico total na camada 0-6 cm em tratamentos com revolvimento, com reduções de 40,3% (cultivo intensivo), 38,4% (agrossilvipastoril) e 35% (tradicional), ao passo que o silvipastoril, sem revolvimento, manteve teores próximos aos da referência nativa.

Além do componente do solo, o incremento de carbono na biomassa em SAFs varia

com o arranjo e a idade do sistema. Na Mata Atlântica, Torres *et al*. (2014) reportaram, para SAFs multiestrata no Vale do Ribeira (SP), incrementos médios de carbono acima do solo de 7,96 t C ha^{-1} ano^{-1} (4 anos), 4,43 t C ha^{-1} ano^{-1} (8 anos) e 1,86 t C ha^{-1} ano^{-1} (16 anos), evidenciando maior incremento em fases iniciais e desaceleração com a maturação do sistema.

Conforme demonstrado por Almeida (2023), os SAFs, ainda que em pequena escala, contribuem de forma significativa para a mitigação das mudanças climáticas ao atuarem como sumidouros de carbono. Na propriedade analisada, a área sob SAF foi responsável por uma remoção líquida de 18,53 t CO_2e por ano, evidenciando o potencial dessas práticas na transição para uma pecuária de baixo carbono. A autora destaca que a presença de espécies lenhosas integradas à pastagem aumenta a capacidade de sequestro de carbono na biomassa e no solo, reforçando o papel estratégico dos SAFs na compensação das emissões provenientes da agricultura e pecuária convencionais. A análise geral revelou que, mesmo diante de emissões expressivas nas áreas de pastagem e lavoura, o somatório das remoções pelas áreas florestais, reservas legais e SAFs foi suficiente para gerar um balanço climático líquido negativo na propriedade, caracterizando-a como um sumidouro de carbono.

O sequestro de carbono nos sistemas agroflorestais ocorre por meio de diferentes processos ecológicos. O acúmulo de biomassa arbórea, em função da presença de espécies perenes com alta taxa fotossintética, promove a fixação contínua de CO_2 atmosférico. Ao mesmo tempo, o aporte de material orgânico ao solo, derivado de raízes profundas, serrapilheira e resíduos das podas, favorece a formação de húmus e a agregação do solo, aumentando sua capacidade de retenção de carbono e resiliência hidrológica (Penereiro, 1999).

Práticas como a poda estratégica e o sombreamento sucessional, amplamente aplicadas nos sistemas agroflorestais, mantêm o agroecossistema em uma fase constante de crescimento ativo, o que maximiza o fluxo de carbono no sistema. Para Götsch (1994), “a poda acelera o crescimento de todo o sistema” e serve como mecanismo de rejuvenescimento ecológico, intensificando a produtividade e a dinâmica da sucessão vegetal.

Para além da mitigação direta de GEE, os SAFs oferecem co-benefícios ambientais e climáticos associados ao funcionamento ecológico e à complexidade estrutural desses sistemas. Franco et al. (2002) destacam, entre os efeitos mais relevantes, a redução da erosão e o aumento da infiltração e retenção de água e nutrientes no solo; na Zona da Mata de Minas Gerais, os autores observaram que as perdas de solo e nutrientes em SAFs foram substancialmente menores que em sistemas convencionais, evidenciando seu potencial para a conservação edáfica e a sustentabilidade produtiva. Esse papel conservacionista também é corroborado por evidências em SAFs cacaueiros no sul da Bahia, nos quais a serapilheira acumulada pode ser igual ou superior à de áreas de mata, com predominância de folhas e fragmentos (59 a 80% da

massa), ampliando o “capital” de carbono orgânico e de nutrientes retidos na superfície do solo; além disso, as folhas representam a fração mais expressiva (≈78%) e concentram mais de 70% do conteúdo total de nutrientes, indicando que a manutenção do componente arbóreo e da serapilheira é determinante para a ciclagem e para a conservação da fertilidade (Fontes, 2006). Em complemento, Junqueira *et al*. (2013) e Balbino et al. (2012) apontam que os SAFs favorecem a regulação microclimática, atenuando extremos térmicos e melhorando as condições de umidade no dossel e no solo, ao mesmo tempo em que ampliam a biodiversidade funcional; essa maior diversidade e complexidade são centrais para fortalecer serviços ecossistêmicos como controle biológico de pragas, polinização e ciclagem de nutrientes, ao aumentar habitat, recursos alimentares e conectividade para inimigos naturais e polinizadores, além de favorecer maior aporte e decomposição de resíduos orgânicos (Nair, 1993; Fontes, 2006; Altieri, 2012; Vasconcellos; Beltrão, 2018). Nesse contexto, SAFs com leguminosas de sombra tendem a apresentar material vegetal de maior qualidade nutricional (com maiores concentrações de N e P), acelerando a decomposição e o turnover de nutrientes (k entre 0,46 e 1,11 ano^{-1}), o que contribui para maior eficiência de reciclagem interna e menor dependência de insumos externos (Fontes, 2006). Por fim, Schembergue *et al*. (2017) ressaltam que a adoção de SAFs pode reduzir a vulnerabilidade climática de municípios brasileiros, ao mesmo tempo em que promove ganhos em produtividade e conservação de recursos naturais.

Os autores Vasconcellos e Beltrão (2018) analisaram diferentes modelos de sistemas agroflorestais — multiestrato, aleias, taungya e cercas-vivas — com base em indicadores ambientais relacionados aos serviços ecossistêmicos de provisão, regulação, suporte e culturais. Os autores concluem que o modelo multiestrato apresenta o maior potencial de prestação de serviços, destacando-se pela elevada biomassa, diversidade biológica e regulação do ciclo hidrológico. Já os sistemas em aleias e taungya apresentam desempenho intermediário, variando conforme o grau de sucessão ecológica e a densidade das espécies. As cercas-vivas demonstram eficácia limitada, sendo mais relevantes para contenção da erosão. O estudo reforça que a complexidade estrutural e funcional dos SAFs é determinante para sua contribuição aos serviços ecossistêmicos e que indicadores ambientais podem apoiar o planejamento de políticas públicas e programas de pagamento por serviços ambientais.

Adicionalmente, a menor dependência de insumos externos – como fertilizantes, agrotóxicos e combustíveis fósseis – implica em uma redução significativa das emissões associadas às cadeias produtivas industriais, tornando os SAFs não apenas regenerativos do ponto de vista ecológico, mas também energeticamente eficientes (Schembergue *et al*., 2017; Puttini *et. al*. 2024). Tais características tornam esses sistemas especialmente apropriados para pequenos produtores em regiões suscetíveis à degradação ambiental e vulnerabilidade

socioeconômica, funcionando como estratégia de segurança climática e alimentar.

A fundamentação científica aqui apresentada evidencia que os sistemas agroflorestais constituem uma alternativa técnica e ambientalmente robusta para a mitigação das mudanças climáticas, especialmente quando implementados como estratégia de conversão de áreas previamente manejadas sob sistemas convencionais de monocultivo e/ou pastagens, sobretudo degradadas. Nesses contextos, a adoção de SAFs tende a representar uma mudança de trajetória do uso da terra, reduzindo processos associados à degradação (como perdas de carbono do solo, menor cobertura permanente e dependência de insumos externos) e promovendo remoção líquida de CO_2 por meio do incremento de biomassa arbórea e da recomposição de estoques de carbono no solo, destacando seu papel estratégico na transição para uma agricultura de baixo carbono.

3.3. Os Biomas Caatinga e Mata Atlântica no Contexto Climático

Os biomas Caatinga e Mata Atlântica representam dois importantes sistemas ecológicos do território brasileiro, com características climáticas, ecológicas e socioeconômicas distintas. Ambos exercem papel crucial na dinâmica do carbono, no ciclo hidrológico e na oferta de serviços ecossistêmicos, sendo, portanto, altamente relevantes para estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas globais.

A Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, ocupa cerca de 10% do território nacional e predomina na região Nordeste. Caracteriza-se por clima semiárido, baixa precipitação anual (300–800 mm), chuvas irregulares e elevadas temperaturas médias superiores a 25 °C (Silva *et al*., 2017). Essas condições impõem limitações à produção agrícola convencional, mas favorecem o desenvolvimento de sistemas produtivos resilientes, como os SAFs adaptados ao semiárido. Além disso, a vegetação da Caatinga, apesar de sazonalmente caducifólia, apresenta grande capacidade de rebrota e adaptação hídrica, o que a torna estratégica para projetos de restauração ecológica e sequestro de carbono em áreas vulneráveis (Ferreira; Aguiar, 2021).

Conforme Costa *et al*. (2025), a Caatinga destacou-se no período de 2015 a 2022 por apresentar sinais consistentes de aumento de precipitação e de intensificação da atividade fotossintética (estimada por proxy de fluorescência induzida pelo sol – SIF), fatores associados a maiores remoções de carbono nos ecossistemas. Os autores também indicam que, em 2022, a remoção atribuída à Caatinga representou quase metade das remoções nacionais, segundo as estimativas do inventário Climate TRACE, reforçando a relevância do bioma no balanço climático do país e seu potencial de contribuição para metas de neutralidade, especialmente em cenários de redução do desmatamento e da conversão de uso da terra (Costa *et al*., 2025).

Em contraste, a Mata Atlântica, bioma que originalmente cobria mais de 1,3 milhão de

km² ao longo do litoral brasileiro, encontra-se atualmente reduzida a cerca de 12,4% de sua extensão original, devido à intensa pressão antrópica (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2023). Apesar de sua fragmentação, a Mata Atlântica é reconhecida como hotspot global de biodiversidade e apresenta elevado potencial de sequestro de carbono, especialmente em áreas de regeneração natural e sistemas agroflorestais de alta diversidade (Leite *et al*., 2020). O clima predominante é tropical úmido, com precipitação anual geralmente superior a 1.200 mm e temperaturas amenas, condições que favorecem alta produtividade primária líquida e acúmulo de biomassa aérea e subterrânea (Nobre *et al*., 2019).

De acordo com Bieluczyk *et al*. (2023), estudos realizados em áreas de floresta nativa da Mata Atlântica indicam que esse bioma possui um alto potencial de estocagem de carbono, podendo acumular mais de 100 toneladas de carbono por hectare quando consideradas as frações aérea e subterrânea da biomassa. Os autores também observaram que processos de restauração florestal com espécies arbóreas proporcionam um acréscimo mais expressivo no sequestro de carbono quando comparados à recuperação de áreas de pastagem, anteriormente degradadas.

Estudos comparativos indicam que, enquanto os SAFs implantados na Caatinga tendem a ter menor acúmulo absoluto de biomassa por hectare, compensam esse aspecto com maior eficiência relativa por planta e maior estabilidade diante de estresses climáticos (Almeida, 2023). Já os SAFs da Mata Atlântica, em razão de condições edafoclimáticas mais favoráveis, apresentam maiores taxas absolutas de remoção de CO_2 por hectare, mas também maior variabilidade estrutural entre unidades produtivas, o que reflete desafios de manejo, adensamento e escolha de espécies (Götsch, 1994; D'Angelis, 2024).

Nesse sentido, a compreensão das especificidades climáticas e ecológicas de cada bioma é fundamental para orientar o planejamento e avaliação de políticas públicas voltadas à agricultura de baixo carbono. Tanto a Caatinga quanto a Mata Atlântica apresentam potencial significativo para integrar práticas de uso sustentável da terra com mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente por meio de sistemas agroflorestais bem manejados e adaptados às realidades locais.

3.4. O GHG Protocol para Florestas e Sistemas Agroflorestais

O *GHG Protocol* é uma metodologia amplamente reconhecida internacionalmente para contabilização de emissões e remoções de GEE. A versão voltada para Florestas e Sistemas Agroflorestais foi adaptada para o contexto brasileiro e tem sido utilizada para estimar as emissões de pequenas e grandes propriedades rurais (WRI BRASIL, 2020).

O protocolo organiza o relatório de emissões em três escopos, classificados conforme o

grau de responsabilidade ou controle da unidade inventariada sobre as fontes emissoras — sejam elas diretas, pertencentes ou controladas pelo(a) agricultor(a), ou indiretas, pertencentes ou controladas por terceiros, mas relacionadas às suas atividades (WRI BRASIL, 2020). O Escopo 1 abrange as emissões diretas provenientes de atividades de propriedade ou sob controle do(a) agricultor(a), subdivididas em: fontes mecanizadas (aquelas que utilizam combustíveis ou eletricidade, gerando emissões por combustão), fontes não mecanizadas (resultantes de processos bioquímicos) e remoção de vegetação nativa (decorrente da mudança de uso do solo). O Escopo 2 contempla as emissões indiretas relacionadas à geração de energia elétrica ou térmica adquirida e consumida pela propriedade. Já o Escopo 3 inclui todas as demais emissões indiretas não contempladas no Escopo 2, associadas à cadeia de valor da propriedade, tanto a montante quanto a jusante. No presente estudo, não foram reportadas emissões do Escopo 3, uma vez que, devido às características das áreas avaliadas — predominantemente pequenas propriedades rurais —, tais dados não são obrigatórios, conforme estabelecem as Diretrizes do *GHG Protocol*.

A ferramenta de cálculo do GHG protocol apresenta ao final do preenchimento dos dados, o balanço geral das emissões líquidas (em toneladas de CO_2 eq.). O balanço geral representa a diferença entre as estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) com base no preenchimento da ferramenta de cálculo. Resultados negativos para o balanço indicam que há remoção, enquanto os positivos indicam que há emissão de GEE para os sistemas produtivos analisados (WRI BRASIL, 2020).

Sua aplicação no setor agropecuário permite identificar as principais fontes de emissões e subsidiar estratégias de redução e compensação, sendo fundamental para acesso a programas de PSA e mercados de carbono.

A utilização de ferramentas como o GHG Protocol Florestas e SAFs permite não apenas mensurar e reportar as emissões e remoções associadas a esses sistemas, como também legitimar políticas públicas e projetos voltados à restauração produtiva com impacto climático mensurável. Diante disso, a expansão dos SAFs representa uma das estratégias mais efetivas e integradas de enfrentamento à crise climática no meio rural.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Áreas de estudo

Foram selecionadas 16 propriedades que possuem áreas caracterizadas como sistemas agroflorestais, com distintas composições florísticas e práticas de manejo, distribuídas nos biomas Caatinga (10) e Mata Atlântica (6), abrangendo os territórios do Alto Sertão, Zona da Mata e Litoral do estado de Alagoas (Figura 1).

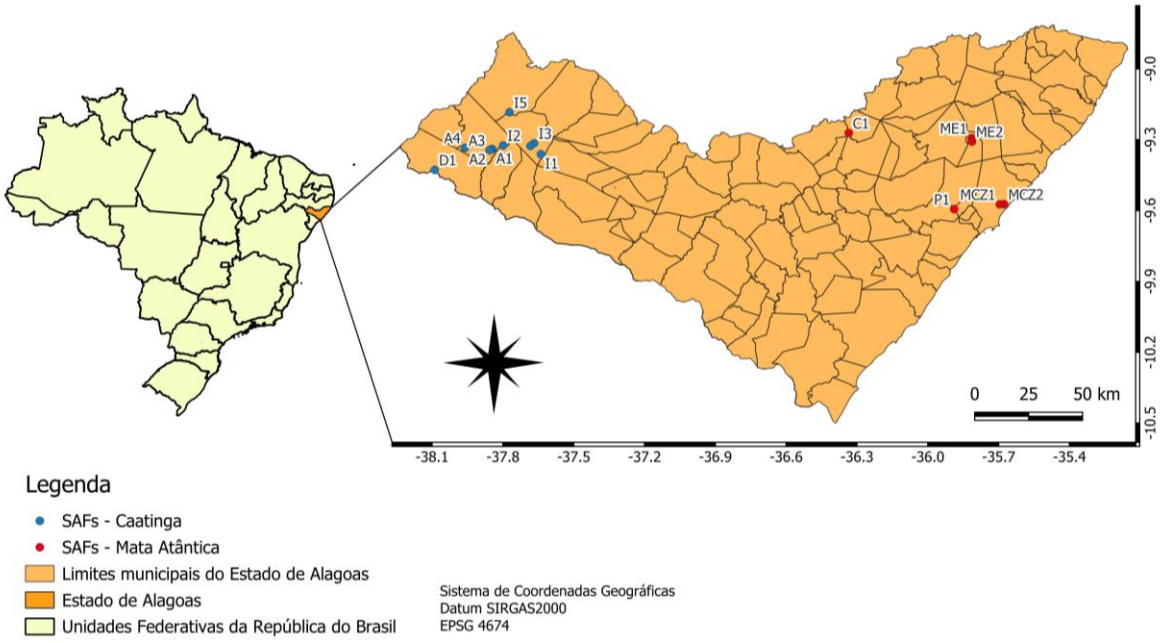


Figura 1. Localização geográfica dos SAFs analisados.
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

O quadro 1 reúne dados referentes às agroflorestas estudadas, correspondente ao município de localização, código da propriedade, coordenadas geográficas, área total avaliada, uso anterior do solo, classe textural do solo (camada 0 a 20 cm) e ano de implantação. As áreas variam de 0,1 a 1 hectare, e incluem diferentes históricos de uso do solo, como agricultura e pastagem, o que confere heterogeneidade aos contextos ecológicos avaliados.

Quadro 1 – Caracterização dos SAFs avaliadas quanto ao município, bioma, localização geográfica, uso anterior da área, classe textural do solo e ano de implantação.

Município	Bioma	Fazenda (cód)	Localização	Área (ha)	Uso anterior da área	Classe textural do solo (0 a 20 cm)	Ano implantação
Inhapi	Caatinga	I1	9°21'41.26"S 37°38'21.88"O	0,21	agricultura	argiloso	2022
Água Branca		A1	9°20'21.62"S 37°50'43.30"O	0,31	agricultura	arenoso	2018
Inhapi		I2	9°19'27.73"S 37°47'57.16"O	0,18	agricultura	argiloso	2022
Inhapi		I3	9°18'55.51"S 37°40'4.40"O	0,3	pastagem	média	2021
Delmiro Gouveia		D1	9°25'40.30"S 38° 5'20.72"O	0,3	agricultura	média	´2022
Inhapi		I 4	9°19'35.47"S 37°41'0.75"O	0,2	agricultura	argiloso	2022
Água Branca		A2	9°20'35.52"S 37°51'16.09"O	0,2	agricultura	média	2023
Inhapi		I5	9°11'1.97"S 37°46'21.54"O	0,37	agricultura	argiloso	2022
Água Branca		A3	9°20'39.73"S 37°51'23.47"O	0,31	agricultura	argiloso	2018
Água Branca		A4	9°20'4.96"S 37°57'40.46"O	0,18	agricultura	argiloso	2022
Chã Preta	Mata Atlântica	C1	9°16'16.53"S 36°20'4.95"O	0,125	agricultura	média	2016
Maceió		MCZ2	9°34'22.53"S 35°40'36.14"O	0,12	pasto degradado	argiloso	2020
Maceió		MCZ1	9°34'26.42"S 35°41'41.13"O	0,1	agricultura	argiloso	2022
Messias		ME1	9°17'36.60"S 35°48'51.90"O	1	pasto degradado	média	´2023
Messias		ME2	9°18'29.70"S 35°48'45.50"O	0,3	pasto degradado	média	2020
Pilar		P1	9°35'39.26"S 35°53'16.22"O	0,81	agricultura	média	2018

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.2. Levantamento de fontes de emissão – coleta de dados

Foram realizadas visitas in loco às propriedades selecionadas para georreferenciamento (coleta de coordenadas) e levantamento de dados agronômicos, florestais e ambientais. Foram registrados: área plantada, produtividade, composição florística, densidade de plantas, classe textural do solo (por análise visual e, quando disponível, por laudo laboratorial), declividade do relevo e práticas de conservação do solo. Também foram coletadas informações sobre o ano de plantio, uso anterior da área, tipo, quantidade e periodicidade de insumos, práticas de manejo, consumo de energia nas atividades agropecuárias e uso de máquinas e equipamentos agrícolas, incluindo preparo do solo, colheita e transporte.

Os dados primários relativos aos Escopos 1 e 2 foram obtidos a partir de registros históricos das propriedades e de entrevistas estruturadas com os produtores. A organização e o registro das informações de campo seguiram o protocolo estabelecido no Produto Técnico e Tecnológico (PTT) desta pesquisa, intitulado "Manual de Coleta de Dados para Inventários de GEE em Sistemas Agroflorestais", disponibilizado integralmente no Apêndice 2. A adoção desse protocolo permitiu padronizar os levantamentos operacionais e fitossociológicos, garantindo aderência às diretrizes do GHG Protocol e consistência na alimentação da ferramenta de cálculo do inventário.

Após a coleta, os dados foram sistematizados e inseridos na Ferramenta do GHG Protocol (Florestas e Sistemas Agroflorestais) para estimar o balanço de GEE por unidade de área e por indivíduo arbóreo, em t CO_2e ha^{-1} e t CO_2e $planta^{-1}$. As fontes de emissão e remoção foram identificadas conforme as metodologias de cálculo da ferramenta e reportadas segundo as Guias do IPCC (2006, 2019) e os Relatórios de Referência do Quarto Inventário Nacional de Emissões de GEE (MCTI, 2020a), classificando-se as emissões como Escopo 1 (diretas) e Escopo 2 (indiretas por eletricidade adquirida).

Para operacionalizar a coleta, foi elaborado um formulário com as seguintes variáveis: distribuição e composição das espécies vegetais (madeireiras e frutíferas), classificadas por ritmo de crescimento e porte; tipo e quantidade de calcário utilizado na correção do solo (dolomítico ou calcítico); aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos; aplicação de ureia; uso de adubos orgânicos conforme composição (tipo de esterco e/ou compostagem); uso de adubos verdes por origem (leguminosas, gramíneas ou outras fontes); aplicação de ureia e de gesso; consumo de energia elétrica (kWh); mudanças de uso e ocupação do solo; exploração econômica de culturas anuais (em meses); corte ou desbaste anual de espécies madeireiras comerciais ou nativas (percentual de indivíduos); consumo de combustíveis e biocombustíveis em operações internas mecanizadas/semimecanizadas e no transporte externo da produção; geração e destinação de resíduos culturais; estimativa de biomassa total; e ocorrência de queima de biomassa por incêndio florestal (percentual da área atingida).

Por fim, os dados agronômicos e florestais foram consolidados e utilizados para comparações entre os agroecossistemas avaliados.

4.2.1. Caracterização florística e densidade de espécies

A caracterização da composição florística e da densidade de espécies perenes dos SAFs seguiu o protocolo descrito no Produto Técnico e Tecnológico (PTT) desta pesquisa (Apêndice 2), com ênfase no Bloco I – Espécies perenes e estrutura do SAF, assegurando padronização do registro e comparabilidade entre as propriedades. Para cada SAF, foram registradas as

espécies perenes presentes (arbóreas/arbustivas, frutíferas, palmeiras e espécies de serviço), anotando-se o nome popular e o nome científico, bem como a classificação de uso (ex.: frutífera; madeireira/serviço), conforme o arranjo e a finalidade no agroecossistema.

A densidade por espécie foi obtida a partir do número de indivíduos por hectare (árvores·ha^{-1}), priorizando-se a contagem direta sempre que viável; quando a dimensão/heterogeneidade da área limitou a contagem integral, adotou-se estimativa por amostragem, conforme previsto no PTT. Quando disponível, foram registrados espaçamentos médios como subsídio à conferência de densidade e interpretação do arranjo do SAF. A densidade total de árvores de cada propriedade foi calculada pela soma das densidades das espécies registradas, e este valor foi utilizado como indicador estrutural nas análises comparativas do estudo.

As informações florísticas e estruturais foram utilizadas no preenchimento das tabelas de Composição Florestal da ferramenta GHG Protocol (Florestas e SAFs), inserindo-se o número de indivíduos ou classes de densidade (árvores·ha^{-1}), bem como classe de crescimento e finalidade das espécies, garantindo rastreabilidade do inventário e reprodutibilidade do procedimento. A listagem florística completa por propriedade, com densidade por espécie e densidade total ao final de cada tabela, encontra-se apresentada no Apêndice 1, organizada por código da fazenda.

4.2.2. Estimativas de emissões e remoções de GEE (GHG Protocol): escopos, recorte temporal e fluxos biogênicos

As estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) foram conduzidas com base no referencial metodológico do GHG Protocol, por meio da Ferramenta de Cálculo para Balanço de Emissões de GEE em Florestas e Sistemas Agroflorestais no Brasil (WRI Brasil, 2024). A escolha desse instrumento se justifica por sua adequação ao contexto nacional e por incorporar procedimentos de contabilização específicos para sistemas baseados em biomassa e solo, permitindo a obtenção de resultados por categoria de fluxo e por unidade de área.

A estrutura do inventário seguiu a classificação do protocolo, distinguindo emissões diretas (Escopo 1) — associadas a fontes sob controle das unidades produtivas — e emissões indiretas por eletricidade adquirida (Escopo 2). As emissões de Escopo 3 (cadeia de valor, como fabricação de insumos e logística externa) foram excluídas em função do recorte metodológico e da indisponibilidade de dados secundários consistentes para sua caracterização.

No Escopo 1, foram inventariadas fontes móveis de combustão e processos agrícolas. As fontes mecanizadas contemplaram o consumo de combustíveis em equipamentos como

motocultivadores, roçadeiras e motosserras. As fontes não mecanizadas incluíram emissões associadas à calagem (CO_2) e ao uso de fertilizantes orgânicos, para os quais a ferramenta estima emissões de CH_4 e frações de nitrogênio para o cálculo de N_2O, com base em fatores de emissão do IPCC (2019). O Escopo 2 considerou o consumo de eletricidade da rede para apoio operacional (por exemplo, irrigação, iluminação e máquinas elétricas), quantificado por consumo mensal (kWh) e fatores de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN/MCTI). O Escopo 3, que abrange emissões indiretas da cadeia de valor (como fabricação e transporte de insumos, serviços de terceiros e logística externa), não é obrigatório no GHG Protocol e foi excluído neste estudo por não integrar o recorte metodológico e por demandar dados secundários consistentes, frequentemente indisponíveis em propriedades rurais de agricultura familiar. Além disso, nas unidades analisadas — caracterizadas por baixo nível de mecanização, menor dependência de insumos externos e cadeias logísticas mais curtas — espera-se que a contribuição do Escopo 3 tenha baixa materialidade em relação às emissões e remoções biogênicas e às fontes diretamente controladas.

O horizonte temporal adotado foi de 40 anos, período máximo operacionalizado pela ferramenta para consolidação de estoques. Os resultados foram expressos em t CO_2e, reportados por hectare (t CO_2e ha^{-1}) e por indivíduo arbóreo (t CO_2e $planta^{-1}$), permitindo comparar arranjos de SAF entre os biomas Caatinga e Mata Atlântica.

Em função da natureza agroflorestal dos sistemas analisados, a interpretação do balanço incorporou fluxos biogênicos e Mudança de Uso e Ocupação do Solo (MUOS). Em conformidade com o GHG Protocol, os fluxos biogênicos foram tratados separadamente em emissões biogênicas (por exemplo, decomposição de serapilheira e manejo de biomassa) e remoções biogênicas, representando o incremento de carbono na biomassa. A MUOS, por sua vez, representou o efeito estrutural da conversão do uso anterior para o SAF, contabilizando a variação líquida de estoques na biomassa (aérea e subterrânea) e no solo, conforme a lógica do setor AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Uses).

Para assegurar consistência e comparabilidade entre as unidades analisadas, os dados foram submetidos a conferência de unidades, coerência e completude antes da inserção na ferramenta. Quando variáveis exigidas não estavam disponíveis de forma homogênea para todas as propriedades, foram adotadas premissas metodológicas fundamentadas em literatura e/ou parâmetros de referência, descritas na subseção seguinte, garantindo rastreabilidade, reprodutibilidade do procedimento e transparência quanto às limitações do inventário.

4.2.2. Parâmetros assumidos

Durante as visitas in loco para coleta de dados, verificou-se que a maioria dos produtores

rurais não possuía informações precisas sobre a produção de biomassa resultante da adubação verde, dado essencial para o cálculo das emissões e remoções nos agroecossistemas. Para suprir essas lacunas, adotaram-se parâmetros produtivos com base em referências disponíveis na literatura científica (quadro 2).

Quadro 2 – Produção de matéria seca por espécie e produtividade média por planta de adubos verdes utilizados como referência para o estudo.

Espécie	**Produção de matéria seca (t ha^{-1} ano^{-1})**	**Total de plantas por hectare**	**Produção média de matéria seca por planta (kg/planta/ano)**	**Referências**
Gliricidia sepium	4	625	5,44	Paulino et al. (2011)
Cajanus cajan	8	20.000	0,4	Moreira et al. (2003)
Moringa oleifera	8,13	10.000	0,8	Souza et al. (2017)

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Situação semelhante foi observada em relação ao uso de calcário. Considerando que a análise da ferramenta abrange um período de 40 anos, foi necessário estimar o intervalo de reaplicação do corretivo, levando-se em conta seu efeito residual nos sistemas agroflorestais (SAFs).

O termo tempo residual de efeito do calcário refere-se ao período durante o qual o corretivo continua a influenciar a acidez e a fertilidade do solo após a aplicação, mesmo sem novas doses aplicadas. Em sistemas agrícolas convencionais esse efeito pode permanecer por até 6 anos. No entanto, sua intensidade reduz gradativamente a partir do 3º ou 4º ano, com declínio mais acentuado após o 5º ano (Natale *et al*., 2007; Natale *et al*., 2012).

Embora não haja estudos específicos sobre o tempo residual de calcário em SAFs, é plausível supor que esse período possa ser prolongado devido a características desses sistemas, como o aporte contínuo de matéria orgânica (serrapilheira, raízes), elevada atividade microbiana e menor erosão. Esses fatores podem aumentar o poder tampão do solo e retardar o processo de reacidificação. Assim, é possível que, em ambientes sob SAF e sem intervenções intensivas como desmatamento, mecanização pesada ou adubação nitrogenada excessiva, o efeito residual do calcário seja mais duradouro do que em sistemas convencionais (Penereiro, 1999; Guerra-Junior *et al*., 2024).

Com base nisso, assumiu-se, para cálculos desta pesquisa, uma média de 10 anos entre uma aplicação e outra, considerando a mesma quantidade aplicada na implantação, informação coletada nas visitas de campo.

As emissões indiretas de N_2O foram calculadas considerando duas fontes principais: a

deposição atmosférica de NH_3 e NO_x, e a lixiviação e o escoamento superficial. Para tanto, foram utilizados os dados referentes ao uso de fertilizantes nitrogenados orgânicos e à quantidade de nitrogênio contida nos resíduos adicionados ao solo (os valores de N (%) para cada tipo de adubo estão disponíveis na ferramenta de cálculo do GHG protocol, na aba Fatores Variáveis). Parte-se do princípio de que uma fração do nitrogênio aplicado ao solo é volatilizada na forma de NH_3 e NO_x e retorna posteriormente ao solo pela deposição atmosférica, tornando-se novamente passível de ser emitida na forma de N_2O, conforme os procedimentos descritos na metodologia do GHG Protocol Agrícola (WRI, 2015).

4.3. Análise estatística

Os dados obtidos neste estudo correspondem a variáveis que expressam as características agronômicas, florestais e ecológicas dos agroecossistemas avaliados. A análise estatística baseou-se inicialmente em métodos descritivos, sendo calculadas a média e o desvio padrão para os principais indicadores levantados em cada propriedade.

A média representa o valor central de um conjunto de observações e permite identificar o comportamento típico de cada variável estudada — como a produção média de biomassa, a quantidade média de uso de insumos orgânicos ou o balanço médio de gases de efeito estufa (GEE) nos diferentes agroecossistemas. Essa medida sintetiza a tendência central dos resultados e é fundamental para comparar o desempenho entre propriedades e biomas.

O desvio padrão, por sua vez, expressa o grau de dispersão dos dados em torno da média, indicando a variabilidade entre as unidades analisadas. Valores elevados de desvio padrão refletem maior heterogeneidade entre os sistemas (por exemplo, diferenças nas práticas de manejo, intensidade de adubação ou densidade de árvores), enquanto valores reduzidos apontam para maior uniformidade entre as observações.

Para fins de comparação, os resultados foram consolidados por bioma, o que possibilitou identificar padrões regionais, contrastes ecológicos e possíveis relações entre práticas de manejo, estrutura dos sistemas e desempenho ambiental.

Adicionalmente, foi realizada análise de correlação não paramétrica de Spearman, com o objetivo de avaliar a associação entre variáveis quantitativas relacionadas ao manejo dos sistemas agroflorestais e ao balanço de gases de efeito estufa. A escolha do coeficiente de correlação de Spearman justifica-se pelo fato de algumas variáveis não apresentarem distribuição normal, conforme verificado em testes de normalidade previamente realizados para o teste de Pearson.

A organização inicial e a estruturação do banco de dados foram realizadas em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel®. Posteriormente, as análises estatísticas foram

conduzidas no ambiente de desenvolvimento RStudio (POSIT TEAM, 2026), utilizando a linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2024). Para a avaliação das associações entre as variáveis, aplicaram-se os testes de correlação de Pearson e Spearman, seguindo os critérios de escolha e interpretação fundamentados por Zar (2010).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades localizadas nos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA) foram analisadas quanto às emissões dos Escopos 1 e 2, aos processos biogênicos, às remoções associadas e ao impacto das mudanças no uso do solo.

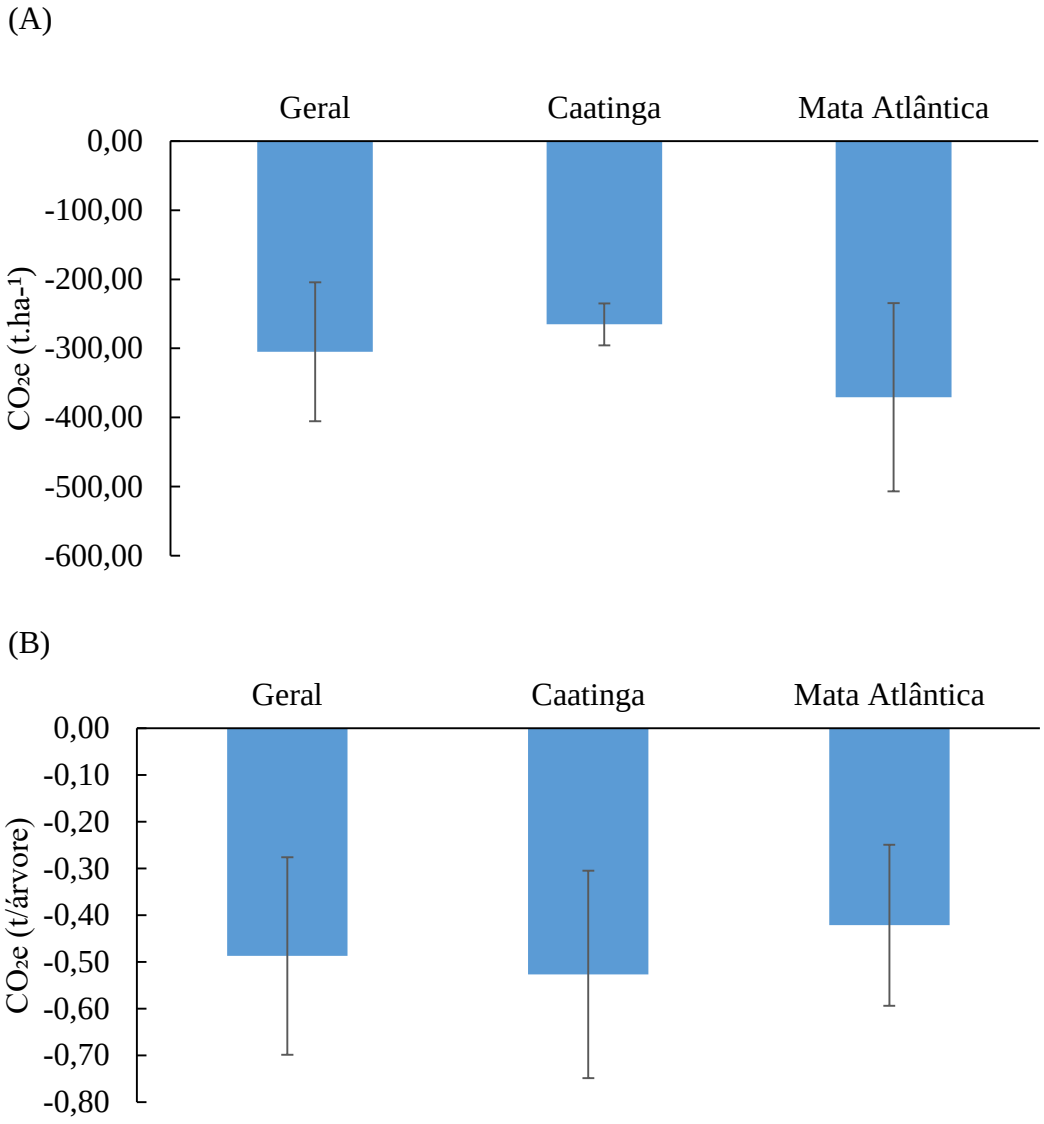
Com base nos dados processados pela ferramenta *GHG Protocol Florestas*, são apresentados, a seguir, tabelas e gráficos que evidenciam as principais fontes de emissão e remoção de gases de efeito estufa (GEE), considerando a interação com fatores agronômicos e ecológicos que influenciam a pegada de carbono dos agroecossistemas avaliados.

5.1. Balanço geral de emissões líquidas

O balanço geral das estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE), considerando o período total de 40 anos, demonstrou que os SAFs analisados atuam como sumidouros líquidos de carbono. Em média, observou-se um balanço negativo de -304,83 t CO_2 eq./hectare (Figura 2A) e -0,49 t CO_2 eq./planta (Figura 2B), indicando que esses sistemas removem mais CO_2 do que emitem.

As maiores remoções líquidas por hectare foram registradas em propriedades localizadas no bioma Mata Atlântica, com média de -370,73 t CO_2e por hectare. Já as propriedades situadas na Caatinga apresentaram uma remoção média de -265,29 t CO_2 eq./hectare (Figura 2A); contudo, demonstraram maior remoção por árvore plantada, com média de -0,53 t CO_2 eq./planta (Figura 2B).

Figura 2. Balanço geral de estimativas de emissões líquidas de GEE por hectare (A) e por planta (B) e desvios padrão, geral e por bioma, em toneladas de CO_2 equivalente, para um período de 40 anos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

O desvio padrão geral para o balanço de GEE por hectare foi de 100,68 t CO_2 eq./ha, o que representa aproximadamente 33,0% da média geral (–304,83 t CO_2 eq./ha), indicando uma dispersão considerável entre as propriedades analisadas. Quando os dados são desagregados por bioma, observa-se que a Mata Atlântica apresenta um desvio padrão significativamente maior (136,17 t CO_2 eq./ha), equivalente a 36,7% de sua média (–370,73 t CO_2 eq./ha) em comparação à Caatinga, cujo desvio padrão é de 30,39 t CO_2 eq./ha, o que representa apenas 11,5% da respectiva média (–265,29 t CO_2 eq./ha). Essa diferença sugere que os sistemas agroflorestais analisados, situados na Mata Atlântica, são mais heterogêneos, possivelmente em função de variações no manejo, composição de espécies, densidade de plantio, uso de adubação

verde e estágio de sucessão ecológica. Já na Caatinga, a menor dispersão aponta para maior uniformidade entre as propriedades, tanto em termos de estrutura dos sistemas quanto de práticas de manejo adotadas.

Essa maior variabilidade na Mata Atlântica é coerente com os resultados de Bieluczyk *et al*. (2023), que observaram variações de 110 a 220 Mg C ha^{-1} em áreas de restauração florestal nesse bioma, conforme o tempo de regeneração e o grau de interferência antrópica. Já na Caatinga, Medeiros (2024) verificou que áreas restauradas com leguminosas nativas apresentaram variação reduzida, com médias de 60 a 90 Mg C ha^{-1}, muito próximas dos valores médios obtidos neste estudo.

A variabilidade também é significativa no balanço por planta (Figura 2B). Com um desvio padrão de 0,21 t CO_2 eq./planta, a dispersão atinge 42,9% em relação à média geral de –0,49 t CO_2 eq./planta. A Caatinga apresentou o maior desvio padrão absoluto, com 0,22 t CO_2 eq./planta, representando 41,5% da média desse bioma (–0,53 t CO_2 eq./planta), enquanto na Mata Atlântica o desvio foi de 0,17, equivalente a 40,5% da média (–0,42 t CO_2 eq./planta). Embora essas variações sejam menores em escala absoluta, elas indicam que, individualmente, as plantas na Caatinga apresentam maior variação relativa na eficiência de sequestro de carbono, o que pode estar associado a diferenças ambientais, práticas de manejo e densidade de plantio entre as propriedades (Figura 2B). Essa diferença no desempenho por planta é compatível com o padrão observado por Medeiros (2024), que registrou maior eficiência individual de sequestro em áreas semiáridas com densidade moderada e alta diversidade funcional. O autor constatou que espécies adaptadas como *Mimosa tenuiflora* e *Poincianella pyramidalis* podem remover entre 0,45 e 0,65 t CO_2e/planta em 30 anos, valores próximos à média de –0,53 t CO_2e/planta observada neste estudo nas propriedades inseridas na Caatinga alagoana.

No que se refere as estimativas por fazenda, observou-se que a maior remoção de GEE por hectare no período total foi na fazenda MCZ2, com –597,17 t CO_2e/ha, localizada no bioma Mata Atlântica (Tabela 1). Essa fazenda apresentou uma densidade de 936 árvores por hectare, 18% acima da média de todas as fazendas, porém com baixa produção de adubação verde, com 30 ton/hectare no período de 40 anos. Além da elevada densidade, a MCZ2 apresenta composição florística diversificada, com presença simultânea de espécies madeireiras/serviço e frutíferas, destacando-se espécies de alta relevância estrutural por densidade (Apêndice 1), o que reforça a contribuição da biomassa arbórea para o saldo líquido de remoções no horizonte de 40 anos.

A maior remoção no bioma Caatinga ocorreu na fazenda A2 (-313,65 t CO2e/ha), onde a densidade de 800 árvores/ha ficou acima da média geral de 774 árvores/ha e, de forma mais acentuada, acima da média regional de 631 árvores/ha. No caso da A2, observa-se um arranjo

com elevada participação de espécies madeireiras/serviço (por exemplo, espécies nativas típicas da Caatinga) e frutíferas de uso alimentar, compondo um SAF com alta ocupação do estrato arbóreo (Apêndice 1), o que pode favorecer maior acúmulo de biomassa e incremento de carbono na vegetação.

Destaca-se que, para as áreas em questão, houve conversão de uso de pasto degradado (MCZ2) e área de cultivo agrícola convencional com monocultivos (A2) para SAFs, processo que contribui significativamente para a recomposição de estoques de carbono e a reversão de áreas fonte em sumidouros de carbono. Esse efeito é coerente com a mudança estrutural promovida pelos SAFs, evidenciada pelo aumento de densidade arbórea e pela diversificação florística registrada nas propriedades, características diretamente associadas à elevação de estoques de carbono na biomassa e no solo.

Em contraste, a fazenda com menor remoção foi a P1 com -192,08 t CO_2e/ha, localizada no bioma Mata Atlântica. Essa fazenda apresentou a uma densidade de 554 árvores/ha, 46% menor que a média das fazendas do bioma Mata Atlântica. Adicionalmente, a composição florística do P1 indica menor densidade total e menor participação de espécies de serviço e/ou espécies de maior porte (Apêndice 1), condição que pode limitar o ganho de biomassa arbórea e, por consequência, reduzir a magnitude das remoções ao longo do período analisado. Outra característica peculiar foi a ausência de utilização da técnica de adubação verde nessa fazenda (Tabela 1), que contribuiu para redução das remoções biogênicas.

Na Caatinga a fazenda I5 teve a menor eficiência na remoção de GEE com -221,39 t CO_2e/ha e densidade de 231 árvores plantadas por hectare (Tabela 1), um número 64% menor que a média observada para as outras fazendas do bioma. A baixa densidade é acompanhada por menor ocupação do estrato arbóreo e menor diversidade estrutural registrada para a área (Apêndice 1), o que sugere menor capacidade de formação de estoque de biomassa quando comparada aos SAFs mais adensados. Entretanto, é importante destacar que todas as fazendas apresentaram estimativas de balanços negativos de GEE, considerando o período analisado.

Os resultados também evidenciam um contraponto entre desempenho por área e desempenho por planta, que se articula não só com a densidade, mas também com a diversidade e a composição florística dos SAFs. Em arranjos muito adensados, o balanço de GEE por hectare tende a ser favorecido pela maior ocupação do estrato arbóreo e pelo maior estoque agregado de biomassa; por outro lado, o saldo por planta pode ser menos expressivo, pois a competição por luz, água, nutrientes e espaço tende a se intensificar com o fechamento do dossel e maior sobreposição de copas (Nair, 1993; Götsch, 1994). A diversidade pode atuar em duas direções: quando há complementaridade funcional (espécies com arquiteturas, estratos e estratégias distintas), ela pode reduzir parte da competição direta e aumentar a eficiência do uso

de recursos; porém, quando o adensamento é sustentado por alta dominância de poucas espécies (mesma função/estrato), a competição intra e interespecífica tende a se manter elevada, limitando o crescimento individual (Nair, 1993; Montagnini; Nair, 2004; Schroth *et al*., 2015; Gliessman, 2021).

Tabela 1. Balanço de GEE por hectare e por planta, densidade de árvores e adubação verde por fazenda em sistemas agroflorestais nos biomas Caatinga e Mata Atlântica.

Bioma	**Fazenda (código)**	**Densidade[1]**	**Adubação verde[1]**	**Balanço de GEE por hectare[1]**	**Balanço de GEE por planta[1]**
		(árv/ha-¹)	**(t.ha-¹)**	**t CO_2 eq.**	
Caatinga	A1	517	6,49	-216,73	-0,42
Caatinga	A2	800	72	-313,65	-0,39
Caatinga	A3	672	31,758	-266,59	-0,40
Caatinga	A4	800	34,48	-257,48	-0,32
Caatinga	D1	421	59	-291,86	-0,69
Caatinga	I1	452	33,98	-288,93	-0,64
Caatinga	I2	565	25,7	-289,06	-0,51
Caatinga	I3	314	25,4	-238,69	-0,76
Caatinga	I4	1534	91	-268,54	-0,18
Caatinga	I5	231	25,2	-221,39	-0,96
Mata Atlântica	C1	700	140	-240,31	-0,34
Mata Atlântica	MCZ1	990	270,9	-328,27	-0,33
Mata Atlântica	MCZ2	936	30	-597,17	-0,62
Mata Atlântica	ME1	2303	143,6	-459,97	-0,20
Mata Atlântica	ME2	593	60	-406,59	-0,69
Mata Atlântica	P1	554	0	-192,08	-0,35
	Média geral[2]	774 ± 496	65,6 ± 67	-304,83 ± 100,68	-0,49 ± 0,21
	Média Caatinga[2]	631 ± 350	41 ± 24	-265,29 ± 30,39	-0,53 ± 0,22
	Média Mata Atlântica[2]	1013 ± 599	107 ± 90	-370,73 ± 136,17	-0,42 ± 0,17

Nota: [1]Valores obtidos considerando o período de 40 anos, de acordo com a ferramenta de cálculo.

[2]Valores expressos como média ± desvio padrão (DP).

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

A comparação entre as fazendas I4 e I5 ilustra bem essa dinâmica. A I4, com densidade muito elevada (1534 árvores·ha^{-1}), apresentou balanço de -268,54 t CO_2e·ha^{-1} e -0,18 t CO_2e·árvore^{-1}, enquanto a I5, com densidade substancialmente menor (231 árvores·ha^{-1}), registrou -221,39 t CO_2e·ha^{-1}, porém o maior sequestro por indivíduo entre as propriedades (-0,96 t CO_2e·árvore^{-1}). Do ponto de vista florístico, ambas compartilham a característica de serem SAFs perenes e multiestrato, com combinação de espécies de produção e de serviço, o que contribui para balanços negativos no período analisado. Entretanto, diferem na forma como a diversidade se expressa estruturalmente: na I4, a elevada densidade pode estar associada a

maior concentração de indivíduos em espécies de rápido crescimento e/ou espécies de serviço (maior dominância), o que eleva o estoque por área, mas reduz o ganho médio por árvore; já na I5, a menor densidade pode refletir maior espaço disponível por indivíduo, favorecendo maior incremento de biomassa por planta — e, dependendo do arranjo, uma composição com menor dominância e maior investimento em indivíduos de maior porte. Essa leitura pode ser refinada explicitando, com base no Apêndice 1, (i) a riqueza de espécies em cada fazenda e (ii) o grau de dominância (concentração de densidade em poucas espécies), pois sistemas com maior riqueza e melhor distribuição entre grupos funcionais tendem a sustentar altas remoções por área com menor penalização do crescimento individual.

Esse equilíbrio entre quantidade de carbono sequestrado por área e eficiência por planta deve ser considerado no desenho de sistemas agroflorestais agroecológicos. A alta densidade é eficaz para maximizar os serviços ecossistêmicos em escala de paisagem, mas pode requerer estratégias de manejo dinâmicas, como podas, para favorecer a estratificação vertical, a sucessão vegetativa e a condução seletiva das espécies, de modo a manter a produtividade e a vitalidade do sistema ao longo do tempo (Nair, 1993; Götsch, 1994; Altieri, 2012). Assim, os resultados aqui apresentados não apenas sustentam a eficiência ambiental da aplicação dos princípios da agroecologia e dos SAFs, mas também reforçam a necessidade de um manejo adaptativo, capaz de balancear produção, regeneração e eficiência ecológica em diferentes escalas.

Ao relacionar os resultados obtidos com o conceito de plantio em alta densidade da agricultura sintrópica, observa-se uma convergência importante entre prática de manejo e desempenho ambiental. A agricultura sintrópica, de acordo com Götsch (1994), utiliza o plantio denso e diversificado como estratégia para acelerar a sucessão ecológica, maximizar a cobertura do solo, aumentar a ciclagem de nutrientes e intensificar o acúmulo de biomassa — aspectos diretamente relacionados ao sequestro de carbono.

Na presente análise, propriedades com maior densidade arbórea e elevados volumes de adubação verde, frequentemente associadas a práticas de manejo intensivo e sucessional, apresentaram os melhores desempenhos em termos de balanço de GEE por hectare para um período de 40 anos (Tabela 1). Esse padrão também foi evidenciado pelas análises de correlação de Spearman realizadas neste estudo. Observou-se correlação negativa moderada entre densidade de árvores e balanço de GEE ($\rho = -0{,}56$; $p = 0{,}022$), sugerindo que sistemas com maior densidade tendem a apresentar balanços mais negativos, ou seja, maior remoção líquida de GEE da atmosfera. De forma semelhante, foi identificada correlação negativa moderada a forte entre o volume de adubação verde e o balanço de GEE ($\rho = -0{,}62$; $p = 0{,}013$), sugerindo que maiores aportes de biomassa orgânica no sistema estão associados a maior capacidade de

sequestro de carbono.

A fazenda ME1 (2303 árvores/ha e 143,6 t/ha de adubação verde) e MCZ2 (936 árvores/ha e 30 t/ha de adubação verde), ambas localizadas no bioma Mata Atlântica, demonstram com clareza essa tendência, apresentando balanços altamente negativos de GEE por hectare (-459,97 e -597,17 t CO_2e ha^{-1}, respectivamente). Esses resultados corroboram a ideia de que sistemas densos e manejados com elevada disponibilidade de matéria orgânica são altamente eficientes na fixação de carbono atmosférico, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Outros trabalhos de inventário de GEE em fazendas no Brasil demonstram que os SAFs são caracterizados como sumidouros de carbono. Almeida (2023) em estudo utilizando o *GHG Protocol* em uma fazenda de gado leiteiro em Minas Gerais observou que a área silvipastoril da propriedade avaliada apresentou remoção líquida anual de -18,53 t CO_2e. Considerando que o sistema silvipastoril ocupava 3 ha, esse resultado corresponde a uma remoção média de aproximadamente –6,18 t CO_2e ha^{-1} ano^{-1}. Apenas para fins comparativos, a projeção linear desses dados em 40 anos indica um balanço líquido de -247,2 t CO_2e/ha, valor alinhado à média encontrada neste estudo.

Torres *et al*. (2014), em estudo conduzido em seis áreas agroflorestais de diferentes biomas brasileiros, identificaram estoques totais de carbono (biomassa e solo) entre 82,3 e 253,6 Mg C ha^{-1}, o que corresponde a balanços médios de –10 a –13 t CO_2e ha^{-1} ano^{-1}, valores semelhantes aos deste trabalho quando se considera o período de 40 anos. Em contraste, áreas de pastagens degradadas apresentaram apenas 42,1 Mg C ha^{-1}, enquanto monocultivos agrícolas registraram 55,8 Mg C ha^{-1}, confirmando que os SAFs bem manejados apresentam mais carbono acumulado. Essa amplitude está diretamente relacionada à densidade e à diversidade estrutural dos sistemas, fatores também observados nas propriedades deste estudo.

Resultados obtidos por Barros *et al*. (2019) em sistemas agroflorestais experimentais indicam que o adensamento e o manejo intensivo de biomassa podem gerar balanços líquidos entre –410 e –580 t CO_2e ha^{-1} em um horizonte de 40 anos. Esses valores são corroborados por achados recentes de Medeiros (2024), reforçando a premissa de que SAFs manejados com podas sucessivas e alta ciclagem orgânica apresentam um desempenho climático comparável aos sistemas de restauração intensiva da Mata Atlântica e da Caatinga.

A Tabela 2 apresenta as estimativas de emissões e remoções de GEE por área cultivada (t.CO_2e.ha^{-1}) projetadas para um horizonte de 40 anos de atividade. Os dados consolidam os impactos diretos e indiretos das propriedades nos biomas Caatinga e Mata Atlântica, segmentados por escopos, dinâmicas biogênicas e mudança de uso ocupação do solo.

Tabela 2. Estimativas de emissões e remoções de GEE por área cultivada, nos biomas Caatinga e Mata Atlântica por escopo (1 e 2), emissão/remoção biogênica e por mudança de uso e ocupação do solo (MUOS).

Fazenda (código)	Bioma	Escopo 1	Escopo 2	Emissão biogênica	Remoção biogênica[2]	MUOS[2]
				(t CO_2e ha^{-1})		
A1	Caatinga	17,54	9,6	1,76	-22,02	-172,23
A2	Caatinga	14,46	20,97	0,33	-14,68	-276,01
A3	Caatinga	9,91	7,46	1,02	-22,85	-211,58
A4	Caatinga	23,13	14,43	4,07	-13,21	-225,72
D1	Caatinga	14,05	14,51	0,53	-22,75	-247,55
I1	Caatinga	8,97	14,59	0,47	-11,56	-257,92
I2	Caatinga	17,34	17,03	3,05	-9,91	-271,43
I3	Caatinga	26,84	14,32	2,25	-24,22	-208,71
I4	Caatinga	32,31	24,17	4,07	-13,21	-255,69
I5	Caatinga	7,6	13,2	0,5	-27,16	-169,29
C1	Mata Atlântica	22,91	32,34	1,58	-9,18	-223,74
MCZ1	Mata Atlântica	54,2	62,6	1,32	-7,34	-372,99
MCZ2	Mata Atlântica	25,45	54,34	4,29	-8,81	-607,85
ME1	Mata Atlântica	14,67	2,5	0,15	-73,4	-403,88
ME2	Mata Atlântica	22,17	5,62	0,6	-24,22	-361,59
P1	Mata Atlântica	50,69	12,88	4,27	0	-259,92
Média geral[1]		22,64 ± 13,51	20,04 ± 16,68	1,89 ± 1,56	-21,17 ± 18,80	-282,88 ± 109,66
Média Caatinga[1]		17,22 ± 8,08	15,03 ± 4,88	1,80 ± 1,49	-18,16 ± 6,10	-229,61 ± 38,61
Média M. Atlântica[1]		31,68 ± 16,52	28,38 ± 25,65	2,04 ± 1,81	-20,49 ± 27,24	-371,66 ± 135,12

Nota: [1] Valores expressos como média ± desvio padrão (DP).

[2] Valores negativos indicam remoção líquida de gases de efeito estufa (GEE).

[3] Todas as colunas de CO_2e representam estimativas acumuladas projetadas para um período de 40 anos.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Em média, as propriedades situadas na Mata Atlântica registraram as maiores emissões de Escopo 1 e 2, com destaque para as unidades MCZ1 (Respectivamente, 54,20 e 62,60 t CO_2e ha^{-1}) e P1 (respectivamente, 50,69 e 12,88 t CO_2e ha^{-1}). Em contraste, o bioma Caatinga apresentou emissões de Escopo 1 mais moderadas, com média de 17,22 t CO_2e ha^{-1}, valor inferior à média geral (22,64 t CO_2e ha^{-1}) e significativamente menor que a da Mata Atlântica (31,68 t CO_2e ha^{-1}). No Escopo 2, a Caatinga também obteve o menor desempenho médio (15,03 t CO_2e ha^{-1}), situando-se 25% abaixo da média geral e 47% inferior à média da Mata Atlântica (Tabela 2).

No Escopo 1, que abrange as emissões decorrentes do manejo na fazenda (fontes

mecanizadas e não mecanizadas), os resultados oscilaram de 7,6 t CO_2e ha^{-1} na fazenda I5 (Caatinga) a 54,2 t CO_2e ha^{-1} na fazenda MCZ1 (Mata Atlântica). O desvio padrão geral foi de 13,51 t CO_2e ha^{-1}, o que representa aproximadamente 40% da média geral observada (Tabela 2). Já no escopo 2, que contempla a contabilização das emissões associadas ao uso de energia elétrica, os resultados variaram entre 2,5 t CO_2e ha^{-1} na fazenda ME1 e 62,6 t CO_2e ha^{-1} na MCZ1, demonstrando grande variação entre as propriedades. Esses resultados refletem o acumulado total no período de 40 anos calculado pela ferramenta. A análise do balanço de GEE demonstra que a ausência de fertilizantes nitrogenados sintéticos nas propriedades foi determinante para o baixo impacto do Escopo 1. De acordo com Cerri et al. (2025), o uso desses insumos é um dos principais gargalos da agricultura tropical, sendo responsável por emissões significativas de N_2O. Comparativamente os SAFs analisados emitem muito menos GEE por hectare que sistemas de monocultivo, como a cana-de-açúcar em Alagoas, onde a oxidação da matéria orgânica e o manejo convencional podem emitir em cada ano agrícola entre 12 e 18 t CO_2e ha^{-1} (Maia *et al*., 2019).A substituição por adubação verde e orgânica nos SAFs estudados transfere a fonte de emissão para o ciclo biogênico, o qual é amplamente compensado pelo aumento do carbono estável no solo.

As emissões biogênicas, decorrentes principalmente da decomposição de serapilheira e resíduos orgânicos, apresentaram-se reduzidas em ambos os biomas, com variação de 0,15 a 4,29 t CO_2e ha^{-1} (Tabela 2). A média geral para esse fluxo (1,89 t CO_2e ha^{-1}) foi pouco expressiva, equivalendo a apenas 4,24% do volume total de emissões dos escopos operacionais. Em contrapartida, as remoções biogênicas — que compreendem o sequestro líquido de CO_2 atmosférico via fotossíntese e sua fixação na biomassa e curto ciclo— responderam por 19% do total das remoções médias projetadas. O bioma Caatinga apresentou um desempenho proporcionalmente mais relevante neste quesito, com as remoções biogênicas representando 23% do total de remoções do bioma. Na Mata Atlântica, observou-se maior heterogeneidade nos dados (DP = 18,87 t CO_2e ha^{-1}) com a contribuição biogênica limitando-se a 14% do total removido.

O fator determinante para o balanço negativo de GEE foi a remoção via Mudança no Uso e Ocupação do Solo (MUOS). Diferente do fluxo biogênico anual, a MUOS contabiliza a variação líquida nos estoques de carbono (biomassa acima e abaixo do solo, e carbono orgânico do solo) resultante da conversão de áreas degradadas ou de cultivos anuais para sistemas agroflorestais. No horizonte de 40 anos, as remoções por MUOS apresentaram média geral de-282,88 t CO_2e ha^{-1} (Tabela 2). Observou-se que os SAFs da Mata Atlântica apresentaram maior potencial de remoção média (-371,66 t CO_2e ha^{-1}), quando comparados às fazendas da Caatinga (-229,61 t CO_2e ha^{-1}). Individualmente, destacaram-se as propriedades MCZ2 (-607,85 t CO_2e

ha^{-1}) e ME1 (-403,88 t CO_2e ha^{-1}) com maiores taxas de sequestro via MUOS, enquanto a unidade I5 registrou a menor remoção (-169,29 t CO_2e ha^{-1}). Esses resultados ratificam o papel estratégico da conversão de áreas agrícolas convencionais em sistemas biodiversos para a manutenção e ampliação dos estoques de carbono, consolidando os SAFs como ferramentas eficazes na mitigação das mudanças climáticas.

Em escala de ecossistema, Cerri *et al*. (2023) destacam que o aumento da matéria orgânica do solo é um dos principais mecanismos de compensação, podendo fixar até 4,4 t CO_2e ha^{-1} ano^{-1} (equivalente a 1,2 t C) em sistemas conservacionistas. Por sua vez, Pires (2019) demonstrou que sistemas de integração no Cerrado apresentam balanços líquidos que variam entre –1,5 e +2,3 t CO_2e ha^{-1} ano^{-1}, a depender da densidade arbórea e do manejo. Essa variação reforça que, enquanto sistemas degradados ou de baixa densidade podem atuar como fontes emissoras, o manejo florestal planejado é capaz de inverter o balanço para o status de sumidouro líquido de carbono.

Em síntese, os resultados evidenciam distinções relevantes entre os biomas no que tange à mitigação climática. Os sistemas agroflorestais da Mata Atlântica apresentam a maior remoção líquida média associada à MUOS (-371,66 t CO_2e ha^{-1}), que reflete o ganho estrutural de carbono em biomassa e solo decorrente da conversão do uso anterior e do desenvolvimento do SAF. Por outro lado, os sistemas da Caatinga, embora apresentem remoções por MUOS menos intensas em média (-229,61 t CO_2e ha^{-1}), destacam-se por menores intensidades de emissão nos Escopos 1 e 2 (médias de 17,22 e 15,03 t CO_2e ha^{-1}, respectivamente), indicando um perfil operacional de menor carbono. Essa complementaridade sugere que, enquanto na Mata Atlântica tende a concentrar maior potencial de remoção por área via mudança de uso do solo, as fazendas da Caatinga combinam menor pressão emissora com remoções consistentes, reforçando que a transição para sistemas agroflorestais pode contribuir para deslocar o balanço dos agroecossistemas em direção a sumidouros líquidos de GEE, a depender do histórico de uso do solo, tempo de implantação e práticas de manejo.

5.2. Fontes de Emissão de GEE

A análise dos dados dos 16 sistemas agroflorestais estudados revelou uma emissão média estimada de 44,57 toneladas de CO_2 equivalente por hectare, ao longo de 40 anos (período máximo considerado pela ferramenta de cálculo).

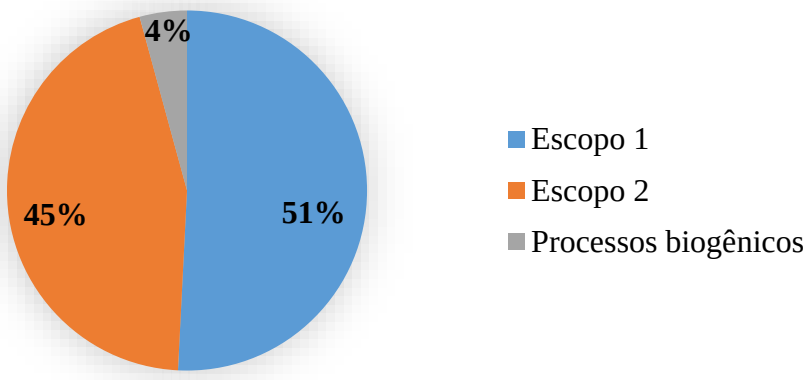
A maior parte (51%) dessa emissão é atribuída às fontes do Escopo 1 (Figura 3), constituído por emissões diretas (fertilização, calagem, adição de gesso, diesel, gasolina e etanol), com uma média de 22,64 t CO_2e ha^{-1}. Em seguida, aparecem as emissões do Escopo 2, com 20,04 t CO_2e ha^{-1}, correspondendo a 45% da média total. Já as emissões biogênicas,

embora presentes, contribuíram de forma menos significativa, representando apenas 4%, com uma média de 1,89 t CO_2e ha-¹. O percentual de emissões por escopo foi semelhante para os biomas Caatinga e Mata Atlântica, se aproximando da distribuição média de todos os sistemas (Figura 6).

Esse perfil de emissões evidencia a predominância dos impactos diretos (Escopo 1) nos sistemas agroflorestais analisados, seguidos pelos impactos indiretos relacionados ao consumo de energia (Escopo 2), enquanto os processos naturais (biogênicos) desempenham um papel secundário no total de emissões (Figura 3 e 4).

A composição por escopos observada nestes SAFs é consistente com inventários aplicados com o GHG Protocol em propriedades rurais tropicais, que também apontam o Escopo 1 como principal contribuinte e o Escopo 2 como parcela relevante, modulada pela matriz elétrica e uso de bombeamento/beneficiamento (Almeida, 2023; Chamilete, 2024). Em termos de práticas, a preponderância de combustíveis, preparo de solo e manejo de biomassa como vetores do Escopo 1 segue o padrão reportado para agricultura de baixo carbono no Brasil (Balbino *et al*., 2011).

Figura 3. Contribuição relativa (%) dos escopos de emissão de CO2 eq./hectare nos 16 SAFs estudados.



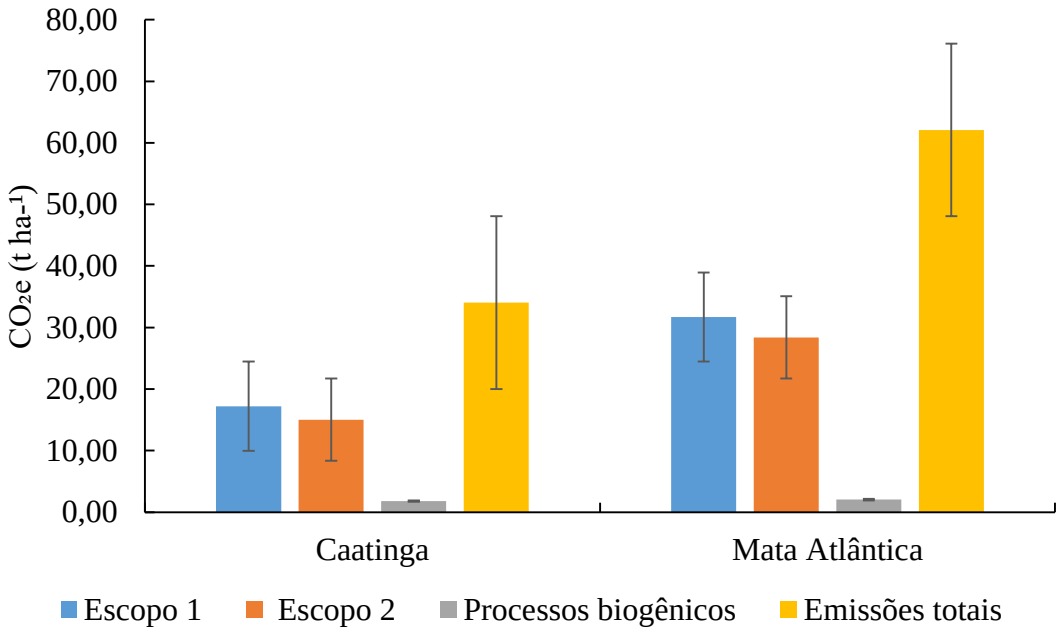
Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Embora haja distribuição percentual de emissões por escopo semelhante, a análise comparativa entre os dois biomas contemplados neste estudo revelou diferenças nos valores médios de emissão de gases de efeito estufa (GEE) por hectare (figura 4).

As propriedades localizadas no bioma Caatinga apresentaram as menores taxas médias de emissão, com 34,05 toneladas de CO_2 equivalente por hectare, ao longo do período avaliado. Em contraste, as áreas situadas na Mata Atlântica registraram uma média de 62,1 t CO_2 eq./ha,

evidenciando um impacto mais expressivo (Tabela 3). Essa disparidade pode ser atribuída a fatores como o histórico de uso da terra, intensidade de manejo, tipos de insumos utilizados e particularidades ecológicas de cada bioma.

Figura 4. Comparação das estimativas de emissões de GEE por escopo e total (com desvios padrão), entre os biomas Caatinga e Mata Atlântica.



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

A análise dos desvios padrão das emissões de GEE, por escopo e por unidade produtiva (hectare), revela importantes insights sobre a variabilidade dos dados. No contexto geral, os desvios padrão mais elevados estão associados ao bioma Mata Atlântica, o que indica maior dispersão dos valores em relação à média. Para o Escopo 1, o desvio padrão foi de 15,08 t CO_2e na Mata Atlântica contra 7,66 t CO_2e na Caatinga. No Escopo 2, essa diferença também se manifesta: 23,41 t CO_2e para a Mata Atlântica e 4,63 t CO_2e para a Caatinga (Tabela 3).

Ao analisar a emissão total por hectare, a Mata Atlântica novamente apresenta o maior desvio padrão com 33,73 t CO_2e em comparação com a Caatinga (11,92 t CO_2e). Estes dados reforçam o entendimento de que a intensidade de emissões por área cultivada na Mata Atlântica é mais heterogênea, o que pode ser reflexo da escala das propriedades, grau de tecnificação ou diferentes culturas implantadas.

Tabela 3. Avaliação comparativa das emissões de GEE[1], por área (hectare) cultivada (AC) e por árvore plantada (AP), em toneladas de CO_2e, em sistemas agroflorestais inseridos nos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA)

Fazenda (código)	**Bioma**	**Emissões Escopo 1**		**Emissões Escopo 2**		**Emissões por processos biogênicos**		**Emissão total/ hectare**	**Emissão total/ árvore**
		AC	**AP**	**AC**	**AP**	**AC**	**AP**		
		t CO_2e							
A1	CT	17,54	0,034	9,60	0,019	1,76	0,003	28,90	0,056
A2	CT	14,46	0,018	20,97	0,026	0,33	0,000	35,76	0,045
A3	CT	9,91	0,015	7,46	0,011	1,02	0,002	18,39	0,027
A4	CT	23,13	0,029	14,43	0,018	4,07	0,005	41,63	0,052
D1	CT	14,05	0,033	14,51	0,034	0,53	0,001	29,10	0,069
I1	CT	8,97	0,020	14,59	0,032	0,47	0,001	24,04	0,053
I2	CT	17,34	0,031	17,03	0,030	3,05	0,005	37,42	0,066
I3	CT	26,84	0,085	14,32	0,046	2,25	0,007	43,41	0,138
I4	CT	32,31	0,021	24,17	0,016	4,07	0,003	60,55	0,039
I5	CT	7,60	0,033	13,20	0,057	0,50	0,002	21,30	0,092
C1	MA	22,91	0,033	32,34	0,046	1,58	0,002	56,83	0,081
MCZ1	MA	54,20	0,055	62,60	0,063	1,32	0,001	118,13	0,119
MCZ2	MA	25,45	0,026	54,34	0,056	4,29	0,004	84,08	0,087
ME1	MA	14,67	0,006	2,50	0,001	0,15	0,000	17,32	0,008
ME2	MA	22,17	0,037	5,62	0,009	0,60	0,001	28,39	0,048
P1	MA	50,69	0,091	12,88	0,023	4,27	0,008	67,84	0,122
Média geral[2]		22,64 ± 13,08	0,036 ± 0,023	20,04 ± 16,15	0,031 ± 0,018	1,89 ± 1,51	0,003 ± 0,002	44,57 ± 26,45	0,069 ± 0,035
Média CT[2]		17,22 ± 7,66	0,032 ± 0,019	15,03 ± 4,63	0,029 ± 0,014	1,80 ± 1,41	0,003 ± 0,002	34,05 ± 11,92	0,064 ± 0,030
Média MA[2]		31,68 ± 15,08	0,042 ± 0,027	28,38 ± 23,41	0,033 ± 0,023	2,04 ± 1,66	0,003 ± 0,003	62,10 ± 33,73	0,078 ± 0,040

Nota: [1] Estimativas acumuladas projetadas para um período de 40 anos.

[2] Valores expressos como média ± desvio padrão (DP).

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

5.2.1. Fontes de Emissão Escopo 1

A avaliação das emissões de GEE, especificamente no âmbito do Escopo 1, em propriedades agrícolas localizadas nos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA), evidenciou diferenças expressivas associadas às distintas práticas de manejo adotadas em cada região. Tais variações influenciam diretamente a quantidade total de emissões.

A tabela 4 apresenta os valores de emissões médias de GEE do Escopo 1, por tipo de fonte de emissão, em toneladas de CO_2 equivalente por hectare, para os 16 SAFs, localizados nos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA). São discriminadas seis fontes principais de emissão: calagem e gessagem, adubação orgânica, adubação verde, lixiviação/escoamento superficial, deposição atmosférica de nitrogênio volatizado e operações mecanizadas. Ao final, apresentam-se os valores médios e desvios padrão para o conjunto total das propriedades, bem como desagregados por bioma.

Tabela 4. Emissões de gases de efeito estufa do Escopo 1 por tipo de fonte (em t CO_2e/hectare), em SAFs dos biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA).

Fazenda (código)	**Bioma**	**Calagem e gessagem**	**Adub. orgânica**	**Adub. verde**	**Lixiviação/ Escoamento superficial**	**Deposição atmosférica de N volatizado**	**Operações mecanizadas**	**Total emissões**
		t CO_2e ha^{-1}						
A1	CT	2,11	4,64	1,44	1,30	1,16	6,89	17,54
A2	CT	1,19	3,60	6,47	1,01	0,90	1,29	14,46
A3	CT	1,15	1,75	2,09	0,49	0,44	3,99	9,91
A4	CT	1,33	2,67	1,74	0,75	0,67	15,97	23,13
D1	CT	0,76	5,33	3,06	1,50	1,33	2,08	14,05
I1	CT	0,57	3,24	1,60	0,91	0,81	1,86	8,98
I2	CT	1,06	2,04	1,21	0,57	0,51	11,95	17,34
I3	CT	1,33	9,71	1,85	2,73	2,43	8,81	26,84
I4	CT	1,14	7,05	4,44	1,98	1,76	15,94	32,31
I5	CT	0,48	2,59	1,19	0,73	0,65	1,96	7,60
C1	MA	0,00	0,00	15,95	0,40	0,35	6,20	22,91
MCZ1	MA	3,81	7,19	34,21	2,02	1,80	5,20	54,24
MCZ2	MA	3,81	1,68	2,21	0,49	0,43	16,82	25,45
ME1	MA	0,72	1,26	11,44	0,35	0,31	0,58	14,67
ME2	MA	3,81	7,39	4,70	2,08	1,85	2,35	22,17
P1	MA	5,91	18,31	0,00	5,15	4,57	16,75	50,69
Emissões médias geral [1]		1,82 ± 1,58	4,90 ± 4,33	5,85 ± 8,38	1,40 ± 1,19	1,25 ± 1,06	7,42 ± 5,92	22,64 ± 13,08
Emissões médias [1] (CT)		1,11 ± 0,44	4,26 ± 2,38	2,51 ± 1,62	1,20 ± 0,67	1,06 ± 0,60	7,07 ± 5,53	17,22 ± 7,66
Emissões médias [1] (MA)		3,01 ± 2,03	5,97 ± 6,22	11,42 ± 11,55	1,75 ± 1,69	1,55 ± 1,50	7,98 ± 6,49	31,69 ± 15,09

Nota: [1] Valores expressos como média ± desvio padrão (DP).

[2] Os dados representam estimativas acumuladas projetadas para um período de 40 anos.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

Nos SAFs analisados, não foi registrado o uso de ureia e de outros fertilizantes químicos sintéticos, comumente empregados em sistemas agrícolas convencionais de larga escala. Essa característica é particularmente relevante, uma vez que tais insumos figuram entre as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura intensiva, em razão das

emissões diretas e indiretas de N_2O, gás com elevado potencial de aquecimento global (IPCC, 2021). Além disso, a ausência de adubos nitrogenados sintéticos reduz emissões “embutidas” da fabricação/transporte, enquanto a adubação orgânica/verde aumenta o C do solo favorecendo o balanço líquido (Forster *et al*., 2007; Gliessman, 2007; Altieri; Nicholls, 2017; IPCC, 2019).

A ausência desses fertilizantes nos SAFs avaliados reflete a adoção de práticas agroecológicas baseadas no uso de adubação orgânica, adubação verde e manejo ecológico do solo, estratégias que reduzem significativamente as emissões diretas associadas ao Escopo 1.

A análise das emissões de GEE de Escopo 1 demonstra diferenças relevantes entre os biomas Caatinga (CT) e Mata Atlântica (MA), tanto em termos de médias quanto de desvios padrão. A média geral das emissões considerando todas as propriedades avaliadas foi de 22,64 t CO_2 eq./ha, com um desvio padrão médio de 13,08. Esse valor reflete a alta variabilidade entre os sistemas agroflorestais (SAFs) avaliados nos dois biomas.

Ao desagregar os dados por bioma, observa-se que os SAFs localizados na Mata Atlântica apresentaram emissões médias significativamente mais altas, com 31,69 t CO_2 eq./ha, acompanhadas de um desvio padrão elevado de 15,09. Em contraste, os sistemas da Caatinga apresentaram uma média de emissões consideravelmente menor, de 17,22 t CO_2 eq./ha, e um desvio padrão de 7,66 (Tabela 3). Esses dados indicam que, além de emitirem menos gases de efeito estufa, os SAFs da Caatinga são mais homogêneos em termos de práticas de manejo, enquanto os da mata atlântica apresentam maior diversidade e intensidade de uso, refletindo-se em maior variabilidade das emissões.

Ao analisar as fontes específicas de emissão do Escopo 1, observa-se que, no período analisado de 40 anos, em termos gerais, as operações mecanizadas foram a principal fonte, com média de 7,42 t CO_2 eq./ha, seguidas por adubação verde (5,85) e adubação orgânica (4,90). No entanto, essa hierarquia varia entre os biomas. Na Caatinga, destacam-se as emissões associadas às operações mecanizadas (7,07 t CO_2 eq./ha) e à adubação orgânica (4,26), enquanto a adubação verde teve média inferior (2,51). Já na Mata Atlântica, a adubação verde é a principal responsável pelas emissões, com média de 11,42 t CO_2 eq./ha, seguida por operações mecanizadas (7,98) e adubação orgânica (5,97). Esses resultados sugerem que os sistemas na Mata Atlântica utilizam mais intensivamente a adubação verde, possivelmente em função de estratégias agroecológicas específicas ou maior disponibilidade de biomassa vegetal.

Mesmo quando a adubação verde aparece como fonte de emissão do Escopo 1, avaliações de ciclo de vida mostram que seu efeito é compensado pelo incremento do C estável no solo, sobretudo com manejo de cobertura, podas e reciclagem de resíduos (Cerri *et al*., 2023; Chamilete, 2024).

Haja vista que as práticas de adubação orgânica e verde são amplamente desejáveis em sistemas agroecológicos, a interpretação de suas emissões deve ser feita com critérios de relativização. Embora essas práticas possam gerar emissões diretas de GEE, sobretudo CO_2 e N_2O, decorrentes da decomposição da matéria orgânica e da mineralização do nitrogênio, o balanço líquido de carbono tende a ser muito mais favorável quando comparado aos sistemas convencionais baseados em fertilizantes sintéticos (Lal, 2004; IPCC, 2021). É fundamental ressaltar que essa superioridade no balanço não decorre apenas do baixo uso de insumos, mas, primordialmente, do expressivo sequestro de carbono realizado pelos componentes arbóreos (Somarriba *et al*., 2013).

Neste sentido, a biomassa vegetal atua como o principal mecanismo de compensação das emissões operacionais. Enquanto em cultivos anuais o ciclo do carbono é transiente, os SAFs promovem o acúmulo de carbono estável em fustes, galhos e raízes, funcionando como "bombas de absorção" que mitigam as emissões do manejo. Sob uma perspectiva histórica, os SAFs avaliados desempenham um papel na recuperação ambiental de áreas degradadas: como a maioria das áreas foi desmatada para pastagens ou monocultivos no passado, a implantação desses sistemas permite a recuperação de estoques de carbono originais perdidos, revertendo passivos ambientais (Maia *et al*., 2019; Santos *et al*., 2024). Para fins de análise técnica, se o componente da biomassa arbórea fosse excluído do cálculo, o balanço operacional dos SAFs assemelhar-se-ia ao de cultivos orgânicos convencionais, cujas emissões de manejo, embora baixas, não possuem um ralo de absorção equivalente. É a integração do componente florestal que garante a escala de mitigação necessária para tornar o sistema um sumidouro líquido (Pires, 2019). Dessa forma, os adubos verdes e orgânicos estabelecem um sistema de retroalimentação: embora gerem emissões residuais de N_2O, são eles que nutrem a biomassa responsável pelo sequestro de CO_2. Ao contrário da agricultura baseada em fertilizantes sintéticos — onde o fluxo de emissão é unidirecional e o potencial de aquecimento global do N_2O é 273 vezes superior ao do CO_2 (IPCC, 2021) — nos SAFs, o crescimento arbóreo não apenas compensa as emissões de manejo, mas inverte o balanço total. Dessa forma, os SAFs analisados em Alagoas não apenas compensam as emissões operacionais de manejo, mas promovem o que Cerri *et al*. (2025) definem como 'carbono de alta integridade'. Este conceito diferencia os créditos gerados por sistemas regenerativos daqueles provenientes de mitigações meramente administrativas, pois baseia-se na remoção biológica real, no restauro da biodiversidade e na reconstrução de estoques de carbono historicamente degradados nos biomas Caatinga e Mata Atlântica.

Os fertilizantes químicos, como a ureia e o nitrato de amônio, além de apresentarem maior intensidade de emissões durante a sua produção industrial e transporte, liberam quantidades mais elevadas de óxidos de nitrogênio (N_2O) no solo, gás cujo potencial de

aquecimento global é cerca de 298 vezes superior ao do CO_2 (Forster *et al*., 2007). Já os adubos orgânicos e verdes, apesar de emitirem algum carbono durante a decomposição, aumentam o estoque de matéria orgânica no solo, promovem sequestro de carbono, melhoram a estrutura e a retenção hídrica e favorecem a biodiversidade edáfica, atuando de modo sistêmico na melhoria das condições de solo (Gliessman, 2021; Altieri; Nicholls, 2017).

No que diz respeito à variabilidade das fontes de emissão, os maiores desvios padrão foram observados na adubação verde (11,55 t CO_2e ha^{-1}) e adubação orgânica (6,22 t CO_2e ha^{-1}) na Mata Atlântica, enquanto os mesmos componentes apresentaram menor variabilidade na Caatinga, com desvios de 1,62 e 2,38, respectivamente. Essa diferença aponta para um uso mais uniforme das práticas agrícolas na Caatinga e maior heterogeneidade nos sistemas manejados na Mata Atlântica.

As operações mecanizadas representam uma das principais fontes de emissão de GEE nos SAFs avaliados. A média geral de emissões provenientes dessa categoria correspondem a 7,42 t CO_2e ha^{-1} (32,8%) das emissões totais médias observadas (22,64 t CO_2 eq./ha).

Na análise por bioma, percebe-se que, embora a Mata Atlântica tenha maior média total de emissões (31,69 t CO_2 eq./ha), as operações mecanizadas representam uma parcela proporcionalmente menor desse total, com média de 7,98 t CO_2e ha^{-1} (25,2%). Em contrapartida, na Caatinga, apesar da média total ser mais baixa (17,22 t CO_2e ha^{-1}), as operações mecanizadas representam uma fração mais significativa, com 7,07 t CO_2e ha^{-1}, o que equivale a 41,1% das emissões totais médias.

Esses dados indicam que, nas propriedades inseridas na Caatinga, o uso de maquinário agrícola tem papel mais central na geração de GEE, sugerindo maior dependência de insumos energéticos fósseis (como diesel) para preparo do solo, plantio e manejo. Medidas de mitigação com boa relação custo-benefício incluem: planejamento de operações para reduzir passadas e manutenção preventiva, que pode reduzir o reporte de emissões diretas (Balbino *et al*., 2011; Godinho *et al*., 2023).

Já na Mata Atlântica, embora as emissões absolutas por operações mecanizadas sejam ligeiramente maiores, seu peso relativo é diluído pela contribuição significativa de outras fontes, especialmente a adubação verde, que apresenta médias elevadas nesse bioma (11,42 t CO_2e ha^{1}).

Os resultados observados neste estudo demonstram um padrão de emissões coerente com pesquisas nacionais recentes que aplicaram o GHG Protocol Agropecuário e as diretrizes do IPCC Tier 2 em sistemas rurais tropicais. Em propriedade leiteira agroecológica de base silvipastoril, Almeida (2023) constatou que 52% das emissões totais eram provenientes de fontes diretas (Escopo 1), sobretudo do uso de combustíveis e da adubação verde, proporção praticamente idêntica à observada neste trabalho (51%).

Entretanto, tanto Almeida (2023) quanto Chamilete (2024) ressaltam que as emissões associadas à adubação orgânica e verde devem ser analisadas sob a ótica do balanço líquido de carbono, visto que essas práticas, embora emitam CO_2 e N_2O durante a decomposição, aumentam o estoque de carbono no solo e reduzem o uso de insumos químicos sintéticos — altamente emissores durante a fabricação e transporte (IPCC, 2019).

De forma convergente, Cerri *et al*. (2023) destacam que a decomposição controlada de resíduos vegetais e o uso de matéria orgânica reciclada são cruciais para o acúmulo de carbono estável no solo, o que explica o comportamento compensatório de sistemas agroflorestais e agroecológicos. Além disso, Godinho *et al*. (2023) verificaram, em propriedades de pecuária bovina no Espírito Santo, que a substituição parcial do uso de combustíveis fósseis por energia renovável e o aproveitamento de biomassa reduziram as emissões diretas em cerca de 25%, sem comprometer a produtividade.

Esses achados indicam que os valores médios obtidos neste estudo — 31,69 t CO_2e ha^{-1} na Mata Atlântica e 17,22 t CO_2e ha^{-1} na Caatinga — são compatíveis com a literatura e refletem o equilíbrio entre o uso moderado de maquinário e a adoção de insumos biológicos. Assim, confirma-se que os SAFs apresentam emissões diretas moderadas e compensadas por elevadas remoções, consolidando seu papel como sistemas produtivos de baixo carbono e de alta eficiência ecológica.

5.3. Remoções de gases de efeito estufa (GEE)

As remoções por mudança de uso e ocupação do solo (MUOS) representaram a principal fração das remoções totais de gases de efeito estufa (GEE) nos sistemas agroflorestais analisados, correspondendo, em média, a 85,9% das remoções por hectare na Mata Atlântica e 76,7% na Caatinga. Embora a Mata Atlântica tenha apresentado a maior remoção total média (-432,83 t CO_2e ha^{-1}), essa média foi acompanhada de alta variabilidade entre propriedades (desvio padrão de 136,74), refletindo diferenças significativas nas práticas de manejo e nos históricos de uso do solo (tabela 5).

Na Caatinga, a remoção média por área foi inferior (-299,34 t CO_2e ha^{-1}), porém com menor dispersão dos dados (desvio padrão de 33,73), sugerindo maior uniformidade entre os sistemas produtivos (Tabela 5). No entanto, a remoção média por árvore plantada foi ligeiramente superior na Caatinga (-0,59 t CO_2e/planta, desvio padrão de 0,22), em comparação à Mata Atlântica (-0,50 t CO_2e/planta, desvio padrão de 0,18), indicando maior contribuição proporcional de cada árvore, possivelmente associada a menor densidade de indivíduos. Embora haja trabalhos que indiquem uma maior eficiência das espécies nativas da Caatinga para o sequestro de carbono, ressalte-se que neste estudo as espécies utilizadas nos SAFs da

Caatinga foram predominantemente frutíferas e madeireiras exóticas (Apêndice 1), portanto não havendo relação direta com os dados de remoção por árvore observados.

Tabela 5. Remoções acumuladas[1] de GEE (t.CO_2e) por processos biogênicos e mudança de uso do solo em SAFs, por área cultivada (AC) e árvore plantada (AP), nos biomas Mata Atlântica (MA) e Caatinga (CT), em Alagoas.

Fazenda	Bioma	Processos biogênicos		MUOS		Remoção total/ hectare	Remoção total/ árvore
		AC	AP	AC	AP		
		t CO_2e					
A1	CT	-73,4	-0,14	-172,23	-0,33	-245,63	-0,48
A2	CT	-73,4	-0,09	-276,01	-0,35	-349,41	-0,44
A3	CT	-73,4	-0,11	-211,58	-0,31	-284,98	-0,42
A4	CT	-73,4	-0,09	-225,72	-0,28	-299,12	-0,37
D1	CT	-73,4	-0,17	-247,55	-0,59	-320,95	-0,76
I1	CT	-55,05	-0,12	-257,92	-0,57	-312,97	-0,69
I2	CT	-55,05	-0,10	-271,43	-0,48	-326,48	-0,58
I3	CT	-73,4	-0,23	-208,71	-0,66	-282,11	-0,90
I4	CT	-73,4	-0,05	-255,69	-0,17	-329,09	-0,21
I5	CT	-73,4	-0,32	-169,29	-0,73	-242,69	-1,05
C1	MA	-73,4	-0,10	-223,74	-0,32	-297,14	-0,42
MCZ1	MA	-73,4	-0,07	-372,99	-0,38	-446,39	-0,45
MCZ2	MA	-73,4	-0,08	-607,85	-0,63	-681,25	-0,71
ME1	MA	-73,4	-0,03	-403,88	-0,18	-477,28	-0,21
ME2	MA	-73,4	-0,12	-361,59	-0,61	-434,99	-0,73
P1	MA	0	0,00	-259,92	-0,47	-259,92	-0,47
Média geral [2]		-66,52 ± 18,21	-0,11 ± 0,07	-282,88 ± 106,18	-0,44 ± 0,17	-349,40 ± 109,08	-0,56 ± 0,23
Média CT [2]		-69,73 ± 7,34	-0,14 ± 0,08	-229,61 ± 36,62	-0,45 ± 0,18	-299,34 ± 33,73	-0,59 ± 0,24
Média MA [2]		-61,17 ± 27,35	-0,07 ± 0,04	-371,66 ± 123,35	-0,43 ± 0,16	-432,83 ± 136,74	-0,50 ± 0,18

Nota: [1] Estimativas acumuladas para um período de 40 anos.

[2] Valores expressos como média ± desvio padrão.

[3] Valores negativos indicam remoção de CO_2e.

Fonte: elaborado pelo auto, 2026.

Na média geral as remoções por MUOS foram responsáveis por 81,0% (-282,88 t CO_2e ha-[1]) do total de CO_2e removido por hectare, enquanto os processos biogênicos contribuíram com 19,0% (-66,52 t CO_2e ha-[1]). Esses dados indicam que, nos sistemas agroflorestais avaliados, o principal mecanismo de remoção de GEE está associado à recuperação e conversão de uso do solo, via aumento de estoques de carbono no solo e na biomassa área e subterrânea. Esse padrão reforça a importância de práticas que promovam a restauração florestal e a substituição de usos

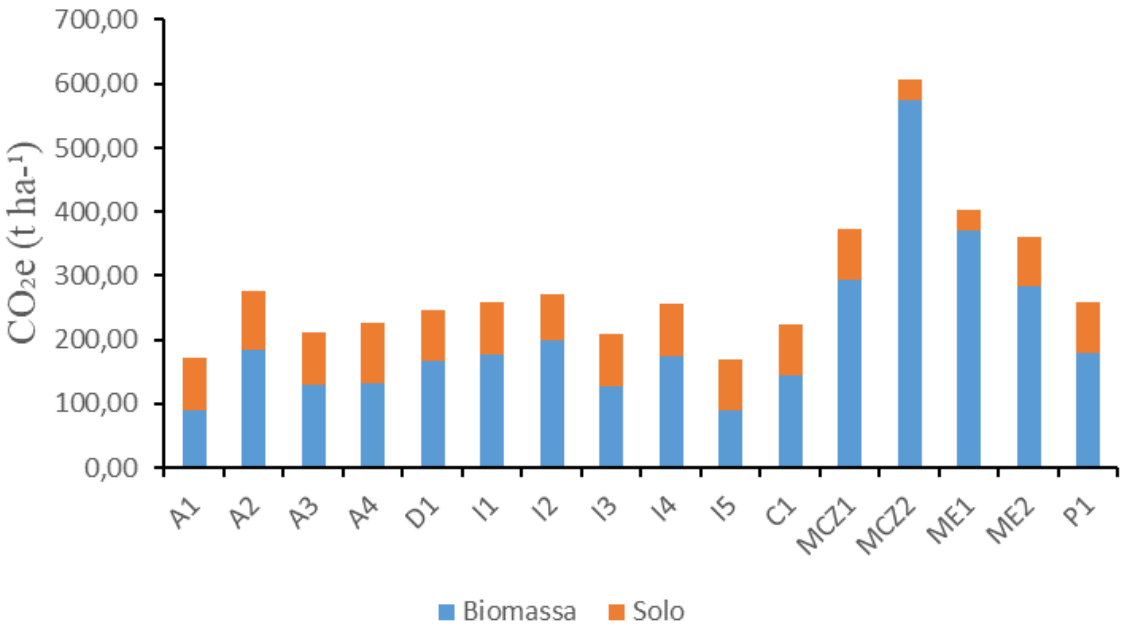
degradantes da terra como estratégia dominante para maximizar o sequestro de carbono em áreas agrícolas convertidas para sistemas sustentáveis, como os SAFs. A maior remoção por MUOS reflete o padrão nacional no qual a reconversão de pastagens degradadas e a (agro)florestação respondem pela maior parte dos sumidouros no uso da terra (SEEG, 2024). Em propriedades com SAFs/ILPF, o ganho combinado de biomassa lenhosa e C do solo explica a magnitude dos saldos negativos (Cerri *et al*., 2023; Pires, 2019).

Entre as propriedades, a unidade MCZ2 (Mata Atlântica) apresentou a maior remoção por MUOS (-607,85 t CO_2e ha^{-1}), sendo 94,6% atribuída à biomassa total (-575,18 t CO_2e ha^{-1}) e apenas 5,4% ao carbono no solo (-32,67 t CO_2e ha^{-1}). Também se destacaram nessa categoria as unidades ME1 e ME2, com remoções de -403,88 e -361,59 t CO_2e ha^{-1}, respectivamente, predominando novamente a contribuição da biomassa. Destaca-se que nessas áreas houve a conversão de uso do solo de pastagens degradadas para SAFs, evidenciando o potencial dos sistemas integrados. Na Caatinga, os valores por propriedade variaram de -169,29 t CO_2e ha^{-1} (I5) a -276,01 t CO_2e ha^{-1} (A2), confirmando uma contribuição menor, mas ainda relevante no contexto do sequestro de carbono (tabela 6).

Resultados análogos são descritos em propriedades leiteiras e silvipastoris com conversão recente de pasto, que passam de fontes a sumidouros em poucos anos quando há adição recorrente de biomassa e incremento de densidade arbórea funcional (Almeida, 2023; Rezende, 2024; Chamilete, 2024).

Esses resultados demonstram que os sistemas agroflorestais analisados atuam como importantes sumidouros de carbono. A análise dos desvios padrão reforça a importância de se considerar a variabilidade intra e interbioma na definição de estratégias para ampliação do sequestro de carbono em paisagens agrícolas tropicais.

Figura 5. Sequestro de Carbono[1] (t CO_2e ha^{-1}) por mudança de uso e ocupação do solo, distribuído na biomassa e no solo, em sistemas agroflorestais, nos biomas Caatinga e Mata Atlântica, em Alagoas.



Nota: [1] Estimativas acumuladas projetadas para um período de 40 anos.

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Os resultados obtidos neste estudo alinham-se amplamente com a literatura nacional recente, que demonstra o papel central da conversão de uso do solo e do manejo de biomassa na remoção líquida de GEE. Almeida (2023) registrou valores médios de –7,8 t CO_2e ha^{-1} ano^{-1} em propriedade leiteira integrada a sistemas florestais, com predominância da remoção via acúmulo de carbono no solo. De forma semelhante, Rezende (2024) e Godinho *et al*. (2023) observaram resultados equivalentes em pastagens restauradas e sistemas silvipastoris, reportando neutralidade ou balanço negativo de emissões após menos de dez anos de adoção das práticas regenerativas.

O estudo de Chamilete (2024) identificou reduções expressivas das emissões líquidas em sistemas leiteiros tropicais manejados sob adubação verde e arborização funcional, corroborando a importância da diversificação funcional da paisagem como fator determinante para o sequestro de carbono. Já Cerri *et al*. (2023) destacam que o carbono do solo pode responder por mais de 60% das remoções totais em sistemas integrados, principalmente quando há manejo contínuo da cobertura vegetal e da matéria orgânica. Complementarmente, Pires (2019) demonstrou que o incremento da densidade arbórea em áreas de ILPF eleva o sequestro médio para cerca de –1,5 t CO_2e ha^{-1} ano^{-1}.

Essas convergências reforçam que os sistemas analisados — com remoções médias de –299,34 t CO_2e ha^{-1} na Caatinga e –432,83 t CO_2e ha^{-1} na Mata Atlântica — encontram-se entre os maiores desempenhos nacionais reportados para sistemas agrícolas de base florestal. Assim, a reconversão produtiva agroflorestal e agroecológica desponta como uma das estratégias mais eficazes para neutralização das emissões agrícolas, contribuindo para a meta de neutralidade climática brasileira até 2050 (MAPA, 2021).

Implicações práticas: (i) priorizar conversões de áreas degradadas para SAFs multiestratos; (ii) manter rotinas de podas/coberturas para alimentar o estoque de C no solo; (iii) monitorar SOC (C orgânico do solo) e atributos físicos para evidenciar MUOS; (iv) alinhar com instrumentos de PSA e crédito que reconheçam o serviço climático (MAPA, 2021)

6. CONCLUSÃO

Os resultados confirmam que os SAFs atuam como sumidouros líquidos de carbono, apresentando balanços negativos de gases de efeito estufa (GEE) ao longo dos 40 anos considerados pela ferramenta GHG Protocol Agricultura e Florestas. Com remoções médias de -304,83 t CO_2e ha^{-1} e -0,49 t CO_2e $planta^{-1}$, os sistemas demonstram uma elevada capacidade de sequestro de carbono em propriedades familiares nos biomas Caatinga e Mata Atlântica em Alagoas.

Os SAFs da Mata Atlântica apresentaram maior remoção média por hectare (cerca de –370,73 t CO_2e ha^{-1}), enquanto os sistemas da Caatinga se destacaram pela maior eficiência média por planta (cerca de –0,53 t CO_2e $planta^{-1}$) e por menores emissões diretas dos Escopos 1 e 2. Embora a Mata Atlântica concentre maiores estoques e remoções totais em função da maior biomassa, os SAFs na Caatinga demonstram grande potencial de mitigação climática mesmo em condições semiáridas, quando adequadamente manejados.

A maior parte das remoções está associada à mudança de uso e ocupação do solo, responsável em média por 80% do total de CO_2e removido por hectare, enquanto os processos biogênicos complementam esse serviço ecossistêmico. A conversão de pastagens degradadas e áreas de uso convencional em SAFs foi determinante para o aumento dos estoques de carbono no solo (em média 73%) e na biomassa (27% na média geral), confirmando a relevância da restauração produtiva como estratégia de mitigação das mudanças climáticas no meio rural.

Operações mecanizadas e Escopo 2 responderam em conjunto pela quase totalidade das emissões positivas, com média de 44,57 t CO_2e ha^{-1} ao longo do período avaliado. Ainda assim, essas emissões foram amplamente compensadas pelas remoções florestais e de solo, resultando em balanços líquidos negativos em todas as propriedades. A ausência de fertilizantes nitrogenados sintéticos e a adoção predominante de práticas agroecológicas contribuíram para

manter as emissões diretas em patamares moderados, reforçando o caráter de baixa emissão de carbono dos sistemas analisados.

Por fim, os resultados obtidos reforçam que os SAFs agroecológicos constituem uma importante estratégia para o cumprimento das metas brasileiras de redução de emissões e neutralidade climática, em consonância com o Plano ABC+ e com os compromissos assumidos nas contribuições nacionalmente determinadas (NDC). Recomenda-se, como perspectivas futuras, o aprofundamento de estudos que integrem inventários de GEE com medições diretas de carbono no solo e na biomassa, séries temporais mais longas e comparações com sistemas agrícolas convencionais, de modo a refinar os fatores de emissão utilizados e consolidar a base científica necessária à formulação de políticas públicas de fomento aos SAFs em escala de paisagem.

7. REFERÊNCIAS

AGENDA GOTSCH. **Ernst Götsch**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://agendagotsch.com/pt/ernst-gotsch/. Acesso em: 29 fev. 2024.

ALMEIDA, T. F. **Estimativas do balanço de gases de efeito estufa em propriedade leiteira integrada com a produção vegetal**: **a partir das ferramentas GHG Protocol Agricultura e Florestas e Cool Farm Tool.** 2023. Dissertação (Mestrado em Nutrição e Produção Animal) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: **a dinâmica produtiva da agricultura sustentável**. 5. ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2012.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Agroecology**: **science and politics**. London: Fernwood, 2017.

BALBINO, L. C. *et al*. Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). **Informações Agronômicas**, [s. l.], v. 138, p. 1–18, 2011.

BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F.; CARVALHO FILHO, O. M. Matéria seca de Gliricidia sepium em função da altura e da frequência de corte para adubação verde em sistema de cultivo em alamedas em solos de tabuleiros costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 5., 2005, Guarapari. **Anais...** Cruz Alta: ABA, 2005. p. 1051–1054.

BARROS, S.; CERRI, C. E. P.; WRI BRASIL; EMBRAPA. **Carbon sequestration potential of agroforestry systems in Brazil**: a technical report on biomass management and soil carbon dynamics. Brasília, DF: WRI Brasil, 2019.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 151–163, 1996.

BIELUCZYK, W. *et al*. Carbon storage potential in Atlantic Forest restoration: comparing tree-based recovery and pasture regeneration. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 194, p. 106808, 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano ABC+ 2020–2030**: agricultura de baixa emissão de carbono. Brasília, DF: MAPA, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Tecnologias do ABC+ (SPSABC)**. Brasília, DF: MAPA, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/tecnologias-do-abc-spsabc. Acesso em: 6 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília, DF: MCTI, 2022.

BUNCH, R. **Two ears of corn**: a guide to people-centered agricultural improvement. Oklahoma City: World Neighbors, 1982.

CERRI, C. C. *et al*. Agricultura de baixo carbono e mitigação de emissões no Brasil. **Ciência e Cultura**, [s. l.], v. 75, n. 1, p. 34–42, 2023.

CERRI, C. E. P. *et al*. **Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono**. Belo Horizonte: UFMG, 2023.

CERRI, C. E. P. *et al*. Carbon sequestration in Brazilian agriculture: from science to high-integrity carbon credits. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 82, n. 1, e20230145, 2025.

CHAMILETE, S. A. M. **Balanço de gases de efeito estufa em sistemas leiteiros de clima tropical**. 2024. Dissertação (Mestrado em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2024.

COSTA, L. M. da *et al*. A comparative analysis of GHG inventories and ecosystems carbon absorption in Brazil. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 958, art. 177932, 2025.

D'ANGELIS, G. M. V. Mudanças climáticas e sistemas agroflorestais: a contribuição das agroflorestas urbanas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. **Cadernos de Agroecologia**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2024.

FAO. **Trees, forests and land use in drylands**: the first global assessment – Full report. Rome: FAO, 2017. Disponível em: https://www.fao.org/3/i8460en/I8460EN.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

FERREIRA, M. C.; AGUIAR, L. M. Serviços ecossistêmicos e sistemas agroflorestais: uma análise das sinergias e lacunas de conhecimento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 181–193, 2021.

FONTES, A. G. **Ciclagem de nutrientes em sistemas agroflorestais de cacau no sul da Bahia**. 2006. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2006.

FORSTER, P. et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. **In**: SOLOMON, S. et al. (ed.). **Climate Change 2007**: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 129–234.

FRANCO, F. S. *et al*. Quantificação de erosão em sistemas agroflorestais e convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 581–589, 2002.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas da Mata Atlântica**: remanescentes florestais e ecossistemas associados no período 2022–2023. São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.sosma.org.br. Acesso em: 14 jun. 2025.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology**: **the ecology of sustainable food systems**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.

GÖTSCH, E. **Break-through in agriculture**. Piraí do Norte, BA: Fazenda Três Colinas Agrossilvicultura Ltda, 1994. Disponível em: https://www.cepeas.org/wp-content/uploads/2018/01/2-Break-Through-in-Agriculture.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

GRESCHUK, I. V. *et al*. Soil carbon storage in Brazilian drylands: a review. **Catena**, [s. l.], v. 257, art. 109144, 2025.

GUERRA-JÚNIOR, A. S. *et al*. Modificação das condições químicas do solo em um SAF Horta-Floresta. **Cadernos de Agroecologia**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2024.

GURGEL, A. C.; LAURENZANA, R. D. **Desafios e oportunidades da agricultura brasileira de baixo carbono**. Brasília, DF: Ipea, 2016.

IMAFLORA. **Guia para pequenos produtores acessarem o mercado de carbono**. Piracicaba: Imaflora, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2019**: mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2021**: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change and Land**: an IPCC special report. Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/srccl/. Acesso em: 14 jun. 2025.

JUNQUEIRA, A. C. *et al*. Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 102–115, 2013.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, [s. l.], v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

LEITE, L. F. C.; RESENDE, A. S.; CAMPOS, D. V. B. de. Agroflorestas como estratégia para mitigação e adaptação às mudanças climáticas. **Cadernos de Agroecologia**, [s. l.], v. 15, n. 2, 2020.

MACHADO FILHO, G. C.; SILVA, F. R. da. Benefícios sociais, econômicos e ambientais dos sistemas agroflorestais (SAFs) em pequenas propriedades rurais. **Inclusão Social**, Brasília, v. 1, n. 6, p. 219–225, 2012.

MAIA, S. M. F. *et al*. Impactos de sistemas agroflorestais e manejo convencional sobre a qualidade do solo no semiárido cearense. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 837–848, 2006.

MAIA, S. M. F. *et al*. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.

MAIA, S. M. F. *et al*. Soil organic carbon stock changes due to land-use change in the Brazil semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 137, n. 3-4, p. 399-405, 2010.

MAIA, S. M. F. *et al*. Mudanças nos estoques de carbono orgânico do solo em sistemas agrícolas no semiárido de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **Anais...** Natal: SBCS, 2015.

MAIA, S. M. F. *et al*. Combined effect of intercropping and minimum tillage on soil carbon sequestration and organic matter pools in the semiarid region of Brazil. **Soil Research**, [s. l.], v. 57, n. 3, p. 266–275, 2019.

MAIA, S. M. F. *et al*. Greenhouse gas emissions from Brazilian agriculture: a review of the last 10 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0210134, 2022.

MEDEIROS, A. S. *et al*. Losses and gains of soil organic carbon in grasslands in the Brazilian semi-arid region. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 78, n. 3, 2021.

MEDEIROS, A. S. *et al*. Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma Regional**, [s. l.], v. 33, e00647, 2023.

MEDEIROS, R. S. **Sequestro de carbono em florestas tropicais e secas**: implicações para mitigação climática nos biomas Caatinga e Mata Atlântica. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 61, p. 281–295, 2004.

MOREIRA, V. F. *et al*. **Produção de biomassa de guandu em função de diferentes densidades e espaçamentos entre sulcos de plantio**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2003.

NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.

NATALE, W. *et al*. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1475–1485, 2007.

NATALE, W. *et al*. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 1294–1306, 2012.

NOBRE, C. A. *et al*. **Os biomas brasileiros e a crise climática**: contribuições científicas para políticas públicas. Brasília, DF: PBMC, 2019.

NOGUEIRA, R. S. **Distribuição espacial do estoque de carbono orgânico total em luvissolos sob sistemas agrícolas convencionais e agroflorestais**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PAULINO, G. M. *et al*. Desempenho da gliricídia no cultivo em aleias em pomar orgânico de mangueira e gravioleira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 781–789, 2011.

PENEIREIRO, F. M. **Sistemas agroflorestais dirigidos pela sucessão natural**: um estudo de caso. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1999.

PIRES, A. S. **Avaliação do sequestro de carbono em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Cerrado brasileiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

PIRES, L. F. Integrated crop-livestock-forestry systems: a strategy for soil carbon sequestration and greenhouse gas mitigation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, e00125, 2019.

PIRES, R. L. O. **Potencial de remoção de gases de efeito estufa do sistema de integração pecuária-floresta em áreas de Cerrado**. Rio de Janeiro: FGV, 2019.

POLETTO, R. S. *et al*. **Sistema agroflorestal**: princípios, metodologia, percepções, experiências e resultados na área rural de Ribeirão Claro (PR). Londrina: Madrepérola, 2020.

POSIT TEAM. **RStudio**: integrated development environment for R. Boston, MA: Posit Software, PBC, 2026. Disponível em: http://www.posit.co/. Acesso em: 10 mar. 2026.

PUTTINI, B. F.; NAIDHIG, D.; CORAZZA, R. I. Integrando o pagamento por serviços ambientais (PSA) aos sistemas agroflorestais (SAFs). In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 26., 2024, São Paulo. **Anais...** São Paulo: FEA/USP, 2024. p. 1–6.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 10 mar. 2026.

REZENDE, C. L. Práticas regenerativas e balanço de carbono em pastagens tropicais. **Cadernos de Agroecologia**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2024.

RIBEIRO, M. C. *et al*. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? **Biological Conservation**, [s. l.], v. 142, p. 1141–1153, 2009.

SANTOS, C. C. *et al*. Enhancing soil quality in the Brazilian semi-arid through integrated livestock–forest systems. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 99, art. 201, 2025.

SANTOS, S. C. *et al*. Changes in Soil Organic Carbon Stocks Due to Land Use and Management Changes in the Extended São Francisco River Basin. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 36, p. 1–13, 2024.

SCHEMBERGUE, A. *et al*. Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 9–30, 2017.

SCHROTH, G. *et al*. **Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes**. Washington: Island Press, 2015.

SEEG. **Relatório Analítico SEEG 12**: análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. Observatório do Clima, 2024. Disponível em: https://seeg.eco.br. Acesso em: 14 jan. 2026.

SILVA, J. M. C. *et al*. Caatinga: um bioma singular no contexto da conservação. **Megadiversidade**, [s. l.], v. 13, n. 1–2, p. 6–18, 2017.

SILVA, L. C. R. *et al*. Agroforestry systems and climate change mitigation in the Brazilian Atlantic Forest. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [s. l.], v. 25, p. 923–940, 2020.

SOMARRIBA, E. et al. Carbon storage and tree diversity in cacao agroforestry systems in Central America. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 173, p. 29–36, 2013.

SOUZA, E. Y. B. *et al*. Avaliação da produtividade em plantio adensado e da qualidade da forragem de Moringa oleifera. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO, 8., 2017, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2017.

TORRES, C. M. M. E. *et al*. Sistemas Agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 34, n. 79, p. 235–244, 2014.

TORRES, J. A. *et al*. Práticas integradas de manejo de carbono em paisagens agrícolas tropicais. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 116, n. 3, p. 250–263, 2014.

VASCONCELLOS, R. C. de; BELTRÃO, N. E. S. Avaliação de prestação de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais através de indicadores ambientais. **Interações**, Campo Grande, v. 19, n. 1, p. 209–220, 2018.

WRI BRASIL. **Greenhouse Gas Protocol calculation tool for forestry in Brazil**: technical note. Brasília, DF: WRI Brasil, 2020. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/ghg_protocolo-florestas-technicalnote.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

WRI BRASIL. **Metodologia do GHG Protocol da Agricultura**. Brasília, DF: WRI Brasil, 2015.

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010.

APÊNDICE 1- LISTA DE ESPÉCIES DOS SAFS E DENSIDADE (ÁRVORES·HA⁻¹) POR PROPRIEDADE

Cód. Fazenda: A1 | Município: Água Branca | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,31

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	382
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	12
Frutífera	Limão taiti	*Citrus latifolia*	15
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	42
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	30
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	18
Frutífera	Laranja	*Citrus sinensis*	9
Frutífera	Tangerina	*Citrus reticulata*	9
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**517**

Cód. Fazenda: A2 | Município: Água Branca | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,20

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Madeireira/serviço	Barriguda	*Ceiba glaziovii*	6
Madeireira/serviço	Pau ferro	*Libidibia ferrea*	13
Madeireira/serviço	Pereiro	*Aspidosperma pyrifolium*	96
Madeireira/serviço	Aroeira-do-sertão	*Myracrodruon urundeuva*	96
Madeireira/serviço	Craibeira	*Tabebuia aurea*	67
Madeireira/serviço	Angico-vermelho	*Anadenanthera colubrina*	100
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	50
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	50
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	133
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	50
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	50
Frutífera	Muricí-do-cerrado	*Byrsonima crassifolia*	67
Frutífera	Umbu	*Spondias tuberosa*	22
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**800**

Cód. Fazenda: A3 | Município: Água Branca | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,31

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	160
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	143
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	65
Frutífera	Limão taiti	*Citrus latifolia*	39
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	58
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	71
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	97
Frutífera	Tangerina	*Citrus reticulata*	39
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**672**

Cód. Fazenda: A4 | Município: Água Branca | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,18

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	133
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	28
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	78
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	133
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	33
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	78
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	78
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	78
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	133
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	28
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**800**

Cód. Fazenda: C1 | Município: Chã Preta | Bioma: Mata Atlântica | Área (ha): 0,125

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	Sabiá	*Mimosa caesalpiniifolia*	167
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	333
Frutífera	Cajá	*Spondias mombin*	67
Frutífera	Pitanga	*Eugenia uniflora*	133
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**700**

Cód. Fazenda: D1 | Município: Delmiro Gouveia | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,30

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Madeireira/serviço	Eucalipto	*Eucalyptus urograndis*	6
Madeireira/serviço	Barriguda	*Ceiba glaziovii*	6
Madeireira/serviço	Pau ferro	*Libidibia ferrea*	13
Madeireira/serviço	Mororó	*Bauhinia forficata*	3
Madeireira/serviço	Craibeira	*Tabebuia aurea*	6
Madeireira/serviço	Paineira	*Ceiba speciosa*	6
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	337
Madeireira/serviço	Angico-vermelho	*Anadenanthera colubrina*	6
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	3
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	13
Frutífera	Laranja	*Citrus sinensis*	6
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	10
Frutífera	Umbu	*Spondias tuberosa*	6
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**421**

Cód. Fazenda: I1 | Município: Inhapi | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,21

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	9
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	47
Frutífera	Amora-preta-grande	*Morus nigra*	9
Frutífera	Atemóia	*Annona atemoya*	14
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	28
Frutífera	Limão Tahiti	*Citrus latifolia*	9
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	19
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	84
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	177
Frutífera	Laranja	*Citrus sinensis*	28
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	9
Frutífera	Tangerina	*Citrus reticulata*	19
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**452**

Cód. Fazenda: I2 | Município: Inhapi | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,18

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	12
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	47
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	12
Frutífera	Limão Tahiti	*Citrus latifolia*	106
Frutífera	Coco-da-bahia	*Cocos nucifera*	71
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	47
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	82
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	153
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	35
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**565**

Cód. Fazenda: I3 | Município: Inhapi | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,30

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	45
Madeireira/serviço	Neem indiano	*Azadirachta indica*	3
Madeireira/serviço	Craibeira	*Tabebuia aurea*	7
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	9
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	18
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	30
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	45
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	9
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	121
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	12
Frutífera	Umbu	*Spondias tuberosa*	15
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**314**

Cód. Fazenda: I4 | Município: Inhapi | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,20

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	400
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	28
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	78
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	333
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	33
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	78
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	78
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	78
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	400
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	28
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**1534**

Cód. Fazenda: I5 | Município: Inhapi | Bioma: Caatinga | Área (ha): 0,37

Classificação	Nome popular	Nome científico	Densidade (árvores·ha⁻¹)
Madeireira/serviço	Craibeira	*Tabebuia aurea*	3
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	5
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	3
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	19
Frutífera	Atemóia	*Annona × atemoya*	5
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	30
Frutífera	Cajá manga	*Spondias dulcis*	5
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	24
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	35
Frutífera	Fruta-do-conde	*Annona squamosa*	8
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	5
Frutífera	Graviola	*Annona muricata*	5
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	62
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	11
Frutífera	Umbu	*Spondias tuberosa*	11
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**231**

Cód. Fazenda: MCZ1 | Município: Maceió | Bioma: Mata Atlântica | Área (ha): 0,10

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	Craibeira	*Tabebuia aurea*	15
Madeireira/serviço	Tamboril	*Enterolobium contortisiliquum*	15
Madeireira/serviço	Leucena	*Leucaena leucocephala*	20
Madeireira/serviço	Guapuruvú	*Schizolobium parahyba*	10
Madeireira/serviço	Ipê-amarelo	*Handroanthus albus*	10
Madeireira/serviço	Ipê-roxo	*Handroanthus impetiginosus*	70
Madeireira/serviço	Jatobá	*Hymenaea courbaril*	10
Madeireira/serviço	Eucalipto urograndis	*Eucalyptus × urograndis*	190
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	20
Frutífera	Açaí	*Euterpe oleracea*	120
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	200
Frutífera	Cacau	*Theobroma cacao*	100
Frutífera	Cajá	*Spondias mombin*	20
Frutífera	Coco-da-bahia	*Cocos nucifera*	40
Frutífera	Graviola	*Annona muricata*	20
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	90
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	10
Frutífera	Pitanga	*Eugenia uniflora*	10
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**970**

Cód. Fazenda: MCZ2 | Município: Maceió | Bioma: Mata Atlântica | Área (ha): 0,12

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	(não especificado – crescimento moderado)	—	100
Madeireira/serviço	(não especificado – crescimento rápido)	—	17
Madeireira/serviço	Ipê-roxo	*Handroanthus impetiginosus*	133
Outras perenes	Ouricuri	*Syagrus coronata*	67
Madeireira/serviço	Amendoeira-da-praia	*Terminalia catappa*	33
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	17
Madeireira/serviço	Aroeira-pimenteira	*Schinus terebinthifolius*	17
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	33
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	67
Frutífera	Coco-da-bahia	*Cocos nucifera*	178
Frutífera	Graviola	*Annona muricata*	17
Frutífera	Ingá-cipó	*Inga edulis*	83
Frutífera	Jambo-vermelho	*Syzygium malaccense*	50
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	17
Madeireira/serviço	Oití	*Licania tomentosa*	67
Frutífera	Pitanga	*Eugenia uniflora*	33
Frutífera	Pitomba	*Talisia esculenta*	17
Frutífera	Tamarindo	*Tamarindus indica*	17
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**963**

Cód. Fazenda: ME1 | Município: Messias | Bioma: Mata Atlântica | Área (ha): 1,00

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	Eucalipto	*Eucalyptus urograndis*	417
Madeireira/serviço	(não especificado – crescimento lento)	—	10
Madeireira/serviço	Pau Brasil	*Paubrasilia echinata*	35
Madeireira/serviço	Acácia mangium	*Acacia mangium*	417
Madeireira/serviço	Paineira	*Ceiba speciosa*	30
Madeireira/serviço	Angico-vermelho	*Anadenanthera colubrina*	50
Madeireira/serviço	Ipê-roxo	*Handroanthus impetiginosus*	30
Madeireira/serviço	Jatobá	*Hymenaea courbaril*	10
Madeireira/serviço	Urucum	*Bixa orellana*	50
Outras perenes	(não especificado – porte pequeno)	—	3
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	20
Outras perenes	Aroeira-pimenteira	*Schinus terebinthifolius*	20
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	417
Frutífera	Cajá	*Spondias mombin*	2
Frutífera	Limão taiti	*Citrus latifolia*	117
Frutífera	Genipapo	*Genipa americana*	40
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	200
Frutífera	Ingá-cipó	*Inga edulis*	35
Frutífera	Jaca	*Artocarpus heterophyllus*	40
Frutífera	Jambo-vermelho	*Syzygium malaccense*	5
Frutífera	Laranja	*Citrus sinensis*	300
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	20
Frutífera	Pitanga	*Eugenia uniflora*	30
Frutífera	Sapoti	*Manilkara zapota*	5
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**2303**

Cód. Fazenda: ME2 | Município: Messias | Bioma: Mata Atlântica | Área (ha): 0,30

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	(não especificado – crescimento moderado)	—	6
Madeireira/serviço	Acácia mangium	*Acacia mangium*	21
Madeireira/serviço	Ipê-roxo	*Handroanthus impetiginosus*	3
Madeireira/serviço	Urucum	*Bixa orellana*	3
Madeireira/serviço	Eucalipto urograndis	*Eucalyptus × urograndis*	3
Outras perenes	(não especificado – porte pequeno)	—	3
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	28
Frutífera	Açaí	*Euterpe oleracea*	25
Frutífera	Banana	*Musa spp.*	142
Frutífera	Cajá	*Spondias mombin*	6
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	37
Frutífera	Ingá-cipó	*Inga edulis*	6
Frutífera	Jaca	*Artocarpus heterophyllus*	3
Frutífera	Laranja	*Citrus sinensis*	100
Frutífera	Mamão	*Carica papaya*	92
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	37
Frutífera	Noní	*Morinda citrifolia*	3
Frutífera	Pitanga	*Eugenia uniflora*	15
Frutífera	Sapoti	*Manilkara zapota*	3
Frutífera	Seriguela	*Spondias purpurea*	3
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**539**

Cód. Fazenda: P1 | Município: Pilar | Bioma: Mata Atlântica | Área (ha): 0,81

Classificação	**Nome popular**	**Nome científico**	**Densidade (árvores·ha⁻¹)**
Madeireira/serviço	Eucalipto	*Eucalyptus urograndis*	12
Madeireira/serviço	Neem	*Azadirachta indica*	4
Madeireira/serviço	Moringa	*Moringa oleifera*	ND
Frutífera	Abacate	*Persea americana*	7
Frutífera	Acerola	*Malpighia emarginata*	12
Frutífera	Amora-preta-grande	*Morus nigra*	62
Frutífera	Cajá manga	*Spondias dulcis*	2
Frutífera	Caju	*Anacardium occidentale*	37
Frutífera	Limão taiti	*Citrus × latifolia*	6
Frutífera	Coco-da-bahia	*Cocos nucifera*	12
Frutífera	Goiaba	*Psidium guajava*	10
Frutífera	Graviola	*Annona muricata*	7
Madeireira/serviço	Gliricídia	*Gliricidia sepium*	7
Frutífera	Ingá-cipó	*Inga edulis*	1
Frutífera	Jabuticaba-da-praia	*Eugenia rotundifolia*	2
Frutífera	Jaca	*Artocarpus heterophyllus*	5
Frutífera	Jambolão	*Syzygium cumini*	5
Frutífera	Mamão	*Carica papaya*	25
Frutífera	Manga	*Mangifera indica*	12
Frutífera	Pitanga	*Eugenia uniflora*	12
Frutífera	Sapoti	*Manilkara zapota*	1
		Densidade total (árvores·ha⁻¹)	**241**

APÊNDICE 2- PRODUTO TÉCNICO/TECNOLÓGICO – MANUAL/PROTOCOLO

Manual de Coleta de Dados para Inventários de GEE em Sistemas Agroflorestais

Protocolo de uso do GHG Protocol Florestas & SAFs

Van Giap Ramalho Cardoso
Stoécio Malta Ferreira Maia

INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

VAN GIAP RAMALHO CARDOSO

MANUAL DE COLETA DE DADOS PARA INVENTÁRIOS DE GEE EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

PROTOCOLO DE USO DO GHG PROTOCOL FLORESTAS & SAFS

Manual Técnico Manejo e Monitoramento Ambiental

Marechal Deodoro - AL
2025

EXPEDIENTE TÉCNICO

INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS - IFAL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO - PRPPI Reitor:
Carlos Guedes de Lacerda

Pró-Reitora de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação:
Eunice Palmeira da Silva

Coordenador do Mestrado em Tecnologias Ambientais:
Joabe Gomes de Melo

Autores:
Van Giap Ramalho Cardoso
Stoécio Malta Ferreira Maia

Projeto Gráfico:
Camila Karoline Justino Marques

SUMÁRIO EXECUTIVO

O setor agropecuário brasileiro possui papel estratégico na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), tanto por sua expressiva participação nas emissões nacionais quanto pela capacidade de incorporar, em larga escala, tecnologias sustentáveis e práticas de produção mais eficientes. Em reconhecimento a esse potencial, o Governo Federal, por meio do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), estruturou a política ABC+, que orienta a adoção de sistemas produtivos de baixa emissão de carbono e incentiva a implementação de medidas de adaptação climática. Nesse contexto, os sistemas produtivos rurais tornam-se fundamentais no enfrentamento das mudanças climáticas, já que a agropecuária e o uso da terra respondem por parcela significativa das emissões brasileiras, ao mesmo tempo em que concentram grande parte das oportunidades de mitigação, especialmente por meio da restauração ecológica, do manejo florestal e do aprimoramento das práticas agrícolas.

Entre as alternativas promovidas pelo ABC+ e reconhecidas como essenciais para a transição rumo a uma agricultura de baixa emissão, destacam-se os sistemas agroflorestais (SAFs). Por integrarem árvores aos cultivos agrícolas e, em alguns modelos, à pecuária, os SAFs ampliam o sequestro de carbono, diversificam a produção e fortalecem a resiliência socioambiental dos agroecossistemas.

Por outro lado, agricultores familiares, técnicos de campo e organizações de Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) ainda enfrentam limitações no acesso a instrumentos práticos para mensuração das emissões e remoções de GEE aplicados aos sistemas agropecuários. Ferramentas já consolidadas, como a "Ferramenta de Cálculo para Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Florestas e Sistemas Agroflorestais no Brasil – GHG Protocol Florestas & SAFs", permanecem de difícil apropriação, em especial devido à distância entre a linguagem técnico-científica dos inventários de GEE e o cotidiano das equipes de ATER e da agricultura familiar.

O Manual de Coleta de Dados para Inventários de GEE em Sistemas Agroflorestais – Protocolo de uso do GHG Protocol Florestas & SAFs surge justamente para preencher essa lacuna. Este produto organiza, em linguagem clara, objetiva e operacional, um conjunto de orientações, fichas de campo e modelos de planilhas que orientam técnicos(as), agricultores(as) e pesquisadores(as) na coleta padronizada de dados necessários à aplicação do GHG Protocol em inventários de GEE em SAFs. Ao decodificar etapas e requisitos metodológicos, o manual facilita a apropriação da ferramenta e amplia sua aplicabilidade em contextos reais de assistência técnica e pesquisa.

A estrutura do documento acompanha o fluxo de trabalho das equipes de campo: inicia-se com a identificação da propriedade e do SAF; segue para a caracterização do solo e do uso anterior da área; orienta o registro de insumos agrícolas, operações mecanizadas e uso de combustíveis; detalha o levantamento do consumo de energia elétrica; e sistematiza a composição e o arranjo vegetal dos SAFs, incluindo espécies perenes, culturas anuais e o desenho espacial do sistema. Complementam o protocolo o levantamento de croquis e o registro fotográfico ou de imagens de satélite, fundamentais para a interpretação espacial dos dados e para processos de formação junto aos agricultores e técnicos de ATER.

Espera-se que este manual contribua para ampliar o uso de metodologias de mensuração de GEE no âmbito dos SAFs, fortalecendo a capacidade de pesquisadores, equipes de ATER e agricultores de compreender os impactos ambientais — especialmente os benefícios — desses sistemas produtivos. Dessa forma, o documento apoia a consolidação de uma agricultura mais sustentável, integrada às diretrizes do ABC+ e alinhada aos esforços nacionais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

SUMÁRIO

1. Apresentação 6

2. Objetivo, público-alvo e escopo 7

2.1 Objetivo geral 7

2.2 Objetivos específicos 7

2.3 Público-alvo 7

3. Organização geral do formulário "FICHA DE CAMPO" 7

4. Protocolo de coleta de dados por blocos 8

Bloco A – Identificação da propriedade e localização 8

Bloco B – Solo e uso anterior da área 9

Bloco C – Histórico/área do SAF 11

Bloco D – Insumos agrícolas e manejo do solo 12

Bloco E – Culturas anuais 16

Bloco F – Operações mecanizadas e combustíveis 17

Bloco G – Consumo de energia elétrica 18

Bloco H – Uso do fogo 19

Bloco I – Espécies perenes e estrutura do SAF 20

Bloco J – Croqui da área e registro fotográfico 22

5. Passo a passo do trabalho de campo 23

5.1 Preparação (antes de ir à propriedade) 23

5.2 Condução da visita 23

5.3 Digitação e conferência 24

6. Procedimentos de preenchimento da ferramenta GHG Protocol Florestas e SAFs 24

6.1 Estrutura geral da ferramenta 24

6.2 Aba "Sistema agroflorestal" – passo a passo 25

6.3 Aba "Compra de energia elétrica" 26

6.4 Aba "Síntese das emissões" 26

Ficha de Campo 27

Bloco I – Espécies perenes do saf 27

Bloco J – Área do SAF (desenhar croqui da área ou inserir foto aérea/imagem de satélite) 39

1. Apresentação

As mudanças climáticas e o avanço das emissões de gases de efeito estufa (GEE) exigem ferramentas que permitam medir, reportar e verificar emissões e remoções em sistemas produtivos. Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) têm grande potencial de sequestro de carbono e de redução de emissões, sobretudo na agricultura familiar, mas esse potencial só se transforma em argumento técnico e político quando está quantificado em inventários de GEE.

Este manual/protocolo orienta técnicos(as) de ATER (Assistência Técnica e Extensão Rural), pesquisadores(as) e agricultores(as) na coleta padronizada de dados para elaboração de inventários de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) em sistemas agroflorestais (SAFs), utilizando a Ferramenta de Cálculo para Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Florestas e Sistemas Agroflorestais no Brasil – GHG Protocol Florestas e SAFs.

A ferramenta foi desenvolvida pelo WRI Brasil e parceiros, no âmbito do Programa Brasileiro GHG Protocol, com o objetivo de permitir que produtores rurais e organizações estimem suas emissões e remoções de GEE associadas ao manejo florestal e agroflorestal, com base em metodologias compatíveis com as Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de GEE.

Visando à elaboração de inventários de GEE em SAFs este manual descreve, passo a passo, como levantar em campo os dados necessários para alimentar:

1. A ficha de campo: "Inventário de GEE em Sistemas Agroflorestais (GHG Protocol – Florestas & SAFs)";
2. A planilha de cálculo "GHG Protocol – Florestas e Uso da Terra (Sistema agroflorestal)";

2. Objetivo, público-alvo e escopo

2.1 Objetivo geral

Padronizar o levantamento e registro de dados em propriedades rurais com Sistemas Agroflorestais, para subsidiar o preenchimento da planilha GHG Protocol Florestas & SAFs e a elaboração de inventários de emissões e remoções de GEE.

2.2 Objetivos específicos

- Orientar técnicos(as) e agricultores(as) para preencher corretamente a ficha de campo "INVENTÁRIO DE GEE EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS (GHG PROTOCOL FLORESTAS & SAFs";
- Explicar cada campo da ficha, indicando:
    - O que significa;
    - Como perguntar em linguagem simples;
    - Quais unidades de medida usar;
    - Como conferir a informação em campo;
- Indicar como esses dados alimentam os formulários da planilha GHG Protocol – módulo "Sistema agroflorestal" (Tabela 1, Tabela 2.1, etc.);
- Garantir reprodutibilidade e comparabilidade entre propriedades e ao longo do tempo (critério de aplicabilidade e impacto do PTT na área de Ciências Ambientais).

2.3 Público-alvo

- Técnicos(as) de ATER, extensionistas, estudantes e pesquisadores em Agroecologia, Agronomia, Ciências Ambientais e áreas afins;
- Agricultores e agricultoras familiares, que poderão:
    - Entender para que servem os dados;
    - Acompanhar os resultados do seu sistema agroflorestal em termos de emissão e remoção de GEE.

3. Organização geral do formulário "FICHA DE CAMPO"

A ficha de campo utilizada como modelo está organizada em blocos de informação, que se relacionam diretamente com as tabelas da aba "Sistema agroflorestal" da ferramenta GHG Protocol:

1. Bloco A – Identificação da propriedade
2. Bloco B – Caracterização do solo e do uso anterior

3. Bloco C – Histórico do SAF (ano de implantação e área)
4. Bloco D – Insumos e manejo do solo

    - Adubação orgânica
    - Adubação sintética
    - Calcário e/ou gesso
    - Adubação verde

5. Bloco E – Culturas anuais e consórcios
6. Bloco F – Operações mecanizadas e combustíveis
7. Bloco G – Energia elétrica
8. Bloco H – Uso do fogo
9. Bloco I – Espécies perenes e estrutura do SAF

4. Protocolo de coleta de dados por blocos

Bloco A – Identificação da propriedade e localização
Campos principais (adaptados da planilha do GHG):

- Nome do(a) agricultor(a) / (campo "Nome").
- Comunidade / assentamento / fazenda (campo "Comunidade").
- Município e Estado (campos "Município", "Estado").
- Coordenadas geográficas do centro do SAF (latitude e longitude em graus decimais).
- Bioma (Caatinga, Mata Atlântica – Estacional, Cerrado etc., conforme categorias da aba "Fatores de emissão").

Procedimento:

- Registrar o nome do agricultor e nome da fazenda ou comunidade na aba "início" (figura 1)
- Registrar as coordenadas com GPS ou aplicativo de celular.
- Converter para graus decimais, em harmonia com a Tabela 1 da aba "Sistema agroflorestal" do GHG Protocol (figura 2).
- Identificar o bioma a partir de mapas oficiais (IBGE, MapBiomas) ou, na ausência, por conhecimento técnico local.

Dica prática: sempre que possível, marcar os vértices do polígono da área do SAF ou um ponto central representativo. Isso facilita medir a área com apoio de imagens de satélite e softwares de geoprocessamento.

Figura 1. Aba de início da ferramenta de cálculo GHG Protocol SAFs e Florestas.

Bloco B – Solo e uso anterior da área
Tipo de solo / Classe textural
Campo na ficha e na planilha:

- Ficha de campo: "Tipo de solo / Classe textural do solo".
- GHG Protocol – SAF: Tabela 2.1, campo "Classe textural do solo" (arenoso, médio, argiloso).

Perguntas orientadoras:

- "O solo aqui é mais arenoso, mais pesado (argiloso) ou intermediário?"
- "Já fez análise de solo? Há algum laudo recente?" Se sim, utilize essas informações.

Procedimento em campo:

1. Caminhar na área do SAF e retirar pequenas amostras com enxada, pá ou trado.
2. Observar, com agricultor(a), a textura ao tato (solo mais solto, mais "pegajoso" quando molhado etc.).
3. Sempre que possível, confirmar com análise de solo ou parecer técnico.

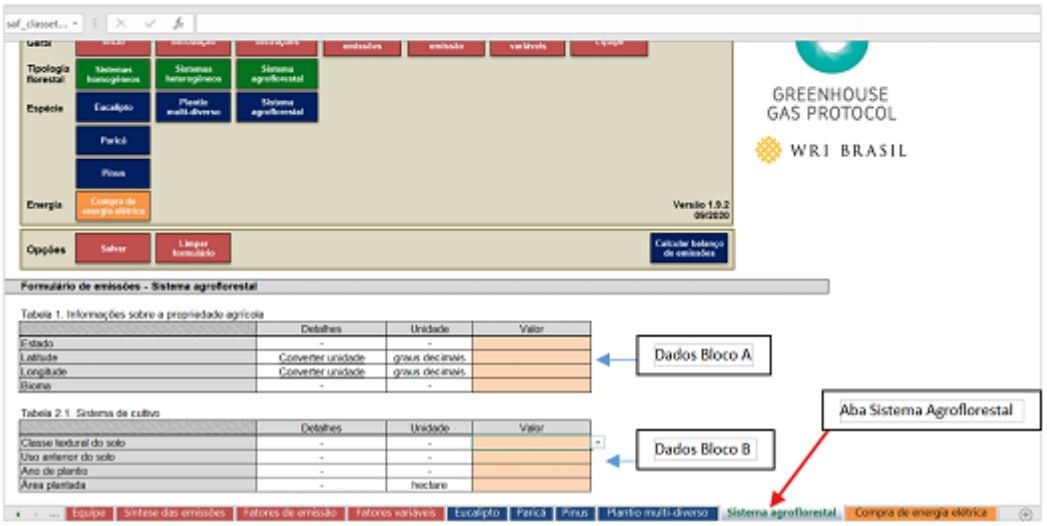
Registro na ficha:
Selecionar uma das opções:

- Arenoso – baixa quantidade de argila (< 15–20%).
- Médio – textura intermediária.
- Argiloso – maior teor de argila, solo "pegajoso" quando molhado.

Uso na planilha GHG:

- Preencher a Tabela 2.1 – campo "Classe textural do solo" (figura 2).

Figura 2. Visão da planilha da ferramenta de cálculo GHG Protocol, indicando a aba Sistema agroflorestal, local de inserção das informações para realização do inventário de GEE.



Uso anterior da área

Campo na ficha e na planilha:

- Ficha de campo: "Uso anterior da área".
- GHG Protocol – SAF: Tabela 2.1, "Uso anterior da terra/solo" (figura 2).

Pergunta orientadora:

- "Antes de implantar o SAF, o que existia aqui?"

Opções típicas (ajustar à ficha):

- Agricultura (roça anual, hortaliças, mandioca etc.).
- Pastagem ou pastagem degradada.
- Área degradada (solo exposto, erosão, capoeira muito pobre).
- Floresta nativa.
- Outras (plantios de eucalipto, pinus, fruticultura etc.).

Procedimento:

- Dialogar com a família sobre o histórico da área (desmatamento, roça, pastagem, abandono).
- Registrar, se possível, a época aproximada de mudança de uso (por exemplo: "roça até 2015, pastagem a partir de 2016").

Registro na ficha:

- Descrever o uso anterior com poucas palavras.
- Marcar a categoria correspondente (roça, pastagem, área degradada, floresta etc.).

Uso na planilha GHG:

- Tabela 2.1 – "Uso anterior da terra" (figura 2).
- Informação essencial para estimar o estoque inicial de carbono e o ganho adicional promovido pelo SAF.

Bloco C – Histórico/área do SAF
Ano de implantação do SAF
Campo na ficha e na planilha:

- Ficha de campo: "Ano de implantação / Ano de plantio".
- GHG Protocol – SAF: Tabela 2.1, campo "Ano de plantio".

Perguntas orientadoras:

- "Em que ano o SAF foi plantado?"
- "Houve plantio em mais de uma etapa? Se sim, quando?"

Procedimento:

- Identificar com a família o ano da primeira implantação do SAF.
- Caso haja reforços posteriores (replantios, enriquecimentos), anotar em "Observações".

Registro na ficha:

- Quando possível, registrar a data completa (ex.: 01/05/2022).
- Na planilha GHG, informar ao menos o ano (figura 1).

Uso na planilha GHG:

- Campo "Ano de plantio" na Tabela 2.1 (figura 2), definindo a idade do SAF para os cálculos de crescimento e estoque de carbono.

Área plantada (m^2 e ha)
Campos na ficha e planilha:

- Ficha de campo: comprimento, largura, área (m^2) e área (ha).
- GHG Protocol – SAF: Tabela 2.1, campo "Área plantada (ha)".

Procedimento em campo:

- 1. Medir **comprimento e largura** do talhão com trena ou GPS.
- 2. Calcular área em m^2:
  - Área (m^2) = comprimento × largura.
- 3. Converter para hectares:
  - Área (ha) = área (m^2) ÷ 10.000.

Situações especiais:

- SAF com formato irregular: dividir em blocos aproximadamente retangulares, medir cada um e somar.
- Confirmar se a área estimada é coerente com a percepção do agricultor (ex.: "meio hectare", "uma tarefa" etc.).

Uso na planilha GHG:

- Preencher "Área plantada (ha)" na Tabela 2.1 (figura 2) e utilizar a área correta em todos os cálculos por hectare (kg/ha, L/ha, tCO_2e/ha).

Bloco D – Insumos agrícolas e manejo do solo
Adubação sintética
Campos principais:

- Ficha de campo: "Adubação sintética".
- Planilha GHG – SAF (figura 3): tabelas específicas para fertilizantes sintéticos (ureia e outros).

Perguntas orientadoras:

- "Você usa adubo químico (NPK, ureia, etc.) no SAF?"
- "Qual o tipo de adubo? Em que quantidade por área e por ano?"

Procedimento:

- 1. Identificar, com agricultor(a) ou técnico(a), quais fertilizantes são usados (NPK, ureia, formulados).
- 2. Levantar quantidades aplicadas por ano (por ex.: sacos/ano).
- 3. Converter para kg/ha/ano, considerando:
  - Peso do saco (ex.: 50 kg);
  - Área do SAF (ha).

Registro na ficha:

- **Produto:** ex. "NPK 10-10-10", "Ureia".
- **Quantidade total aplicada (kg/ha/ano)** em cada ano com aplicação.

Uso na planilha GHG:

- Registrar em tabelas específicas para fertilizantes sintéticos.
- Para ureia, usar a aba própria de ureia.
- Para fertilizantes nitrogenados exceto ureia, informar **teor de N (%)**, conforme exigido pela ferramenta.

Figura 3. Print de tela na aba Sistema Agroflorestal, correspondente as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 para registro de uso de insumos do tipo adubação nitrogenada sintética exceto ureia, apenas ureia e adubação orgânica, respectivamente.

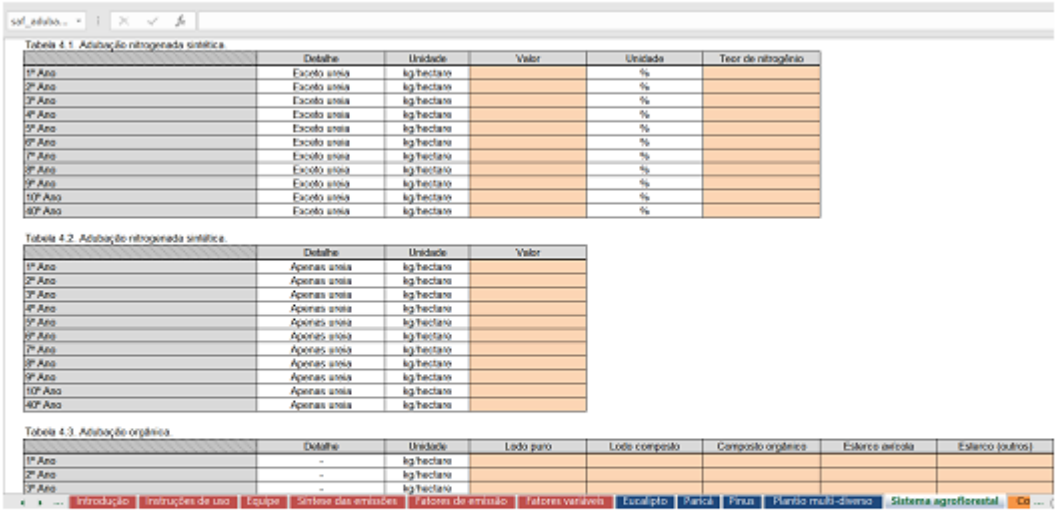


Tabela 4.1. Adubação nitrogenada sintética

	Detalhe	Unidade	Valor	Unidade	Teor de nitrogênio
1º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
2º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
3º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
4º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
5º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
6º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
7º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
8º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
9º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
10º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	
40º Ano	Exceto ureia	kg/hectare		%	

Tabela 4.2. Adubação nitrogenada sintética

	Detalhe	Unidade	Valor
1º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
2º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
3º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
4º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
5º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
6º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
7º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
8º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
9º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
10º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	
40º Ano	Apenas ureia	kg/hectare	

Tabela 4.3. Adubação orgânica

	Detalhe	Unidade	Lodo puro	Lodo composto	Composto orgânico	Esterco avícola	Esterco (outros)
1º Ano	-	kg/hectare					
2º Ano	-	kg/hectare					
3º Ano	-	kg/hectare					

Introdução | Instruções de uso | Equipe | Síntese das emissões | Fatores de emissão | Fatores variáveis | Eucalipto | Parica | Pinus | Plantio multi-diverso | Sistema agroflorestal | Co ...

Adubação orgânica

Campos principais:

- Ficha de campo: "Adubação orgânica".
- Planilha GHG – SAF: tabela de insumos orgânicos (esterco, cama de frango, compostos etc.).

Perguntas orientadoras:

- "Que tipo de adubo orgânico você usa no SAF? (esterco de gado, cama de frango, composto etc.)"
- "Quantos carrinhos, baldes, sacos ou carros de mão por área você aplica por ano?"

Passos para estimar em kg/ha:

- 1. Medir ou pesquisar o **peso médio** do recipiente usado (balde, saco, carro de mão).
- 2. Multiplicar pelo **número de recipientes** usados no ano.
- 3. Dividir pela **área do SAF (ha)** para obter kg/ha/ano.

Registro na ficha:

- Coluna "Tipo": ex. "esterco de gado", "cama de frango".
- Coluna "Quantidade total aplicada (kg/ha/ano)" para cada ano.

Uso na planilha GHG:

- Preencher a tabela 4.3, específica de insumos orgânicos vinculados ao módulo SAF (figura 3).
- Os fatores de emissão (N_2O e CO_2) aparecem na aba "Fatores de emissão".

Adubação verde

Campos principais:

- Ficha de campo: "Adubação verde" / "Espécies de adubação verde".
- Planilha GHG: tabela "Adubação verde" (colunas "Espécies", "ano 1 (kg/ha)", "ano 2 (kg/ha)" etc.).

Perguntas orientadoras:

- "Você planta feijão guandu, crotalária, gliricídia, capim ou outras espécies de adubação verde?"
- "Quantos quilos de semente usam por área? Ou quantas linhas/plantações?"
- "Qual o espaçamento entre plantas e entre linhas?"

Registro na ficha:

- Espécie (ex.: "Gliricídia", "Feijão guandu").
- Quantidade utilizada por ano (kg/ha) ou, quando for o caso, densidade aproximada (ex.: "Feijão guandu 2 x 5 m = 1.000 plantas/ha").

Uso na planilha GHG:

- Preencher a tabela "Adubação verde" na aba sistema agroflorestal (figura 4).
- Algumas espécies entram simultaneamente como insumos (fornecendo N) e como componentes arbóreos do SAF, aumentando as remoções de carbono.

Dica prática:

Para estimar a produção anual de biomassa de adubação verde, registrar:

- Espaçamento entrelinhas e entre plantas;
- Frequência de corte. Com esses dados, buscar referências regionais ou na literatura para estimar produção (t/ha/ano).

Figura 4. Tabelas 4.4 e 4.5 para preenchimento dos dados sobre adubação verde e correção e condicionamento de solo (uso de calcário e/ou gesso).

Tabela 4.4. Adubação verde

	Detalhe	Unidade	Gramínea	Leguminosa	Outros
1º Ano	-	kg/hectare			
2º Ano	-	kg/hectare			
3º Ano	-	kg/hectare			
4º Ano	-	kg/hectare			
5º Ano	-	kg/hectare			
6º Ano	-	kg/hectare			
7º Ano	-	kg/hectare			
8º Ano	-	kg/hectare			
9º Ano	-	kg/hectare			
40º Ano	-	kg/hectare			

Tabela 4.5. Correção e condicionamento de solo

	Detalhe	Unidade	Calcário calcítico	Calcário dolomítico	Gesso agrícola
1º Ano	-	kg/hectare			
2º Ano	-	kg/hectare			
3º Ano	-	kg/hectare			
4º Ano	-	kg/hectare			
5º Ano	-	kg/hectare			
6º Ano	-	kg/hectare			
7º Ano	-	kg/hectare			
8º Ano	-	kg/hectare			
9º Ano	-	kg/hectare			
10º Ano	-	kg/hectare			
39º Ano	-	kg/hectare			
40º Ano	-	kg/hectare			

Introdução | Instruções de uso | Equipe | Síntese das emissões | Fatores de emissão | Fatores variáveis | Eucalipto | Paricá | Pinus | Plantio multi-diverso | Sistema agroflorestal

Calcário (e gesso, quando houver)

Campos principais:

- Ficha de campo: "Calcário/gesso (kg/ha/ano)".
- Planilha GHG – SAF: tabela 4.5 (figura 4) "Calcário" (e, se aplicável, "Gesso").

Perguntas orientadoras:

- "Já foi aplicado calcário nessa área? Em que anos e quantos sacos?"
- "Que tipo de calcário (calcítico ou dolomítico) foi usado?"

Procedimento:

- 1. Levantar o número de sacos aplicados e o tipo de calcário ou gesso.
- 2. Converter a quantidade para kg/ha:
  - Quantidade total (kg) ÷ área do SAF (ha).

Registro na ficha:

- Tipo calcário calcítico ou dolomítico e/ou gesso.
- Quantidade (kg/ha/ano) para cada ano com calagem/gessagem.

Uso na planilha GHG:

- A planilha calcula automaticamente as **emissões de CO_2** associadas à aplicação de calcário (e gesso, se registrado) a partir desses valores.

Bloco E – Culturas anuais
Campos principais:

- Ficha de campo: "Culturas anuais – informar a quantidade de meses para cada ano em que cada cultura esteve presente na área".

Perguntas orientadoras:

- "Quais culturas anuais foram plantadas dentro do SAF? (milho, feijão, mandioca, hortaliças etc.)"
- "Por quantos meses, em cada ano, elas ficaram na área?"

Registro na ficha:
Para cada cultura:

- Nome da cultura.
- Número de meses por ano em que ocupou o SAF (ex.: 4 meses/ano).

Uso na planilha GHG:

- Auxilia na caracterização do arranjo agroflorestal (sombreamento, uso do solo) e pode subsidiar análises complementares de produtividade e emissões.

Bloco F – Operações mecanizadas e combustíveis
Campos principais:

- Tipo de operação: gradagem, roçagem, sulcação, capina mecanizada, uso de motocultivador, trator, roçadeira, motosserra etc.
- Tipo de máquina e combustível (diesel, gasolina, etanol, biocombustíveis listados na aba "listas de formulários").
- Consumo de combustível (L/ha/ano ou L/ha por operação).

Perguntas orientadoras:

- "Quais máquinas são usadas para preparo do solo, manejo ou colheita no SAF?"
- "Quantos litros de combustível são gastos na área por ano?"

Passos para cálculo em L/ha:

- 1. Perguntar o gasto total de combustível na área, por ano (em litros).
- 2. Dividir pela área do SAF (ha) para obter L/ha/ano.

Registro na ficha:

- Máquina: ex. "trator", "motocultivador", "roçadeira".
- Combustível: diesel, gasolina, etanol etc.
- Quantidade: L/ha/ano.

Uso na planilha GHG:

- Alimenta as rotinas de emissões de CO_2, CH_4 e N_2O associadas ao uso de combustíveis fósseis e biocombustíveis (fatores disponíveis na aba "Fatores de emissão").
- Na ferramenta de cálculo GHG Protocol deve ser registrado o consumo de combustível em todas as operações mecanizadas e semi-mecanizadas internas (na propriedade) e externas (transporte da produção), quando houver (figura 5). Caso o agricultor(a) não disponha dessas informações precisas, deve ser feito um exercício para estimar. Isso para um primeiro momento, depois deve-se utilizar a ficha de campo para manter os registros.

Figura 5. Registro do consumo de combustível na planilha de cálculo GHG Protocol.

Tabela 5.1. Consumo de combustível nas operações mecanizadas

	Detalhes	Unidade	Valor
Tipo de combustível	-	-	
Tipo de quantificação de consumo	Período total	-	

Tabela 5.3. Consumo de combustível nas operações semi-mecanizadas

	Detalhes	Unidade	Valor
Tipo de quantificação de consumo	Período total	-	
Gasolina	-	litro	

Tabela 6. Consumo de combustível nas operações internas

	Detalhes	Unidade	Valor
Gasolina comum	Período total	litro	
Etanol hidratado	Período total	litro	

Tabela 8. Consumo de combustível no transporte externo produção

	Detalhes	Tipo	Unidade	Valor
1º Ano	Total consumido		litro	
2º Ano	Total consumido		litro	
3º Ano	Total consumido		litro	
4º Ano	Total consumido		litro	
5º Ano	Total consumido		litro	
6º Ano	Total consumido		litro	
7º Ano	Total consumido		litro	
8º Ano	Total consumido		litro	
9º Ano	Total consumido		litro	
10º Ano	Total consumido		litro	
11º Ano	Total consumido		litro	
12º Ano	Total consumido		litro	
13º Ano	Total consumido		litro	
14º Ano	Total consumido		litro	
15º Ano	Total consumido		litro	

Introdução | Instruções de uso | Equipe | Unidades emissões | Fatores de emissão | Fatores variáveis | Eucalipto | Parica | Pinus | Plantio multi-diverso | Sistema agroflorestal

Bloco G – Consumo de energia elétrica
Campos principais:

- Existência de uso de energia elétrica no SAF (bomba de irrigação, iluminação de galpão, beneficiamento, câmaras frias etc.).
- Consumo médio mensal (kWh/mês) associado ao SAF.

Perguntas orientadoras:

- "Há uso de energia elétrica na área do SAF?"
- "Qual o consumo médio mensal (kWh), conforme a conta de luz?"
- "Que parte do consumo da conta está relacionada ao SAF (percentual aproximado)?"

Procedimento:

- 1. Verificar se a conta de luz é da casa, da propriedade inteira ou apenas da área produtiva.
- 2. Estimar a fração do consumo atribuída ao SAF (ex.: 30%).
- 3. Calcular o consumo anual vinculado ao SAF (kWh/ano) e converter para MWh (dividindo por 1.000).

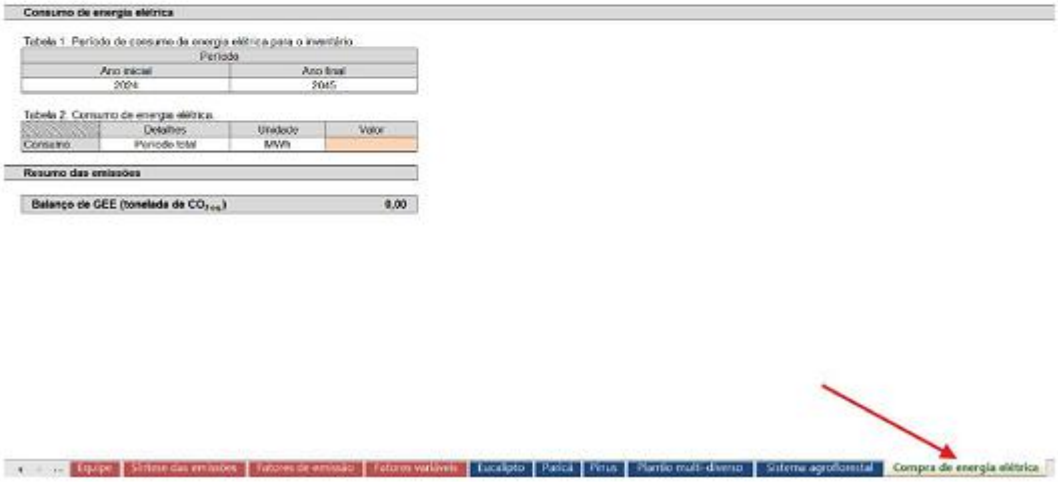
Registro na ficha:

- Consumo médio mensal estimado do SAF (kWh/mês).
- Consumo anual estimado (kWh/ano e MWh/ano).

Uso na planilha GHG:

- Preencher a aba "Compra de energia elétrica" do GHG Protocol SAFs (figura 6). Neste campo deve ser informado o consumo para o período total do inventário.

Figura 6. Indicação de registro do consumo de energia elétrica na aba "Compra de energia elétrica).



Bloco H – Uso do fogo
Campos principais:

- "Fez uso do fogo na área em algum momento?" (Sim/Não).
- "Se sim, informar o ano e o tamanho da área afetada (ha ou % da área)".

Perguntas orientadoras:

- "Foi usado fogo nessa área em algum momento (limpeza, queima de resíduos)?"
- "Em que ano? Qual foi a área aproximada atingida?"

Registro na ficha:

- Marcar Sim ou Não.
- Se sim: registrar ano da queima e percentual ou área (ha) queimada.

Uso na planilha GHG:

- Alimenta as rotinas de emissões por queima de biomassa (figura 7).

Figura 7. Tabela 3. Queima de biomassa por incêndo florestal.

Tabela 3. Queima de biomassa por incêndio florestal

	Detalhe	Unidade	Valor
1º Ano	Parcela da área total	%	
2º Ano	Parcela da área total	%	
3º Ano	Parcela da área total	%	
4º Ano	Parcela da área total	%	
5º Ano	Parcela da área total	%	
6º Ano	Parcela da área total	%	
7º Ano	Parcela da área total	%	
8º Ano	Parcela da área total	%	
9º Ano	Parcela da área total	%	
10º Ano	Parcela da área total	%	
11º Ano	Parcela da área total	%	
12º Ano	Parcela da área total	%	
13º Ano	Parcela da área total	%	
14º Ano	Parcela da área total	%	
15º Ano	Parcela da área total	%	
16º Ano	Parcela da área total	%	
17º Ano	Parcela da área total	%	
18º Ano	Parcela da área total	%	
19º Ano	Parcela da área total	%	
20º Ano	Parcela da área total	%	
21º Ano	Parcela da área total	%	
22º Ano	Parcela da área total	%	
23º Ano	Parcela da área total	%	
24º Ano	Parcela da área total	%	
25º Ano	Parcela da área total	%	
26º Ano	Parcela da área total	%	
27º Ano	Parcela da área total	%	
28º Ano	Parcela da área total	%	
29º Ano	Parcela da área total	%	
30º Ano	Parcela da área total	%	

Equipe | Síntese das emissões | Fatores de emissão | Fatores variáveis | Eucalipto | Paricá | Pinus | Plantio multi-diverso | Sistema agroflorestal

Bloco I – Espécies perenes e estrutura do SAF
Campos principais:

- Lista de espécies perenes (frutíferas, nativas, arbóreas, arbustivas, palmeiras etc.).
- Espaçamentos médios (quando relevantes).

Identificação das espécies
Procedimentos:

- 1. Listar todas as espécies perenes do SAF, diferenciando:
  - Nativas (ex.: umbuzeiro, pau-ferro, craibeira, angico, ouricuri etc.);
  - Exóticas/cultivadas (ex.: manga, goiaba, cajueiro, banana etc.).

- 2. Quando possível, registrar o nome científico, contribuindo para a qualidade acadêmica dos dados.

Pergunta prática ao agricultor:

- "Quais são as árvores e frutíferas que compõem o seu SAF? Vamos anotar uma a uma."

Número de indivíduos e densidade
Perguntas orientadoras:

- "Quantas árvores de cada espécie o senhor(a) tem aproximadamente?"
- "Essas árvores estão plantadas em linhas? Qual é o espaçamento aproximado?"

Procedimento:

- Realizar contagem direta sempre que possível (linha a linha).
- Quando a área for grande, utilizar amostragem por parcelas para estimar o número total de indivíduos.

Registro na ficha:

- Número total atual de indivíduos por espécie.
- Quando disponível, espaçamento aproximado (ex.: 4 x 4 m, 5 x 5 m).

Uso na planilha GHG:

- Tabelas de composição florestal 2.2 – "Composição florestal" (figura 8 e 9):
  - Selecionar na planilha as espécies encontradas;
  - Preencher com o número de indivíduos ou classes de densidade (ex.: "600–1.000 árvores/ha").
  - Classe de crescimento (lento, moderado, rápido).
  - Finalidade da espécie (madeira, lenha, fruto, resina etc.).

Figura 8. Print de tela da seção de registro da composição florestal. Neste exemplo foram as espécies selecionadas estão na cor vermelha.

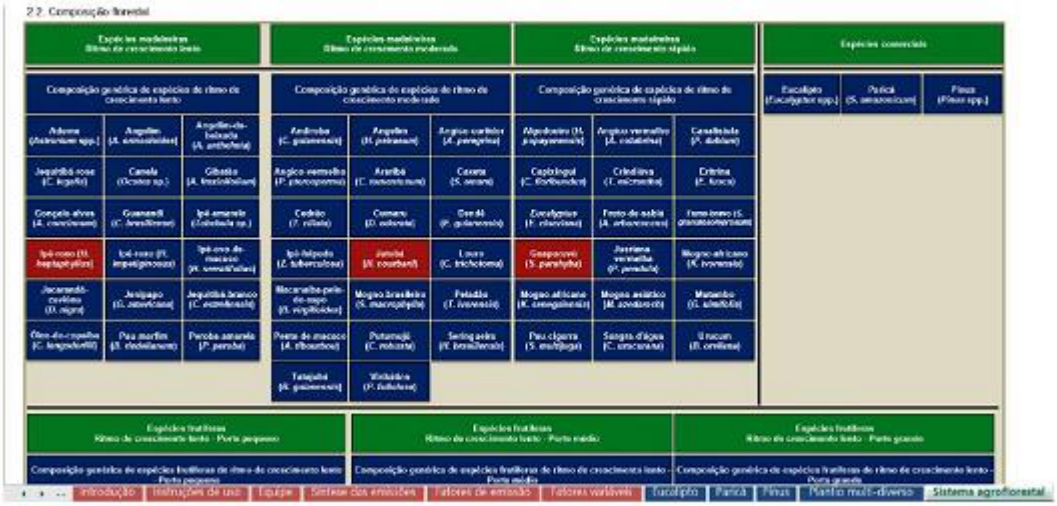
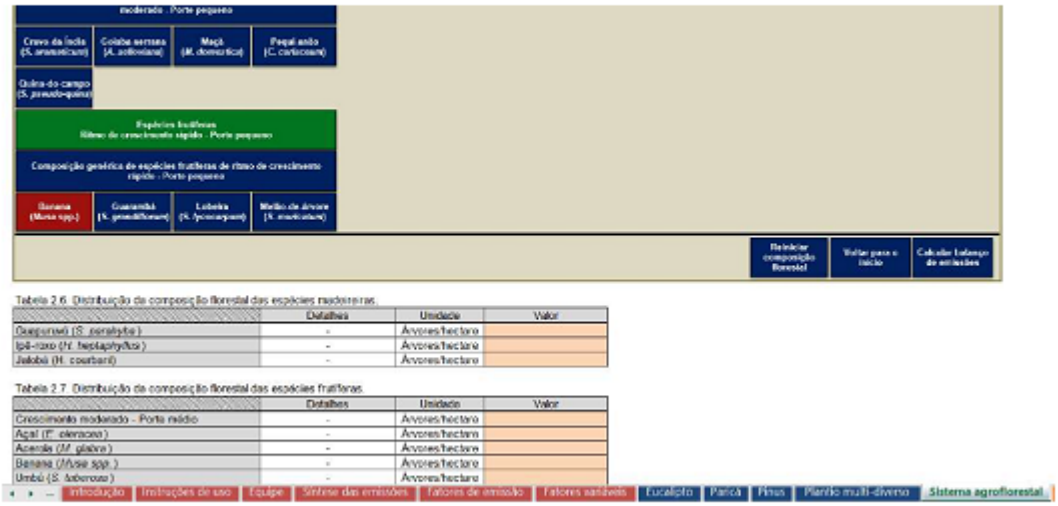


Figura 9. Após selecionar as espécies deve-se informar as quantidades de árvores por hectare, nas tabelas 2.6 e 2.7.



Bloco J – Croqui da área e registro fotográfico

Campos principais:

- Croqui (desenho simplificado) da área do SAF.
- Localização de faixas, renques, culturas, nascentes, curvas de nível etc.
- Identificação das parcelas de amostragem, quando utilizadas.

Procedimento:

- 1. Utilizar a matriz (linhas e colunas) da aba "Croqui" da ficha de campo para desenhar a configuração espacial do SAF.
- 2. Construir o croqui em conjunto com o(a) agricultor(a), marcando áreas de maior densidade, culturas, caminhos, nascentes etc.
- 3. Registrar fotos georreferenciadas, sempre que possível, associando-as ao croqui e à ficha (nome do arquivo, ponto aproximado).

Uso na planilha/relatórios:

- O croqui e as fotos não entram diretamente nas fórmulas da ferramenta, mas:
  - Ajudam a interpretar resultados.
  - Aumentam a qualidade de relatórios técnicos e acadêmicos.

5. Passo a passo do trabalho de campo

5.1 Preparação (antes de ir à propriedade)

1. Imprimir as fichas de campo completas (Blocos A a J), uma por propriedade.
2. Levar:

- Trena manual ou eletrônica.
- GPS ou celular com aplicativo de coordenadas.
- Cópias dos quadros de tipos de solo, usos anteriores, tipos de adubos e lista de espécies principais da região.

3. Definir um **código da propriedade** (ex.: SAF-MA-01), em que:

- SAF = Sistema Agroflorestal;
- MA = bioma (por ex., Mata Atlântica);
- 01 = número da propriedade.
- Essa nomenclatura padronizada facilita organização e sistematização dos dados.

5.2 Condução da visita

1. Realizar entrevista inicial com o(a) agricultor(a), preenchendo **Blocos A, B e C**.
2. Fazer caminhada pelo SAF, medindo a área e observando: solo, arranjo e espaçamento entre culturas, operações mecanizadas, adubações.
3. Preencher, em sequência:

- **Bloco D –** insumos e adubações (sintética, orgânica, verde, calcário).
- **Bloco E –** culturas anuais.
- **Bloco F –** operações mecanizadas e combustíveis.
- **Bloco G –** energia elétrica.
- **Bloco H –** uso do fogo.
- **Bloco I –** espécies perenes e estrutura do SAF.
- **Bloco J –** croqui e fotos.

4. Ao final, conferir os principais valores e informações com o(a) agricultor(a):

- "Está de acordo com o que o senhor(a) faz todo ano?"

5.3 Digitação e conferência

1. Transferir os dados para a planilha "DADOS GHG PROTOCOL", mantendo um arquivo por propriedade.
2. Conferir:

- Se todas as células obrigatórias foram preenchidas.
- Se as unidades estão corretas (kg/ha, L/ha, ha, kWh/ano, MWh/ano).
- Se não há valores incompatíveis (por exemplo, área plantada maior que a área total da propriedade).

3. A partir da planilha DADOS, alimentar o formulário "Sistema agroflorestal" da planilha oficial GHG Protocol:

- Tabela 1: Estado, latitude, longitude, bioma (Bloco A).
- Tabela 2.1: classe textural, uso anterior, ano de plantio, área (Blocos B e C).
- Demais tabelas: insumos (Bloco D), operações mecanizadas (Bloco F), composição florestal (Bloco J), energia elétrica (Bloco G), uso do fogo (Bloco H).

6. Procedimentos de preenchimento da ferramenta GHG Protocol Florestas e SAFs

Inicialmente os usuários devem acessar o site da WRI Brasil e devem baixar gratuitamente a planilha de cálculo e documentos de apoio que tratam de aspectos da metodologia e histórico do projeto GHG Protocol no Brasil.

Clique no link para download da ferramenta de cálculo:
https://www.wribrasil.org.br/projetos/ghg-protocol

6.1 Estrutura geral da ferramenta

Abas principais:

- **"Início" –** tela inicial.
- **"Introdução" –** contextualização teórica.
- **"Instruções de uso" –** orientações sobre compatibilidade, macros, navegação e preenchimento (habilitar macros, editar apenas células destacadas).
- **"Sistema agroflorestal" –** formulário principal para SAFs.
- **"Compra de energia elétrica" –** Escopo 2.
- **"Fatores de emissão" –** tabela com fatores usados nos cálculos.
- **"Síntese das emissões" –** consolidação dos resultados (tCO_2e/ha e totais).

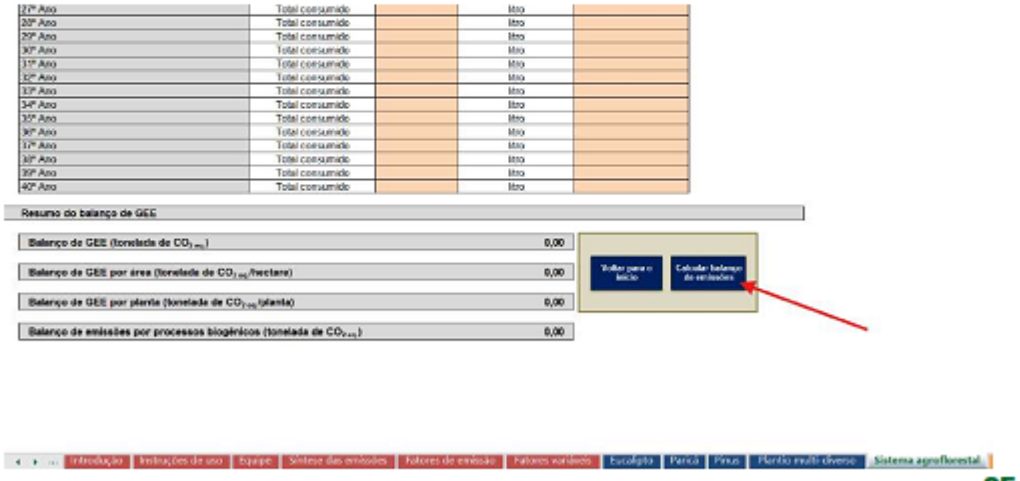
6.2 Aba "Sistema agroflorestal" - passo a passo

1. Acessar a aba **"Sistema agroflorestal"**;
2. Preencher a **Tabela 1** com dados do **Bloco A** (Estado, latitude, longitude, bioma);
3. Preencher a **Tabela 2.1** com dados do **Bloco B e C** (classe textural, uso anterior, ano de plantio, área plantada);
4. Preencher as tabelas de **composição florestal** com base no **Bloco I**, informando:

- Espécies principais;
- Classe de crescimento (lento, moderado, rápido);
- Densidade (árvores/ha ou classe de densidade);

5. Utilizar a tabela 2 do **Bloco I** para preencher a tabela 7.1 "Corte ou desbaste anual - Espécies madeireiras" para todo o período do inventário;
6. Usar **Bloco E** para preencher a tabela 2.8. "Exploração econômica de culturas anuais";
7. Usar **Bloco H** para preencher a tabela 3. "Queima de biomassa por incêndio florestal";
8. Usar **Bloco D** para preencher as tabelas 4.1. a 4.5. que apresentam campos para registro de dados sobre utilização de adubação nitrogenada sintética, adubação orgânica, adubação verde, correção e condicionamento de solo (calcário e/ou gesso);
9. Usar **Bloco F** para preencher as Tabelas 5.1, 5.3, 6 e 8 com informações sobre consumo de combustível em operações mecanizadas e semi-mecanizadas, inernas e/ou externas;
10. Revisar os dados e verificar o preenchimento de todos os campos obrigatórios, conforme destacado em * na ficha de campo; e
11. Ao final, clicar para calcular o balanço geral das emissões de GEE (figura 10). Só realizar esse procedimento após preenchimento das abas "Sistema Agroflorestal" e "Compra de energia elétrica".

Figura 10. Calcular o balanço de GEE (emissões – remoções) por área, por planta e por processos biogênicos.



6.3 Aba "Compra de energia elétrica"

1. Acessar a aba **"Compra de energia elétrica"**.

2. Informar, para o ano-base, o consumo de energia associado ao SAF (kWh/mês ou kWh/ano), conforme dados do **Bloco G**.

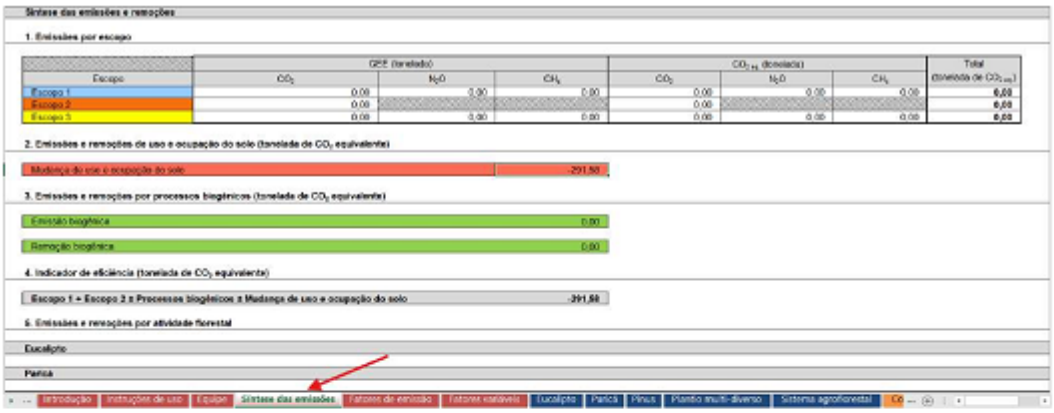
3. A ferramenta utilizará automaticamente os fatores de emissão mensais por ano (Tabela 5 na aba "Fatores de emissão") para calcular as emissões de Escopo 2.

6.4 Aba "Síntese das emissões"

Após o preenchimento das abas relevantes:

- A aba **"Síntese das emissões"** apresentará:
  - Emissões por fonte (adubação, combustível, energia elétrica, queima, mudança de uso do solo).
  - Remoções por incremento de biomassa e solos.
  - Balanço líquido (tCO_2e/ha e total da área).

Figura 11. Aba síntese das emissões.



Ficha de Campo
Inventário de GEE em Sistemas Agroflorestais
(GHG Protocol – Florestas & SAFs)

Use esta ficha para coletar dados em campo e depois transferi-los para a planilha DADOS GHG PROTOCOL e para o módulo "Sistema agroflorestal" do GHG Protocol – Florestas. Os itens marcados com * devem ser obrigatoriamente preenchidos para obtenção dos balanços de emissões líquidas na ferramenta de cálculo.

BLOCO A – IDENTIFICAÇÃO DA PROPRIEDADE	
Nome do(a) responsável	
Comunidade / Povoado / Sítio	
Município	
Estado*	
Bioma*	
Data do inventário (dd/mm/aaaa)	
Técnico(a) responsável	
Coordenadas geográficas (graus decimais)	
Código da propriedade (uso interno)	
BLOCO B – SOLO E USO ANTERIOR DA ÁREA	
Classe textural do solo* (Arenoso / Médio / Argiloso)	
Uso anterior da área* (pastagem, agricultura, área degradada, floresta nativa, outro)	
Observações sobre o solo (erosão, pedras, etc.)	
BLOCO C – HISTÓRICO/ÁREA DO SAF	
Ano de implantação do SAF*	
Comprimento do talhão (m)	
Largura do talhão (m)	
Área do SAF (m^2)	
Área do SAF (hectare)*	

BLOCO D – INSUMOS E MANEJO DO SOLO										
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Adubação nitrogenada sintética – apenas ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética – exceto ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética – exceto ureia – teor de nitrogênio (%)*										
Adubação orgânica* – tipo (esterco de gado (EG), cama de frango (CF), composto (C), lodo(L), outros (OUT)										
Adubação orgânica – quantidade total aplicada no ano (kg/ha)*										
Adubação verde – espécies utilizadas* – gramínea (GR), leguminosa (LG), outras (OUT)										
Adubação verde – observações (espaçamento, frequência no ano)										
Adubação verde -kg/hectare*										
Calcário tipo: dolomítico( ) calcítico( ) – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
Gesso agrícola – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
Obs:										

BLOCO E – CULTURAS ANUAIS NO SAF										
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Quantidade de meses de presença das culturas anuais na área (por ano)*										
Observações sobre consórcios e rotações										
BLOCO F – OPERAÇÕES MECANIZADAS E COMBUSTÍVEIS										
Máquinas utilizadas (trator (TR), motocultivador (MT), roçadeira (RC), outra (OUT)										
Tipo de combustível utilizado (diesel, gasolina, etc.)										
Consumo estimado de combustível total no SAF (L/ano)*										
Transporte externo da produção (total em litros/ano)										
BLOCO G – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA										
Há uso de energia elétrica no SAF? (Sim/Não)										
Uso principal da energia (bomba de irrigação, beneficiamento, iluminação, etc.)										
Consumo médio de energia vinculado ao SAF (kWh/ano)*										
BLOCO H – USO DO FOGO										
Foi utilizado fogo na área do SAF em algum momento? (Sim/Não)*										
Se sim, qual a parcela da área total queimada (%)*										
Finalidade da queima (limpeza, renovação de pasto, outra)										
Observações sobre uso do fogo										

Para estimativas com mais de 10 anos utilizar também as fichas abaixo

BLOCO D – INSUMOS E MANEJO DO SOLO										
	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Adubação nitrogenada sintética – apenas ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética –exceto ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética –exceto ureia – teor de nitrogênio (%)*										
Adubação orgânica* – tipo (esterco de gado (EG), cama de frango (CF), composto (C), lodo(L), outros (OUT)										
Adubação orgânica – quantidade total aplicada no ano (kg/ha)*										
Adubação verde – espécies utilizadas* – gramínea (GR), leguminosa (LG), outras (OUT)										
Adubação verde – observações (espaçamento, frequência no ano)										
Adubação verde -kg/hectare* Calcário tipo: dolomítico( ) calcítico( ) – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
Gesso agrícola – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
BLOCO E – CULTURAS ANUAIS NO SAF										
Quantidade de meses de presença das culturas anuais na área (por ano)*										
Observações sobre consórcios e rotações										

BLOCO F – OPERAÇÕES MECANIZADAS E COMBUSTÍVEIS										
	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Máquinas utilizadas (trator (TR), motocultivador (MT), roçadeira (RC), outra (OUT)										
Tipo de combustível utilizado (diesel, gasolina, etc.)										
Consumo estimado de combustível total no SAF (L/ano)*										
Transporte externo da produção (total em litros/ano)										
BLOCO G – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA										
Há uso de energia elétrica no SAF? (Sim/Não)										
Uso principal da energia (bomba de irrigação, beneficiamento, iluminação, etc.)										
Consumo médio de energia vinculado ao SAF (kWh/ano) *										
BLOCO H – USO DO FOGO										
Foi utilizado fogo na área do SAF em algum momento? (Sim/Não)*										
Se sim, qual a parcela da área total queimada (%)*										
Finalidade da queima (limpeza, renovação de pasto, outra)										
Observações sobre uso do fogo										

Para estimativas com mais de 20 anos utilizar também as fichas abaixo

BLOCO D – INSUMOS E MANEJO DO SOLO										
	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25	Ano 26	Ano 27	Ano 28	Ano 29	Ano 30
Adubação nitrogenada sintética – apenas ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética – exceto ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética –exceto ureia – teor de nitrogênio (%)*										
Adubação orgânica* – tipo (esterco de gado (EG), cama de frango (CF), composto (C), lodo(L), outros (OUT)										
Adubação orgânica – quantidade total aplicada no ano (kg/ha)*										
Adubação verde – espécies utilizadas* – gramínea (GR), leguminosa (LG), outras (OUT)										
Adubação verde – observações (espaçamento, frequência no ano)										
Adubação verde -kg/hectare*										
Calcário tipo: dolomítico( ) calcítico( ) – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
Gesso agrícola – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										

BLOCO E – CULTURAS ANUAIS NO SAF										
	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25	Ano 26	Ano 27	Ano 28	Ano 29	Ano 30
Máquinas utilizadas (trator (TR), motocultivador (MT), roçadeira (RC), outra (OUT)										
Tipo de combustível utilizado (diesel, gasolina, etc.)										
Consumo estimado de combustível total no SAF (L/ano)*										
Transporte externo da produção (total em litros/ano)										
BLOCO F – OPERAÇÕES MECANIZADAS E COMBUSTÍVEIS										
Máquinas utilizadas (trator (TR), motocultivador (MT), roçadeira (RC), outra (OUT)										
Tipo de combustível utilizado (diesel, gasolina, etc.)										
Consumo estimado de combustível total no SAF (L/ano)*										
Transporte externo da produção (total em litros/ano)										
BLOCO G – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA										
Há uso de energia elétrica no SAF? (Sim/Não)										
Uso principal da energia (bomba de irrigação, beneficiamento, iluminação, etc.)										
Consumo médio de energia vinculado ao SAF (kWh/ano) *										

BLOCO H – USO DO FOGO										
	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25	Ano 26	Ano 27	Ano 28	Ano 29	Ano 30
Foi utilizado fogo na área do SAF em algum momento? (Sim/Não)*										
Se sim, qual a parcela da área total queimada (%)*										
Finalidade da queima (limpeza, renovação de pasto, outra)										
Observações sobre uso do fogo										

Para estimativas com mais de 30 anos utilizar também as fichas abaixo

BLOCO D – INSUMOS E MANEJO DO SOLO										
	Ano 31	Ano 32	Ano 33	Ano 34	Ano 35	Ano 36	Ano 37	Ano 38	Ano 39	Ano 40
Adubação nitrogenada sintética – apenas ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética –exceto ureia (kg/ha)*										
Adubação sintética –exceto ureia – teor de nitrogênio (%)*										
Adubação orgânica* – tipo (esterco de gado (EG), cama de frango (CF), composto (C), lodo(L), outros (OUT)										
Adubação orgânica – quantidade total aplicada no ano (kg/ha)*										
Adubação verde – espécies utilizadas* – gramínea (GR), leguminosa (LG), outras (OUT)										
Adubação verde – observações (espaçamento, frequência no ano)										
Adubação verde -kg/hectare* Calcário tipo: dolomítico( ) calcítico( ) – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
Gesso agrícola – quantidade aplicada por ano (kg/ha)*										
BLOCO E – CULTURAS ANUAIS NO SAF										
Quantidade de meses de presença das culturas anuais na área (por ano)*										
Observações sobre consórcios e rotações										

BLOCO F – OPERAÇÕES MECANIZADAS E COMBUSTÍVEIS										
	Ano 31	Ano 32	Ano 33	Ano 34	Ano 35	Ano 36	Ano 37	Ano 38	Ano 39	Ano 40
Máquinas utilizadas (trator (TR), motocultivador (MT), roçadeira (RC), outra (OUT)										
Tipo de combustível utilizado (diesel, gasolina, etc.)										
Consumo estimado de combustível total no SAF (L/ano)*										
Observações sobre preparo de solo e manejo mecanizado										
BLOCO G – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA										
Há uso de energia elétrica no SAF? (Sim/Não)										
Uso principal da energia (bomba de irrigação, beneficiamento, iluminação, etc.)										
Consumo médio de energia vinculado ao SAF (kWh/ano) *										
BLOCO H – USO DO FOGO										
Foi utilizado fogo na área do SAF em algum momento? (Sim/Não)*										
Se sim, qual a parcela da área total queimada (%)*										
Finalidade da queima (limpeza, renovação de pasto, outra)										
Observações sobre uso do fogo										

BLOCO I – ESPÉCIES PERENES DO SAF*

Liste abaixo todas as espécies arbóreas, frutíferas e outras perenes que compõem o SAF.

Espécie (nome comum)	Nome científico	Número aproximado de indivíduos	Observações (finalidade, espaçamento, tempo de desbaste, etc)

CORTE OU DESBASTE ANUAL – ESPÉCIES MADEIREIRAS

Registre as informações sobre o percentual anual de plantas que são cortadas e retiradas das agroflorestas para aproveitamento de madeira, de acordo com os tipos de crescimento elencados.

	Detalhes	Unidade	Ritmo de cresc. rápido	Ritmo de cresc. moderado	Ritmo de cresc. lento
1º Ano	Por grupo de crescimento	%			
2º Ano	Por grupo de crescimento	%			
3º Ano	Por grupo de crescimento	%			
4º Ano	Por grupo de crescimento	%			
5º Ano	Por grupo de crescimento	%			
6º Ano	Por grupo de crescimento	%			
7º Ano	Por grupo de crescimento	%			
8º Ano	Por grupo de crescimento	%			
9º Ano	Por grupo de crescimento	%			
10º Ano	Por grupo de crescimento	%			
11º Ano	Por grupo de crescimento	%			
12º Ano	Por grupo de crescimento	%			
13º Ano	Por grupo de crescimento	%			
14º Ano	Por grupo de crescimento	%			
15º Ano	Por grupo de crescimento	%			
16º Ano	Por grupo de crescimento	%			
17º Ano	Por grupo de crescimento	%			
18º Ano	Por grupo de crescimento	%			
19º Ano	Por grupo de crescimento	%			
20º Ano	Por grupo de crescimento	%			
21º Ano	Por grupo de crescimento	%			
22º Ano	Por grupo de crescimento	%			
23º Ano	Por grupo de crescimento	%			
24º Ano	Por grupo de crescimento	%			
25º Ano	Por grupo de crescimento	%			
26º Ano	Por grupo de crescimento	%			
27º Ano	Por grupo de crescimento	%			
28º Ano	Por grupo de crescimento	%			
29º Ano	Por grupo de crescimento	%			
30º Ano	Por grupo de crescimento	%			
31º Ano	Por grupo de crescimento	%			
32º Ano	Por grupo de crescimento	%			
33º Ano	Por grupo de crescimento	%			
34º Ano	Por grupo de crescimento	%			
35º Ano	Por grupo de crescimento	%			
36º Ano	Por grupo de crescimento	%			
37º Ano	Por grupo de crescimento	%			
38º Ano	Por grupo de crescimento	%			
39º Ano	Por grupo de crescimento	%			
40º Ano	Por grupo de crescimento	%			

BLOCO J – ÁREA DO SAF (DESENHAR CROQUI DA ÁREA OU INSERIR FOTO AÉREA/IMAGEM DE SATÉLITE)

TECNOLOGIAS Ambientais

INSTITUTO FEDERAL
Alagoas

Campus Marechal Deodoro