

Campinas, SP / Maio, 2025

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL



Pegada e estoque de carbono dos cafés Robusta da Amazônia brasileira

Carlos Cesar Ronquim⁽¹⁾, Eduardo Barretto de Figueiredo⁽²⁾, Guilherme Amorim Ventriche Favero da Silva⁽¹⁾, Lauro Rodrigues Nogueira Júnior⁽¹⁾, Calixto Rosa Neto⁽³⁾, Enrique Anastácio Alves⁽³⁾, Daniela Tatiane de Souza⁽¹⁾, Fernando Antonio de Padua Paim⁽¹⁾

⁽¹⁾ Embrapa Territorial, Campinas, SP. ⁽²⁾ Universidade Federal de São Carlos, Araras, SP.

⁽³⁾ Embrapa Rondônia, Porto Velho, RO.

Resumo – A cafeicultura desempenha papel fundamental na sustentação de meios de subsistência em todo o mundo. É afetada pelas mudanças climáticas e tem potencial significativo para sequestrar carbono na fitomassa e no solo. Objetivamos caracterizar valores típicos da pegada de carbono e sequestro na fitomassa e o consequente balanço de carbono da cafeicultura da região das Matas de Rondônia, principal região produtora de *Coffea canephora* da Amazônia brasileira, e sugerir maneiras de reduzir pegadas de carbono agrícola, elevar taxas de remoção do carbono na fitomassa das plantas e fortalecer a resiliência da cultura às mudanças climáticas. Avaliamos a pegada de carbono agrícola por área e por peso (emissões diretas de GEE) em sistemas de cultivo convencionais de café a pleno sol de 250 propriedades rurais. O sequestro de carbono da fitomassa foi obtido de 150 plantas adultas dos cafés Robusta com idade média de 8 anos e coletadas em 10 propriedades agrícolas da região. Os valores da fitomassa úmida aérea e radicular foram determinados por pesagem no campo, e os valores de carbono, em laboratório. A pegada média de carbono estimada por área e por peso foi de 2.991,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq e de 0,84 kg kg⁻¹ de café verde de CO₂eq. A maior contribuição para as emissões de GEE foi a adubação nitrogenada (N) de cobertura (79,7%), e demonstra uma relação direta e positiva entre a taxa de aplicação de N e as emissões de GEE na cafeicultura Amazônica. O valor médio de carbono sequestrado na fitomassa da parte aérea e radicular dos cafeeiros foi de 6.874,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq. O balanço de carbono do café Robusta amazônico mostrou resultado favorável de 3.883,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq. O desenvolvimento de materiais genéticos mais resilientes à seca e às elevadas temperaturas e o uso mais amplo de fontes orgânicas de nitrogênio, aliado ao uso de fertilizantes biológicos como bactérias fixadoras de N, seriam alternativas capazes de mitigar as emissões de GEE.

Termos para indexação: agricultura familiar, fitomassa, gases de efeito estufa (GEE), mudança climática, sustentabilidade.

Carbon Footprint and Carbon Stock of Robusta Coffee in the Brazilian Amazon

Abstract – Coffee cultivation plays a vital role in sustaining livelihoods across the globe. It is significantly affected by climate change and has considerable potential for carbon sequestration in both phytomass and soil. We aimed to

Embrapa Territorial
Av. Soldado Passarinho, nº 303
Fazenda Chapadão
13070-115, Campinas, SP
www.embrapa.br/territorial
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Luciola Alves Magalhães

Secretária-executiva

Bibiana Teixeira de Almeida

Membros

André Luiz dos Santos Furtado,

Celina Maki Takemura, Janice

Freitas Leivas, Rafael Mingoti,

Suzilei Francisca de Almeida

Gomes Carneiro, Vera Viana

dos Santos Brandão, Jaudete

Daltio, Cristina Criscuolo, Rogério

Resende Martins Ferreira e

Daniela Tatiane de Souza

Edição executiva

Bibiana Teixeira de Almeida

Revisão de texto

Bibiana Teixeira de Almeida

Normalização bibliográfica

Vera Viana dos Santos Brandão

(CRB-8/7283)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Suzilei Carneiro

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

characterize typical values of carbon footprint and carbon sequestration in plant biomass, as well as the resulting carbon balance of coffee cultivation in the Matas de Rondônia region, the primary *Coffea canephora* production area in Brazilian Amazon, and propose strategies to reduce agricultural carbon footprints, increase carbon removal rates in plant biomass, and strengthen the crop's resilience to climate change. We assessed the agricultural carbon footprint per area and per weight (direct GHG emissions) in conventional full-sun coffee farming systems across 250 rural properties. Carbon sequestration in plant biomass was measured in 150 mature Robusta coffee plants with an average age of eight years, sampled from ten farms in the region. The values of aboveground and root fresh phytomass were determined by field weighing, while the carbon content was measured in the laboratory. The average estimated carbon footprint per area and per weight was 2,991.5 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of CO₂eq and 0.84 kg kg⁻¹ of CO₂eq in green coffee, respectively. The greatest contributor to GHG emissions was nitrogen (N) topdressing fertilization (79.7%), which shows a direct and positive relationship between N application rates and GHG emissions in Amazonian coffee farming. The average carbon sequestered in above- and below-ground biomass of coffee plants was 6,874.8 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of CO₂eq. The resulting carbon balance of Amazonian Robusta coffee cultivation was favorable, at 3,883.3 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of CO₂eq. The development of drought- and heat-resilient genetic materials, alongside broader use of organic nitrogen sources and biological fertilizers such as nitrogen-fixing bacteria, are promising alternatives for mitigating GHG emissions.

Index terms: family farming, phytomass, greenhouse gases (GHG), climate change, sustainability.

Introdução

A cafeicultura brasileira destaca-se como uma das principais atividades de exportação do País, e o café é um dos seus produtos mais representativos. O Brasil ocupa a posição de líder mundial na produção de *Coffea arabica* e é o segundo maior produtor de *Coffea canephora* (Conab, 2025).

Um dos fatores que contribuem para o sucesso da cafeicultura brasileira é a diversidade das regiões produtoras. Por ser um país de dimensões continentais, o Brasil apresenta grande variedade de climas e solos, o que permite o cultivo de cafés com características distintas (Martins et al., 2018; Volsi et al., 2019).

Rondônia ocupa posição de destaque na cafeicultura da Amazônia brasileira (Marcolan; Espindula, 2015; Teixeira et al., 2020), pois foi

responsável, na safra de 2024, por 87% da produção nesse bioma, pela quinta maior produção total do País e pela segunda maior produção da espécie *C. canephora* (Conab, 2025).

O Brasil apresenta sistemas de produção agropecuária baseados em alto consumo de insumos e que contribuem para altos níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Gama-Rodrigues et al., 2022), que agravam as mudanças climáticas. As temperaturas nos municípios produtores de café brasileiros têm aumentado e a precipitação anual tem diminuído durante os períodos de floração e maturação do café, e essa mudança climática histórica já resultou em reduções na produtividade (Koh et al., 2020).

A utilização de boas práticas agrícolas e o acúmulo de carbono na fitomassa de culturas arbóreas perenes, como o café, mitigam, em parte, a emissão de GEE e contribuem para a manutenção dos serviços ambientais e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Zaro et al., 2020; Nasiro, 2024; Cornelius, et al., 2025). O equilíbrio entre as emissões (pegada de carbono) e o potencial de sequestro na cafeicultura determina se o sistema agrícola apresenta contribuição líquida para as emissões de CO₂ e consequente redução das mudanças climáticas (Van Rikxoort et al., 2014; Kishaija et al., 2025; Walsh et al., 2025).

As tecnologias de produção na cafeicultura estão evoluindo ao longo do tempo, mas é necessário compreender como o uso de insumos agrícolas e combustíveis fósseis contribui para a emissão de GEE, em vista da preocupação com os cenários projetados de mudanças no clima do planeta, bem como da crescente exigência dos mercados internacionais em busca de uma cadeia produtiva de baixo carbono e mais sustentável (Gama-Rodrigues et al., 2022; Walsh et al., 2025).

O equilíbrio entre emissões e sequestro de carbono na cafeicultura depende de diversos fatores, incluindo práticas de manejo, tipo de solo, fatores climáticos, densidade de plantio, capacidade das espécies para armazenar carbono, reutilização da biomassa ao fim do ciclo da cultura, entre outros (Rahn et al., 2025; Gupta et al., 2017; Martins et al., 2018; Damatta et al., 2025), visto que a redução do CO₂ atmosférico ocorre por meio de sua captura e fixação na fitomassa vegetal das plantas de café e seu acúmulo no solo ao longo dos anos (Zaro et al., 2020; Cornelius, et al., 2025).

Nesse cenário, o objetivo deste estudo foi compreender o balanço dos GEE da cafeicultura praticada na região das Matas de Rondônia, por meio da avaliação da pegada de carbono (emissões

de GEE) envolvida nos manejos agrícolas, bem como a capacidade dos clones de cafés Robusta amazônicos em armazenar carbono na fitomassa vegetal. Ambas as medidas (emissões e remoção de carbono) podem subsidiar estratégias e ações para aumentar a resiliência da cafeicultura diante dos impactos da mudança climática e sua contribuição para a redução da emissão de GEE.

Material e métodos

Área de estudo

A região das Matas de Rondônia está inserida no bioma Amazônia, localizada no sudeste do estado de Rondônia (entre os paralelos 10° e 14° Sul e os meridianos 60° e 64° Oeste) e abrange 15 municípios: Alta Floresta D'Oeste, Alto Alegre dos Parecis, Alvorada D'Oeste, Cacoal, Castanheiras, Espigão D'Oeste, Ministro Andreazza, Nova Brasilândia D'Oeste, Novo Horizonte do Oeste, Primavera de Rondônia, Rolim de Moura, Santa Luzia D'Oeste, São Felipe D'Oeste, São Miguel do Guaporé e Seringueiras (Figura 1).

A área da região é de 4,2 milhões de hectares. A classificação de Köppen caracteriza o clima da região como Aw, tropical com precipitação variando de 1.340 mm a 2.340 mm no verão e com inverno seco (Dubreuil et al., 2018). A temperatura média do ar apresenta pequena variação espacial e temporal no decorrer do ano, entre 23,2 °C e 26,0 °C, dentro da faixa apta para o cultivo de *Coffea canephora*, com altitude média variando entre 90 m e 400 m acima do nível do mar (Custodio et al., 2022).

A vegetação predominante na região das Matas de Rondônia é de Floresta Ombrófila (30% da área), seguida de áreas de Savana (15%), área de transição entre áreas de Savana e Floresta Ombrófila (7%), e vegetação com influência fluvial e/ou lacustre (3%); o restante das áreas da região (44%) é classificado como áreas de Vegetação Secundária (Teixeira et al., 2020).

Os solos da região são compostos, em sua maioria, por Argissolos (41%), seguidos de Latossolos (26%), Neossolos (17%), Cambissolos (10%), Plintossolos (4%) e Gleissolos (1%) (Teixeira et al., 2020).

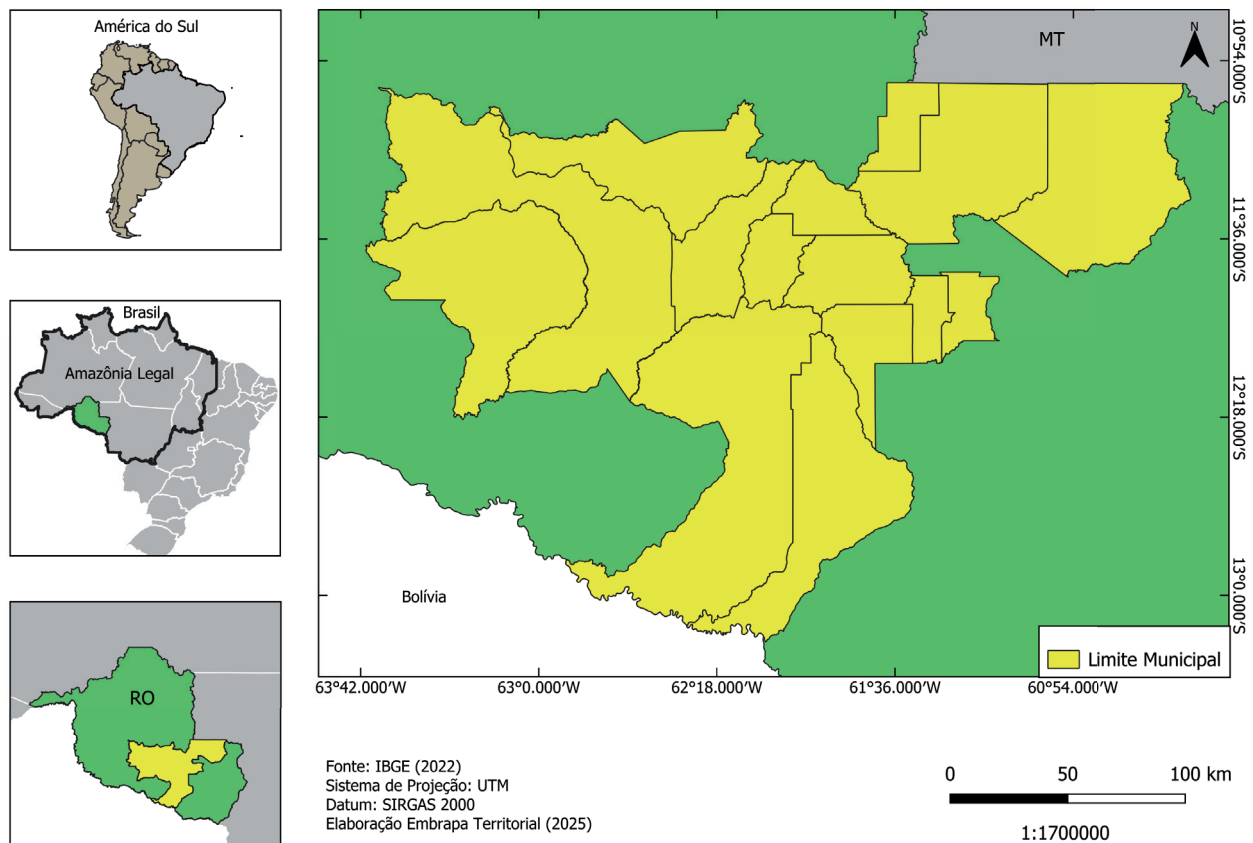


Figura 1. Mapa com a localização da região produtora de café das Matas de Rondônia (em amarelo).

Fonte: IBGE (2022).

Delimitação geográfica, universo e amostra do estudo, e parâmetros coletados

Para delimitação da área de estudo, foram selecionados os 15 municípios que compõem a região denominada Matas de Rondônia. O universo da pesquisa é representado pelos cafeicultores cujas propriedades estão localizadas nesses municípios. Foi definida uma amostragem aleatória intencional não probabilística de 250 cafeicultores, com aplicação de questionários semiestruturados e entrevistas pessoais. Foram considerados, nos cálculos de emissões de GEE, os valores do uso de insumos agrícolas, combustíveis fósseis e de energia elétrica, utilizados para o manejo e a produção da cafeicultura.

Características da cafeicultura na região das Matas de Rondônia

Desde 2021, o café da região das Matas de Rondônia dispõe de concessão de indicação geográfica. A base genética das plantas responsáveis pela produção do café local é resultante do cruzamento entre as variedades Conilon e Robusta de *Coffea canephora*. Obtida por meio de propagação vegetativa, gerou um café diferenciado que passou a ser chamado de Robusta amazônico (Rosa Neto, Alves, 2024).

Acadeia produtiva do café nas Matas de Rondônia inclui produtores indígenas e empresariais, mas principalmente pequenos cafeicultores familiares. Entre os 37 mil imóveis rurais declarados no Cadastro Ambiental Rural (CAR) da região, menos de 9 mil dedicam-se à cafeicultura; destes, 95% são pequenas propriedades familiares com média de 3,5 ha cultivados com café (Ronquim et al., 2024). É nesse pequeno cafeicultor familiar que este estudo foca, para avaliar o balanço de carbono da cultura.

Os rendimentos médios de café giram em torno de 68,5 sacas de 60 kg por hectare (Rosa Neto, Alves, 2024) ou 4.110 kg de café verde, e a colheita é feita manualmente. Na região, foram identificados cerca de 50 espaçamentos diferentes. O mais utilizado e tradicional é o espaçamento de 3,0 m x 1,0 m, que possibilita a ocupação de 3.333 plantas por hectare, porém outros espaçamentos mais adensados (2,80 m x 1,0 m e 2,50 m x 1,0 m) estão começando a ser adotados (Rosa Neto, Alves, 2024).

Pesquisa realizada por Rosa Neto e Alves (2024) identificou 77 variedades clonais e não relatou plantios com uso de variedades seminais, verificou que a irrigação das lavouras é utilizada por 97,2% dos produtores e abrange 98,7% da área plantada, e que a microaspersão é o tipo de irrigação mais

utilizado. A colheita é feita manualmente na maioria das pequenas propriedades da região e o uso da colheita semimecanizada ainda é tímida e vem aumentando aos poucos.

Estimativa da pegada de carbono de insumos agrícolas, combustíveis fósseis e energia elétrica

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) decorrentes do uso de calcário dolomítico foram determinadas a partir da quantidade de calcário (em kg) aplicada no solo. Os quilogramas de calcário foram convertidos para quilogramas de carbono usando o fator (EF_{CO₂}) = 0,13. A emissão de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) foi encontrada multiplicando-se os valores obtidos por 3,67 (IPCC, 2006).

Os fatores de emissão médios para o uso de insumos, combustíveis fósseis e energia elétrica foram convertidos para CO₂eq, unidade que converte a quantidade de outros GEE (como metano, óxido nitroso e outros) em sua equivalente CO₂, que tem potencial de aquecimento global padrão (IPCC, 2006), pelo emprego dos fatores de conversão 1 (CO₂), 25 (CH₄) e 298 (N₂O), respectivamente (World Resources Institute; World Business Council For Sustainable Development, 2014). Foram utilizadas como referência metodologias do IPCC (2006, 2014) e os parâmetros do *GHG Protocol Agricultural Guidance* (World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development, 2013), além das metodologias do GHG da Agricultura (World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development, 2014).

Após a coleta dos dados, foram feitos os cálculos das emissões de gases de efeito estufa utilizando os fatores de emissão e as equações do IPCC (2006, 2014).

O cálculo da pegada de carbono do café envolveu a quantificação das emissões de GEE durante somente a fase agrícola (do plantio à colheita) e foi calculado por área em hectare (CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) e por peso em quilo de café verde (kg kg⁻¹ de CO₂eq).

As emissões da aplicação do calcário foram calculadas a partir da Equação 1.

$$CO_2 - C = [(M_{\text{dolomítico}} \times EF_{\text{dolomítico}})] \times (44/12) A_i^{-1} \quad (1)$$

em que

- CO₂ - C = emissões anuais da aplicação de calcário (em kg ano⁻¹ ha⁻¹ de CO₂eq);
- M_{dolomítico} = quantidade anual de calcário dolomítico (em kg ano⁻¹ ha⁻¹);

- $EFCO_2$ = fator de emissão de carbono do calcário;
- A_i = área da unidade amostral (em ha).

Para estimar as emissões de óxido nitroso (N_2O) decorrentes da aplicação de fertilizantes nitrogenados no solo, foi determinada a quantidade de nitrogênio (N), em quilogramas, nos fertilizantes empregados, que foi convertida para quilogramas de N_2O -N. A emissão direta de N_2O no campo devido à aplicação de fertilizantes químicos e orgânicos foi calculada com base nas metodologias de fertilizantes nitrogenados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006; 2014). Os fatores de emissão utilizados foram desagregados para condições de clima úmido: 0,016 kg de N_2O -N por kg de N para emissões diretas de N_2O (EF1), 0,014 kg de N_2O -N por kg de N para emissões indiretas de N_2O por volatilização (EF4, clima úmido), e 0,011 kg de N_2O -N por kg de N (EF5) para lixiviação e escoamento superficial do N aplicado (IPCC, 2014), com $Frac_{Gasf}$ (volatilização a partir de fertilizante sintético, em kg de NH_3 -N+ NOx -N por kg de N aplicado) de 0,15 para ureia. As emissões diretas e indiretas da aplicação do fertilizante sintético nitrogenado e orgânico foram calculadas a partir das Equações de 2 a 6.

As emissões da aplicação de N_2O do fertilizante nitrogenado sintético ou fertilizante orgânico foram calculadas a partir da Equação 2:

$$N_2O_{solo_bsl,i,t} = N_2O_{fert_bsl,i,t} + N_2O_{md_bsl,i,t} \quad (2)$$

em que

- $N_2O_{solo_bsl,i,t}$ = emissões de óxido nitroso devido a entrada de N ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);
- $N_2O_{fert_bsl,i,t}$ = emissões totais de óxido nitroso devido ao uso do fertilizante ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);
- $N_2O_{md_bsl,i,t}$ = emissões de óxido nitroso devido à deposição de estrume para a unidade amostral i no ano t ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq).

As emissões diretas de N_2O dos solos manejados são estimadas separadamente das emissões indiretas, embora usando um conjunto comum de dados de atividade (Equação 3).

$$N_2O_{fert_bsl,i,t} = N_2O_{fert_bsl,direta,i,t} + N_2O_{fert_bsl,indireta,i,t} \quad (3)$$

em que:

- $N_2O_{fert_bsl,i,t}$ = emissões totais de óxido nitroso devido ao uso de fertilizante ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);

- $N_2O_{fert_bsl,direta,i,t}$ = emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes no ano t ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);
- $N_2O_{fert_bsl,indireta,i,t}$ = emissões indiretas devido ao uso de fertilizantes ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq).

As emissões diretas de N_2O decorrentes da aplicação do fertilizante nitrogenado foram calculadas a partir da Equação 4:

$$N_2O_{fert_bsl,direta,i,t} = [(F_{SN,bsl,i,t} + F_{ON,bsl,i,t}) \times EF_{Ndireta} \times 44/28 \times GWP_{N_2O}] / A_i \quad (4)$$

em que:

- $N_2O_{fert_bsl,direta,i,t}$ = área média das emissões diretas de N devido ao uso de fertilizantes para a unidade amostral i no ano t ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);
- $F_{SN,bsl,i,t}$ = fertilizante nitrogenado sintético aplicado à unidade amostral i no ano t (kg N);
- $F_{ON,bsl,i,t}$ = adubação nitrogenada orgânica aplicada à unidade amostral i no ano t (kg N);
- $EF_{Ndireta}$ = fator de emissão para emissões de óxido nitroso a partir de adições de N de fertilizantes sintéticos, corretivos orgânicos e resíduos vegetais (kg N_2O – N/t N aplicado);
- 44/28 = razão de massa molar de N_2O para N, para converter as emissões de N_2O – N em emissões de N_2O ;
- A_i = unidade amostral.

As emissões indiretas de N_2O decorrentes da aplicação do fertilizante nitrogenado foram calculadas a partir da Equação 5.

$$N_2O_{fert_bsl,indireta,i,t} = (N_2O_{fert_bsl,volatilizacao,i,t} + N_2O_{fert_bsl,lixiviacao,i,t}) / A_i \quad (5)$$

em que:

- $N_2O_{fert_bsl,indireta,i,t}$ = área média das emissões indiretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes para a unidade amostral i no ano t ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);
- $N_2O_{fert_bsl,volat,i,t}$ = emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da deposição atmosférica de N volatilizado pelo uso de fertilizantes na unidade amostral i no ano t ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);
- $N_2O_{fert_bsl,lixiv,i,t}$ = emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da lixiviação e do escoamento superficial de N nas regiões onde ocorre lixiviação e escoamento superficial, devido ao uso de fertilizantes na unidade amostral i no ano t ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de CO_2eq);

- A_i = unidade amostral.

As emissões de N do nitrogênio orgânico aplicado no solo foram calculadas a partir da Equação 6.

$$F_{on} = F_{am} + F_{comp} + F_{ooa} \quad (6)$$

em que:

- F_{on} = total anual de fertilizantes nitrogenados orgânicos aplicados em solos que não sejam usados para animais em pastejo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N);
- F_{am} = quantidade anual de nitrogênio total de esterco aplicado nos solos (evitar contagem duplicada se usado em composto) ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N);
- F_{comp} = quantidade anual de nitrogênio no composto aplicado ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N);
- F_{ooa} = quantidade anual de outros aditivos orgânicos utilizados como fertilizantes ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N).

Para quantificar as emissões de CO_2 , metano (CH_4) e N_2O da utilização de combustíveis fósseis, foi feito o levantamento do volume de combustível (óleo diesel e gasolina) consumido nos tratores, máquinas e equipamentos semimecanizados utilizados para o plantio e a produção do café. Os fatores de emissão aplicados foram os sugeridos pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Motores de Veículos Automotores (Cetesb, 2024). As emissões diretas do uso de combustíveis fósseis foram calculadas a partir das Equações 7 (óleo diesel) e 8 (gasolina).

$$EFF = FFC \times EF_{\text{CO}_2} \quad (7)$$

em que :

- EM = emissão total de carbono equivalente da combustão de óleo diesel proveniente das operações agrícolas ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq);
- FFC = quantidade de litros de diesel (L);
- EF_{CO_2} = fator de emissão.

$$EM = FFC \times EF_{\text{CO}_2} \quad (8)$$

em que :

- EM = emissão total de carbono equivalente da combustão de gasolina proveniente das operações agrícolas ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq);
- FFC = quantidade de litros de gasolina (L);
- EF_{CO_2} = fator de emissão.

Para quantificar a energia elétrica utilizada para a irrigação (manejo amplamente usado na cafeicultura da região na forma microaspersão), foi analisada a quantidade de energia elétrica gasta em quilowatt-hora (kWh), que foi posteriormente convertida para megawatt-hora (MWh), e foram multiplicados os valores encontrados pelo fator médio de emissão anual de $0,0385 \text{ Mg MWh}^{-1}$ de CO_2eq (Brasil, 2025). As emissões diretas do uso de energia elétrica foram calculadas a partir da Equação 9.

$$EM = EN \times EF_{\text{CO}_2} \quad (9)$$

em que :

- EM = emissão total de carbono equivalente proveniente do uso da energia elétrica ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq);
- EN = quantidade de energia (kWh);
- EF_{CO_2} = fator de emissão.

Avaliação da fitomassa aérea e radicular dos cafeeiros

Foram abatidas 150 plantas de café adultas com mais de seis anos de idade em 10 propriedades selecionadas da região. As plantas tinham idade entre 6 e 18 anos, com média de idade de 8 anos.

A avaliação de fitomassa aérea ocorreu por amostragem destrutiva. Cada planta teve seus componentes (tronco, raízes, galhos, folhas e frutos) separados e pesados, para obtenção da biomassa verde usando uma balança com capacidade de 50 kg. Os valores da fitomassa úmida de cada compartimento da planta foram determinados para cada árvore no campo.

A fitomassa de raízes foi obtida em duas etapas: amostragem de raízes grossas ($> 2 \text{ mm}$ de diâmetro) e amostragem de raízes finas ($< 2 \text{ mm}$). A fitomassa de raízes grossas foi obtida para as mesmas 150 plantas amostradas para biomassa aérea. Foram feitas escavações manuais em torno da planta e, com o auxílio de uma talha manual com capacidade de suporte de até 2 t, as raízes foram arrancadas e pesadas diretamente no campo, para obtenção do peso fresco. A fitomassa de raízes finas em plantas de café foram obtidas a partir da coleta do solo após a retirada das raízes grossas. Esse solo foi peneirado e as raízes com diâmetro igual ou inferior a 2 mm que ficaram retidas foram coletadas.

Foram retiradas subamostras de todo o material coletado (tronco, raízes, galhos, folhas e frutos), para determinação do peso seco em laboratório e posterior estimativa da massa seca

total. As amostras foram levadas para o laboratório e secas em estufa de circulação de ar à temperatura de 65 °C até atingirem peso constante, para posterior determinação do teor de umidade e preparo para análise química do teor de carbono orgânico.

Para determinar o teor de carbono, as amostras foram inicialmente fragmentadas em serra planadora, trituradas em moinho Willey e Croton com peneira 20 *mesh*, e posteriormente analisadas pelo método de combustão direta em analisador elementar C-144 LECO.

Após a determinação do teor de carbono orgânico em cada fração amostrada, este teor foi multiplicado pela biomassa seca, para obtenção da quantidade de carbono orgânico por compartimento.

Resultados e discussão

Insumos e operações mecanizadas que emitem carbono

A emissão de GEE da cafeicultura da região decorre basicamente de: corretivos agrícolas ($\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), fertilizantes nitrogenados ($\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), fertilizantes orgânicos (cama de frango no primeiro ano de plantio e palha de café na cobertura nos anos de produção, em $\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), óleo diesel dos tratores (L ha^{-1}), gasolina da roçada semimecanizada (L ha^{-1}) e energia elétrica da irrigação (MWh) (Tabela 1).

Considerado o total de 250 produtores avaliados, o valor médio para o calcário dolomítico aplicado — $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ — foi de $796 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ no plantio e a mesma quantidade aplicada em anos alternados na fase de produção (aproximadamente $1.538 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$). O valor médio de aplicação de fertilizante químico nitrogenado para plantio foi de $323,6 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de monofosfato de amônio (MAP), identificado quimicamente como $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ e composto de no mínimo 9% de nitrogênio na forma amoniacal (NH_4^+). Para a fase de produção, o uso de fertilizante nitrogenado foi de $638,7 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ divididos em 70% de ureia, que contém cerca de 46% de nitrogênio na forma (NH_2)₂, e adubo formulado NPK (20-05-20), que contém 20% de nitrogênio (Tabela 1). Quanto aos fertilizantes orgânicos, foram utilizados: cama de frango no plantio (pode conter 3,1% de N), com média de aplicação de $3.540 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$; e, na fase de produção, a palha de café (composta, em média, de 0,5 a 1,5% de N), e média aplicada de $2.262 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (Tabela 1).

Os combustíveis fósseis utilizados no plantio e na produção da cultura cafeeira da região abastecem os tratores (óleo diesel) e o equipamento para roçada semimecanizada (gasolina). O óleo diesel é consumido para operações de preparo do solo (sulcação) e aplicação de insumos na fase de plantio e somente para a aplicação de insumos na fase de produção. A sulcação, praticada por 100% dos cafeicultores, é a operação que mais consome

Tabela 1. Valores médios do consumo e uso de insumos agrícolas ($\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) das operações de plantio e produção (média de 250 produtores), que consomem óleo diesel ($\text{L ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), gasolina ($\text{L ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e energia elétrica ($\text{kWh ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), para os principais manejos que emitem gases de efeito estufa (GEE, em $\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de CO_2eq) na cafeicultura da região das Matas de Rondônia durante os ciclos de plantio (valores médios do primeiro ano) e produção (valores médios anuais de oito anos), para práticas de produção e manutenção da cultura.

Fontes de emissão de CO_2eq	Insumos e operações que emitem CO_2eq	Plantio	Produção
Insumos ($\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	Calcário dolomítico	1.538,0	796,0
	Monofosfato de amônio (MAP)	323,6	0,0
	Ureia	0,0	447,1
	20-05-20	0,0	191,6
	Cama de frango	3.540,0	0,0
	Palha de café	0,0	2.262,0
Operações mecanizadas – diesel ($\text{L ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	Sulcação	11,2	-
	Aplicação de calcário	6,5	5,1
	Aplicação de adubo orgânico	6,6	6,2
Operações semimecanizadas – gasolina ($\text{L ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	Roçada	6,3	12,6
Energia elétrica ($\text{kWh ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	Irrigação	294,2	294,2

*Os valores das operações mecanizadas da aplicação de adubo nitrogenado (N) são considerados nulos, porque são realizadas, em sua grande maioria, via irrigação por microaspersão. CO_2eq , dióxido de carbono equivalente.

óleo diesel. A aplicação de N no solo é feita, na maioria das vezes, pelo sistema de fertirrigação, e o controle químico de pragas, doenças e plantas invasoras é feito, em sua maioria, com pulverização costal, portanto não consomem combustíveis fósseis.

A roçada na cafeicultura é semimecanizada e utiliza máquinas de menor porte, como roçadeiras costais, para controle da vegetação invasora entre as linhas de cafeeiros nos manejos de plantio e produção.

A irrigação dos cafeeiros é feita basicamente por meio de micro aspersores que utilizam energia elétrica, composta em 100% dos casos pela energia fornecida pela rede de distribuição através do Sistema Nacional Interligado (SIN). O molhamento do solo é feito em média por quatro meses durante o ano, nas fases de plantio e produção.

Pegada do carbono por área (CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) e por peso (kg kg⁻¹ de CO₂eq)

A pegada de carbono (emissão de GEE) para o setor agropecuário corresponde à quantidade total de GEE emitida para a atmosfera por um determinado sistema de produção ou produto. Pode ser expressa por área (kg de CO₂eq por área ocupada, normalmente em hectares) ou por peso (kg de CO₂eq por kg do produto).

Os resultados obtidos indicam emissão por área menor para o primeiro ano de plantio, de 1.686 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq, quando comparada à emissão de produção (média de cultivo por 8 anos), de 2.991,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq (Figura 2).

As estimativas da pegada de carbono da fase agrícola, tanto por área quanto por peso, são altamente variáveis entre diferentes estudos na cafeicultura (Van Rikxoort et al., 2014; Cornelius et al., 2025; Kishaija et al., 2025; Walsh et al., 2025). O valor médio de diferentes sistemas de manejo da cafeicultura varia muito, com tendência a menores emissões de sistemas menos tecnificados, devido ao menor consumo de fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos, combustíveis fósseis e energia elétrica.

As emissões totais por área na fase de produção, que representa o maior tempo de cultivo, média de 8 anos neste estudo, são representadas por: aplicação de calcário (12,3%), fertilizantes nitrogenados (79,7%), fertilizantes orgânicos (6,1%), utilização de combustíveis fósseis — óleo diesel (0,5%) e gasolina (0,9%) — e energia elétrica para irrigação (0,4) (Figura 2).

Cornelius et al. (2025), em revisão global de 21 trabalhos sobre café Arábica (16 trabalhos) e Robusta (5) crescendo sob sol e em agroflorestas, encontraram valor médio da pegada de carbono por área de 2.954 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq, valor muito semelhante ao encontrado neste estudo, considerando a média de 1 ano de produção (2.991,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq), e superior ao valor de 1.686,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq para o primeiro ano de estabelecimento da cultura.

Os resultados da emissão de GEE variaram de 11,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq na operação de irrigação por microgotejamento com baixo consumo de energia, até o maior valor, de 1.996,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq, referente à adubação nitrogenada de cobertura durante a fase de produção (Figura 2). O destaque para as maiores emissões de GEE do cultivo de cafés Robusta amazônicos em Rondônia ocorre na fase de produção, devido à elevada demanda de aplicação de fertilizantes químicos nitrogenados, principalmente ureia, que representa a maior fonte de emissão neste estudo (79,7% do total), e é aplicada durante a fase de produção (Figura 2).

Diversos estudos enfatizam a importância dos fertilizantes nitrogenados para o aumento da pegada de GEE na cafeicultura (Noponen et al., 2012; Halvorson et al., 2014; Van Rikxoort et al., 2014; Arellano; Hernández, 2023; Cornelius et al., 2025; Kishaija et al., 2025; Walsh et al., 2025).

A elevada porcentagem de contribuição dos fertilizantes químicos nitrogenados para pegada de carbono neste estudo está dentro da faixa de 49–100% do total da pegada de carbono (Arellano; Hernández, 2023; Cornelius et al., 2025; Walsh et al., 2025). Os níveis mínimos de emissão aumentam conforme as taxas de aplicação de N aumentam, e a maior taxa de aplicação está associada a maiores perdas e menor recuperação de N em comparação com taxas de aplicação mais baixas ou aplicações parceladas (Van Rikxoort et al., 2014).

O consumo de diesel das operações agrícolas mecanizadas pode ser considerado muito baixo, o que representa menos de 4% do total (Figura 2). Isso decorre de a maioria dos manejos agrícolas nas propriedades familiares ser feita manualmente, até mesmo a colheita.

Na região das Matas de Rondônia, há locais onde a pegada de carbono por área pode ser considerada muito pequena. São áreas que não utilizam tecnologias como fertilizantes nitrogenados, combustíveis, maquinários ou energia elétrica para irrigação, mas ainda assim relatam produção

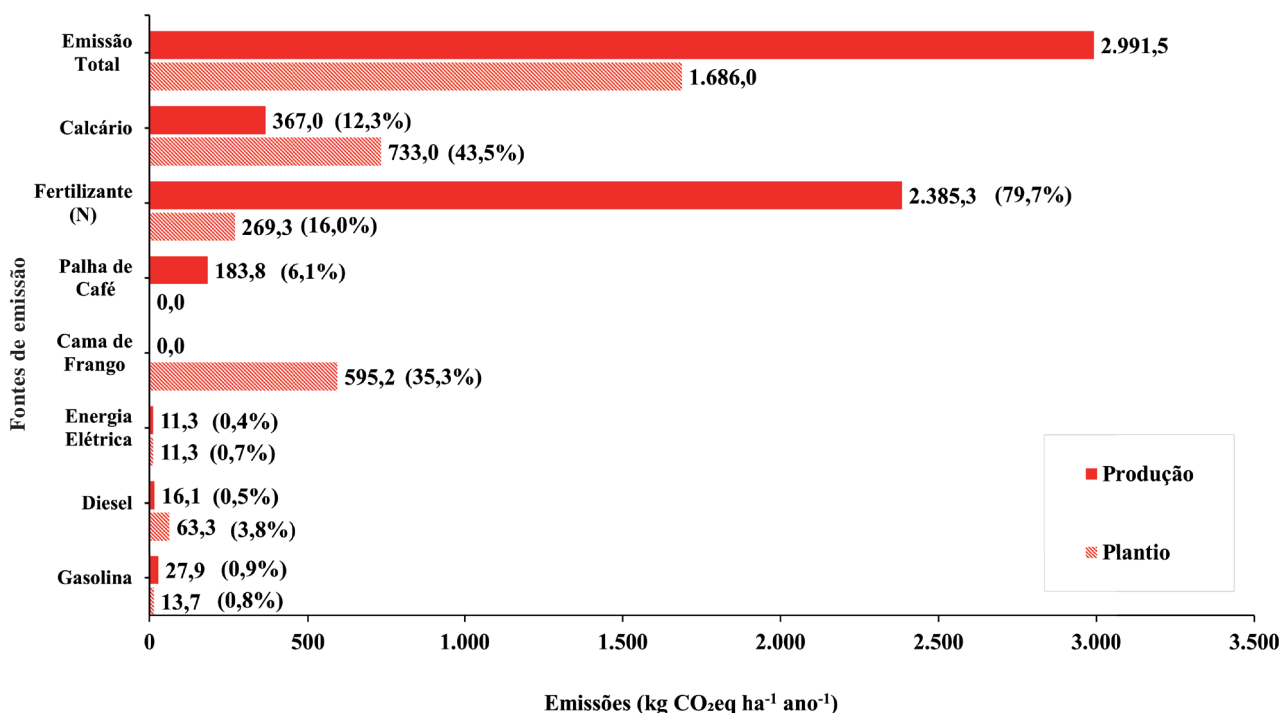


Figura 2. Pegada de carbono por área (kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq) das principais operações de máquinas e uso de insumos agrícolas para as fases de plantio (primeiro ano) e produção (valor médio anual de 8 anos de cultivo) dos cafés Robusta amazônicos da região das Matas de Rondônia.

considerável de café. Em estudo de Noponen et al. (2012), no qual não foram utilizados combustíveis fósseis e fertilizantes sintéticos e as emissões da área de café foram derivadas quase inteiramente de fertilizante orgânico de polpa de café (65%) e resíduos de poda (33%), o valor da pegada de carbono por área foi de apenas 580 kg ha⁻¹ano⁻¹ de CO₂eq.

Exemplos desse tipo de produção na região estão nas pequenas culturas cafezeiras praticadas por indígenas. Assim, novos estudos devem ser direcionados para avaliar as emissões nesses sistemas sem uso ou aplicação de insumos fósseis, que podem ser uma alternativa importante para sistemas mais sustentáveis de produção de café Robusta na região amazônica.

Por outro lado, há, na região, pequenas propriedades rurais mais tecnificadas cuja pegada de carbono é maior que a média das pequenas propriedades rurais quando a comparação é feita por área (ha). Porém, se a emissão de GEE (expressa em CO₂eq) é comparada em termos de sacas ou quilogramas de grãos de café, a pegada de carbono pode ser semelhante ou até menor, devido à elevada produtividade das propriedades mais tecnificadas.

Quando os resultados da pegada de carbono desta pesquisa são apresentados por quilograma de produto produzido, os cafés das Matas de Rondônia, considerando a média das emissões entre um ano de plantio e um ano médio de ciclo de 7 anos de produção, o resultado é de 0,84 kg de CO₂eq por kg de café verde. Como considerado por Cornelius et al. (2025), também foi utilizado aqui como unidade funcional 1 kg de grão verde, que é a forma mais comercializada do produto (FAO, 2023).

Walsh et al. (2025) avaliaram 180 propriedades rurais na América Central e observaram que, em média, as emissões associadas ao cultivo de café verde são estimadas em 4,1 kg de CO₂eq por kg de café verde, enquanto Van Rikxoort et al. (2014), em 116 propriedades rurais da América Central e Colômbia, relataram uma faixa de valores de 2,9 a 3,9 kg de CO₂eq por kg de café em pergaminho, aproximadamente 3,5 a 4,6 kg de CO₂eq por kg de cafés verdes colhidos de propriedades rurais com diferentes sistemas de produção. Já a revisão de 21 estudos globais apresentados por Cornelius et al. (2025) revelou valor médio de 1,67 kg de CO₂eq por kg de café verde. Arellano; Hernández (2023) revisaram a literatura disponível sobre a pegada de carbono associada ao cultivo de café na região da

América Central, desde agroflorestas até cultivo a pleno sol, e os resultados variaram de 2,8 a 3,5 kg de CO₂eq por kg de café verde, respectivamente.

O impacto de diferentes sistemas de cultivo, diferentes métodos e premissas, a grande variação na gestão (e eficiência) da produção e produtividade de café e as interações entre elementos agronômicos resultam em diferentes pegadas de carbono por área e por peso (Van Rikxoort et al. 2014; Walsh et al., 2025). Esse fato demonstra a importância de compreender a interação entre fatores que contribuem para essa variação considerável nas estimativas de emissões para diferentes sistemas de produção.

A produção do café Robusta amazônico na região das Matas de Rondônia pode ser considerada de baixa pegada de carbono agrícola (0,84 kg de CO₂eq por kg de café verde), principalmente se comparada a outros cultivos tradicionais a pleno sol, devido à elevada produtividade demonstrada na região, que é de 68,5 sacas de 60 kg de café verde por hectare e que representa uma das mais altas do Brasil. A elevada produtividade é resultado do uso de variedades clonais muito produtivas, práticas adequadas de manejo, como irrigação por microaspersão (98% das propriedades utilizam), uso de fertilizantes em dosagens adequadas e parceladas, principalmente o N em cobertura por fertirrigação. A pegada de C agrícola satisfatória dos cafés também está associada à baixa emissão de GEE. Por serem cultivados em propriedades familiares com pequenas áreas de café (média de 3,3 ha), muitos dos manejos agrícolas dos Robusta amazônicos são feitos manualmente, como a colheita, e apresentam muito baixa emissão de GEE por combustíveis fósseis.

Estoque de carbono na fitomassa cafeeira

A fitomassa úmida total do cafeeiro coletada e avaliada nas áreas de estudo foi armazenada em maior proporção no tronco (29,4%), seguida de raiz (17,4%), folhas (15,9%), galhos (17,4%) e frutos (17,4%) (Tabela 2).

O acúmulo de fitomassa, e conseqüentemente C, nas plantas lenhosas de café é afetado por muitos fatores, incluindo arquitetura e morfologia vegetal, idade, densidade de plantio, cultivares, fatores edafoclimáticos e práticas de manejo (Gupta et al., 2017), e impactam, em última análise, a fisiologia da planta de café, com conseqüências diretas em seu crescimento e rendimento (Damatta et al., 2025).

O valor médio de carbono estocado na fitomassa da parte aérea e radicular de plantas

com idade média de 8 anos foi de 14,3 Mg ha⁻¹ de C para oito clones distintos (Tabela 2). Resultado semelhante foi obtido por Hergoualc'h et al. (2012), que relatam estoques de carbono de parte aérea e raízes de 14,1 Mg ha⁻¹. Van Rikxoort et al. (2014), em avaliação de diversas propriedades, e Arellano e Hernández (2023), em ampla revisão, encontraram em plantas de café crescendo a pleno sol valores de 10,5 mil kg ha⁻¹ e 9,7 mil kg ha⁻¹, ou seja, abaixo dos valores aqui encontrados.

Na região das Matas de Rondônia ocorre armazenamento de aproximadamente 6.874,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq (Tabela 2). Cornelius et al. (2025), em revisão global de estudos com dados sobre a taxa de remoção de CO₂ na fitomassa de cafeeiros, encontraram valor médio a pleno sol de 6.990 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂, valor semelhante ao encontrado em cafés Robusta amazônicos.

Esse acúmulo médio anual de fitomassa representa um importante sequestro de carbono pelos cafés Robusta amazônicos e reforça o papel das culturas perenes, como o cafeeiro, como agentes de sequestro de carbono na agricultura tropical.

Os cálculos foram considerados para plantas com idade média de 8 anos. Entretanto, 12 anos parece ser o período de acúmulo máximo de carbono em plantas de café Robusta amazônicos em Rondônia (Rodrigues et al., 2000). O potencial de acúmulo de carbono por área pode ser ainda maior pelos Robusta amazônicos.

No âmbito do projeto CarbCafé-RO, do qual faz parte este estudo, novas atividades estão sendo direcionadas para avaliar os estoques de carbono no solo. A medição desses estoques considera, além das áreas de café, as pastagens adjacentes e áreas de floresta nativa primária como referências. A floresta nativa primária é considerada o sistema com maior potencial de estocagem de carbono no solo.

O potencial sequestro de carbono nas áreas dos cafés Robusta amazônicos pode acrescentar mais carbono estocado por área, pois, após a colheita dos grãos todos os anos, os ramos e folhas são desbastados e removidos da planta para o solo, o que pode ser benéfico para o acúmulo de carbono nesse compartimento ao longo dos anos e, aliado ao carbono sequestrado na fitomassa, contribuir para um balanço mais favorável e levar a situações de acréscimo de carbono quando da mudança de uso e cobertura sobre áreas de pastagens.

Tabela 2. Valores de fitomassa úmida e fitomassa seca e carbono (C) analisados em laboratório, oriundos de 150 plantas adultas café Robusta amazônico pertencentes a oito clones distintos com idades entre 6 e 18 anos e média de idade de 8 anos.

Clone	Idade*	Partes da planta (kg)								Planta toda (kg)			
		Fr	Tr	Ra	Ga	Fo	Fitomassa úmida	Fitomassa seca	C	(C ha ⁻¹)	(C ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹)	
		Fitomassa úmida											
03	8	1,0	4,2	3,2	1,9	9,3	19,6	6,3	3,3	10.999,9	1.375,0	40.369,6	5.046,2
VR11	6	1,2	5,9	3,2	1,0	2,4	13,7	7,1	3,9	12.999,9	2.166,7	47.709,6	7.951,6
22	6	0,9	5,6	3,1	1,3	3,4	14,3	6,7	3,4	11.333,2	1.888,9	41.592,8	6.932,1
25	8	1,3	8,7	3,9	2,9	5,0	21,8	10,4	5,7	18.999,8	2.375,0	69.729,3	8.716,2
08	6	1,1	5,8	2,9	1,8	3,2	14,8	6,7	3,7	12.333,2	2.055,5	45.262,8	7.543,8
RB41	18	0,8	8,7	10,0	2,7	4,8	27,0	13,0	7,2	23.999,8	1.333,3	88.079,3	4.893,3
88	6	1,3	7,1	4,1	0,9	2,8	16,2	7,8	4,2	13.999,9	2.333,3	51.379,6	8.563,3
P42	8	1,1	4,8	3,3	1,3	2,7	13,2	6,4	3,5	11.666,6	1.458,3	42.816,4	5.352,1
Média total		1,1	6,4	4,3	1,8	4,2	17,6	8,1	4,3	14.541,5	1.873,2	53.367,4	6.874,8

*Em anos. Fr, frutos; Tr, tronco; Ra, raiz; Ga, galhos; Fo, folhas. C, carbono.

Valores em kg de: C ha⁻¹, carbono por hectare; C ha⁻¹ ano⁻¹, carbono equivalente por hectare a cada ano; CO₂ eq ha⁻¹, dióxido de carbono equivalente por hectare; CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹: dióxido de carbono equivalente armazenado por hectare a cada ano.

Balanco de carbono nas áreas de café Robusta amazônico

O balanço de carbono dos cafés Robusta amazônicos — sequestro anual e CO_2 da fitomassa total das plantas ($6.874,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq) menos a média de pegada de carbono para a fase de produção ($2.991,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq) — mostrou que as plantas sequestram anualmente $3.883,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq (Figura 3). O sequestro de $\text{CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na fitomassa do cafeeiro representa 2,3 vezes o valor das emissões (Figura 3). Os resultados de Cornelius et al. (2025) também indicam que a produção primária de café está associada a altos níveis de remoção de CO_2 atmosférico.

Esse carbono sequestrado pela cafeicultura fica estocado temporariamente na fitomassa e retorna à atmosfera em algum estágio posterior, quando a cultura é retirada ou renovada. Entretanto, se essas plantas arrancadas são utilizadas como substituto de combustível fóssil, por exemplo, para suprirem a energia dos fornos de torra de café, há uma contribuição efetiva para o balanço carbono da produção de café.

O aumento da densidade de plantio da cultura pode alterar os balanços de carbono resultantes entre a emissão e o armazenamento de carbono

(Gupta et al., 2017; Cornelius et al., 2025). Os resultados desta pesquisa foram obtidos a partir do espaçamento de plantas tradicional ($3,0 \times 1,0 \text{ m}$), porém outros espaçamentos mais adensados ($2,80 \times 1,0 \text{ m}$ e $2,50 \times 1,0 \text{ m}$) estão começando a ser adotados na região das Matas de Rondônia (Rosa Neto; Alves, 2024). Quando esses espaçamentos forem adotados e tornarem-se mais comuns, mais favorável será o sequestro de carbono dos cafés Robusta amazônicos.

O balanço de carbono da produção de café a pleno sol ainda enfrenta o desafio de conciliar a produtividade com a sustentabilidade. São necessários para manejo da cultura o desenvolvimento e a adoção de práticas que minimizem as emissões de GEE e aumentem a eficiência no uso dos recursos.

A cafeicultura da Amazônia diante dos desafios atuais da mudança climática

A produção e produtividade nas propriedades rurais estão ameaçadas pelas mudanças climáticas nas principais regiões produtoras de café (Koh et al., 2020; Kishaija et al., 2025). Parece indiscutível que os impactos da mudança climática na cafeicultura brasileira já estão ocorrendo, e estão relacionados principalmente ao aumento da temperatura média

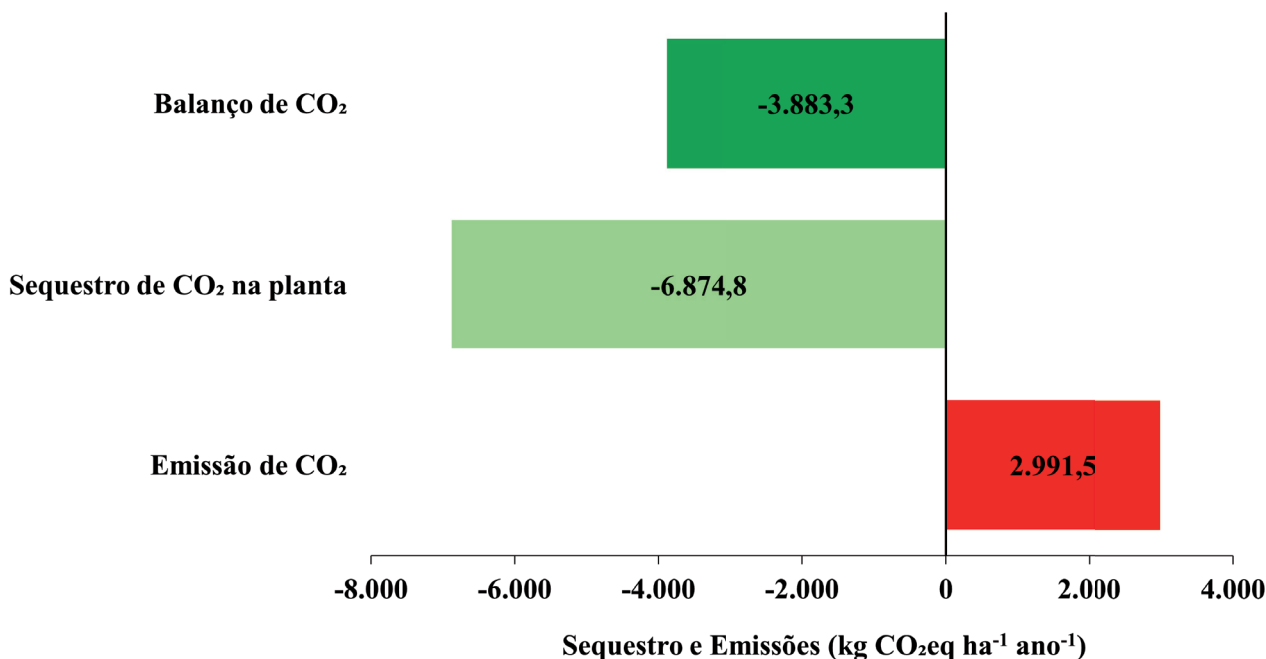


Figura 3. Balanço de gases de efeito estufa (GEE, barra verde-escuro) dos cafés Robusta amazônicos, considerando-se o sequestro de carbono-dióxido de carbono (C-CO_2) na fitomassa das plantas de café (barra verde-clara) e a pegada de carbono por área da fase agrícola (barra vermelha).

do ar e à disponibilidade hídrica (Martins et al., 2018; Gama-Rodrigues et al., 2022; Damatta et al., 2025).

A cafeicultura na região das Matas de Rondônia, a partir do início do século 21, passa por importantes transformações e vem estruturando-se com a adoção de tecnologias baseadas no cultivo de cafés clonais muito produtivos, irrigação, adubação química tecnicada e técnicas de pós-colheita, abrindo oportunidades para a geração de renda na agricultura familiar, principalmente desde 2024, ano em que o *Coffea canephora* atingiu o maior nível histórico de preços, até superior ao *C. arabica* (Conab, 2025). O cenário para a região é promissor, com diversas potencialidades (Ronquim et al., 2024), mas também com muitos desafios diante das novas condições climáticas.

Os pequenos cafeicultores da região das Matas de Rondônia enfrentaram sérias dificuldades para manter a produtividade e qualidade do café diante da seca drástica e das temperaturas elevadas no ano de 2024, mesmo com o uso intensivo da irrigação. Os principais efeitos foram a redução da qualidade e quantidade dos grãos de café, além do aumento da incidência de pragas e doenças.

No contexto atual de produção dos cafés Robusta amazônicos, qual seria a melhor trajetória para proporcionar maior sustentabilidade a esse sistema produtivo? O principal desafio de produção de café para a Amazônia brasileira é manter e buscar ampliar o nível tecnológico, a qualidade de vida do cafeicultor e ampliar os benefícios ecológicos. A resiliência desse tipo de sistema de produção cafeeira diante das mudanças climáticas seria outro dos principais desafios da produção de café nos próximos anos, para a região (Ronquim et al., 2024) e também para o Brasil (Koh et al., 2020).

Para enfrentar os desafios mais urgentes decorrentes dos efeitos das secas severas e elevadas temperaturas, principais estresses ambientais que impactam o crescimento e a produção do café em condições de plena luz solar (Damatta et al., 2025) e que estão se tornando normais nos últimos anos na região Amazônica brasileira, deve haver um esforço conjunto dos órgãos de pesquisa e do setor produtivo (cafeicultores) em busca da seleção de novos clones que não levem em conta apenas a produtividade da planta, mas também critérios como resistência a seca e a elevadas temperaturas, a pragas e doenças, dentre outros. Outras estratégias de adaptação climática para a região das Matas de Rondônia seriam a diversificação da produção dentro e fora da cultura e a expansão do seguro agrícola relacionado ao clima.

Quanto à irrigação, deve-se considerar prioritária a gestão eficiente da água na propriedade rural. Muitas propriedades chegaram à situação de não terem água para irrigação nos períodos de seca no ano de 2024. Surpreende o fato de ocorrer déficit hídrico para as culturas em pleno bioma amazônico, a maior bacia hidrográfica e com os maiores índices pluviométricos anuais do mundo. Deve-se priorizar o aumento da captação e do armazenamento de água da chuva e investir na preservação dos remanescentes florestais e no reflorestamento com espécies nativas dentro da propriedade rural, principalmente em torno das nascentes de água e em áreas obrigadas por lei ao reflorestamento, como as áreas de reserva legal.

Com relação à emissão de GEE dos cafés cultivados na região das Matas de Rondônia, os resultados aqui obtidos e os de muitos estudos (Van Rikxoort et al., 2014; Arellano; Hernández, 2023; Cornelius et al., 2025; Kishaija et al., 2025; Walsh et al., 2025) enfatizam os aportes de fertilizantes químicos nitrogenados como principais responsáveis pelo aumento das emissões de GEE no cultivo do café. As perdas, como a volatilização de amônia e a lixiviação de nitrato, e quaisquer outros desperdícios de nitrogênio causam emissões de N_2O do solo após sua aplicação e contribuem com impactos ambientais e econômicos, especialmente os custos dos insumos associados aos fertilizantes químicos.

O uso eficiente de fertilizantes nitrogenados é, portanto, um componente fundamental dos sistemas de produção de café. Esses insumos devem ser aplicados de acordo com as recomendações dos serviços de assistência técnica rural, com base em análises regulares do solo e das folhas e nas necessidades da planta — por exemplo, baseando as taxas de aplicação na produtividade esperada do café —. A divisão das doses de nitrogênio em várias aplicações parceladas pode ser mais eficiente para a absorção e redução de perdas por volatilização, escoamento superficial e redução das emissões de N_2O por nitrificação ou desnitrificação.

Para suprir as necessidades de N da cafeicultura, deve-se priorizar maior contribuição dos fertilizantes orgânicos. O fertilizante orgânico, diferentemente do fertilizante químico, reduz a poluição do solo e do sistema hídrico, aumenta o armazenamento de carbono orgânico no solo, melhora a qualidade do solo e reduz a emissão de CO_2 e N_2O . Outra opção seria uso de fertilizantes nitrogenados de liberação lenta ou controlada, que proporcionam uma absorção mais eficiente, ou o uso de fertilizantes estabilizados, que contêm inibidores de urease

ou da nitrificação e que atuam na redução das emissões de N_2O provenientes da nitrificação e desnitrificação e na redução da lixiviação de nitrato (Halvorson et al., 2014).

Entretanto, cabe destacar que os aportes de N estão associados a maiores taxas de acumulação de carbono na fitomassa. Isso significa que a melhora na eficiência do uso de N é fundamental para alcançar maior potencial de acúmulo de carbono na fitomassa, além de elevada produtividade e consequente renda líquida favorável aos cafeicultores. O aumento da densidade de plantas de café por hectare (uso de espaçamentos mais reduzidos) também destaca-se como um manejo capaz de aumentar o acúmulo de carbono na área.

A transição para a produção agroflorestal é outra importante estratégia de adaptação às mudanças climáticas na cafeicultura. Na prática, compreende uma mudança no uso da terra, da produção sem sombra para a produção de café sob a sombra de outras espécies. Esse sistema oferece uma oportunidade única para combinar os objetivos duplos de adaptação e mitigação das mudanças climáticas a efeitos indiretos, como a melhoria da qualidade do grão, a redução da pressão sobre a floresta natural e da erosão do solo (Gupta et al., 2017; Nasiro, 2024).

Sistemas de manejo de café agroflorestal, na maioria das vezes, apresentam balanço de GEE por área mais satisfatório que áreas a pleno sol. Essa estratégia de mitigação e adaptação visa diminuir o impacto da mudança climática e do aquecimento global na produção e qualidade do café, bem como aumentar o sequestro de carbono e reduzir a pegada de carbono na área, e é frequentemente uma das formas mais promissoras de produzir café com baixa pegada de carbono, reduzindo também a vulnerabilidade dos cafeicultores aos riscos climáticos e de mercado por meio da diversificação (Van Rikxoort et al., 2014; Koh et al., 2020; Gupta et al., 2017; 2020; Zaro et al., 2020; Nasiro, 2024; Cornelius et al., 2025; Damatta et al., 2025; Kishaija et al., 2025; Rahn et al., 2025; Walsh et al., 2025).

Propriedades cafeeiras produtivas cultivadas a pleno sol, como as da região das Matas de Rondônia, geram renda líquida satisfatória (Rosa Neto, Alves, 2024). Transformar o cultivo a pleno sol da região em sistemas agroflorestais traria maior ganho em qualidade do grão, maior sequestro de carbono na área e maior segurança de produção diante das intempéries geradas pela mudança climática. Entretanto, como destacaram Birkenberg et al. (2021), a viabilidade econômica desse tipo de

sistema depende, em última análise, da presença de mercados adequados, ou seja, dispostos a pagar um valor adicional por um selo de carbono positivo ou mesmo carbono neutro, e exige apoio adequado em escala.

Há também potencial significativo para reduções de GEE e sequestro de carbono fora das plantações de café. Possibilidades de adaptação e mitigação poderiam surgir por meio do reflorestamento com espécies nativas em áreas degradadas e de plantios de árvores limítrofes às culturas (Rahn et al., 2014). Além disso, esse reflorestamento nas áreas de café produz benefícios indiretos (Ronquim et al., 2024) e benefícios diretos, como o recebimento de créditos de carbono. Há possibilidade de o cafeicultor comercializar créditos de carbono no mercado voluntário, no qual empresas e indivíduos podem adquirir créditos de carbono por iniciativa própria, como parte de seus esforços de sustentabilidade e responsabilidade ambiental, desde que seja comprovado o balanço positivo de GEE da lavoura de café através de um processo de contabilização, certificação e validação, se houver adicionalidade, que representa a adoção de práticas que resultam em sequestro ou redução de emissões além da que ocorreria em cenários usuais.

A comercialização de créditos de carbono pode representar uma fonte de receita extra para o produtor, além de agregar valor ao produto final (o café), facilitar o acesso a financiamentos com melhores condições e contribuir para a redução das emissões de carbono. No Brasil, o mercado regulado de carbono está em fase de estruturação com a recente aprovação da lei que regulamenta o setor. Entretanto, o mercado voluntário já está em funcionamento no País e no exterior, com diversos projetos de geração e negociação de créditos de carbono.

Outra importante questão atual quanto à emissão dos GEE da cafeicultura está relacionada aos impactos da mudança de uso e ocupação da terra. À medida que a demanda por café continua a crescer, em meio ao impasse da mudança climática, reduzindo as áreas de aptidão para o café, mudanças no uso da terra isso podem ser desencadeadas, para satisfazer a crescente demanda por café de qualidade no mercado global. A implantação de áreas de café Robusta amazônico em áreas de pastagens degradadas na região amazônica pode ser uma ótima alternativa não apenas para suportar o aumento da demanda de café, mas para possibilitar o crédito adicional de carbono da fitomassa.

As pastagens são o uso agropecuário que mais ocupa espaço na região das Matas de Rondônia, onde representam perto de 1,9 milhão de hectares, ou 45,2% da área da região (Ronquim et al., 2024). Se as lavouras de café avançassem sobre 25% das pastagens, em áreas degradadas, por exemplo, ocupariam 475 mil hectares, que, somados aos 34,4 mil hectares atuais, totalizariam 509,4 mil hectares. Considerando-se a média atual, de 68,5 sacas por hectare (Rosa Neto, Alves, 2024), apenas a região das Matas de Rondônia, sem desmatar 1 ha adicional de floresta, poderia ter uma produção superior à do Vietnã, país que lidera a produção mundial de cafés da espécie *C. canephora*. A cafeicultura da região ocupa primordialmente as áreas já transformadas em pastagens (Ronquim et al., 2024), e o mesmo fenômeno ocorre em praticamente toda Amazônia brasileira, onde áreas florestais são queimadas e desmatadas para abertura de terras novas primordialmente para ocupação de pastagens (Barlow et al., 2016; Ribeiro et al., 2025).

A União Europeia (UE) aprovou recentemente uma legislação que proibirá a importação de café e outras culturas de regiões onde o café tenha substituído florestas naturais (Solar et al., 2025). Com relação aos cafés Robusta amazônicos, preocupa o fato de que a UE poderá adotar uma abordagem regional e, com isso, a cafeicultura eventualmente pode vir a ser classificada como de maior risco por vastas áreas de floresta tropical ainda permanecerem nesse bioma e estarem sob forte pressão de desmatamento. Os resultados apresentados por Ronquim et al. (2024), com o uso de geotecnologias por imagens de satélite, demonstram que não há desmatamento vinculado à cafeicultura na região das Matas de Rondônia.

Conclusões

A produção do café Robusta amazônico na região das Matas de Rondônia demonstra pegada de carbono satisfatória, principalmente devido à elevada produtividade, e também contribui para a baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE) em decorrência da intensa aplicação de mão de obra familiar nos principais manejos da cafeicultura e, conseqüentemente, da redução significativa da necessidade de maquinário agrícola que consome combustíveis fósseis.

A aplicação de fertilizantes químicos nitrogenados representou a maior contribuição para a emissão de GEE. Dessa forma, é importante utilizar

os fertilizantes minerais nitrogenados de modo mais eficiente e racional e ampliar o uso de fertilizantes orgânicos e de culturas fixadoras de nitrogênio nas ruas, para suprir a demanda nutricional da cultura. A avaliação das contribuições dos distintos manejos para a pegada de carbono proporcionou melhor compreensão dos pontos críticos das emissões de GEE da cafeicultura da região das Matas de Rondônia.

O resultado satisfatório de balanço de carbono na fitomassa do cafeeiro representa 2,3 vezes o valor das emissões. Após o fim do ciclo completo da cultura, o balanço de carbono favorável depende do uso final da fitomassa das plantas.

Métodos de cultivo regenerativo, sistemas integrados, e o aumento da densidade de plantas de café por hectare seriam recomendações para tornar a produção de café ainda mais sustentável, com aumento do sequestro de carbono, menor emissão de GEE e resiliência às mudanças climáticas para o pequeno cafeeiro da Amazônia brasileira.

Agradecimentos

À Cooperativa de Crédito Sicoob e à Embrapa, pelo financiamento do projeto “Mapeamento dos serviços ambientais associados ao cultivo de café Robusta na região das Matas de Rondônia (RO)” (código SEG nº 30.22.90.028.00.00). Aos Cafeicultores Associados da Região das Matas de Rondônia (Caferon). Ao bolsista Tomás de Sousa Manzano, pelos ajustes finais nas figuras.

Referências

- ARELLANO, C.; HERNÁNDEZ, C. Carbon footprint and carbon storing capacity of arabica coffee plantations of Central America: a review. **Coffee Science**, v. 18, p. e182072-e182072, 2023.
- BARLOW, J.; LENNOX, G. D.; FERREIRA, J.; BERENQUER, E.; LEES, A. C.; NALLY, R. M.; GARDNER, T. A. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, v. 535, n. 7610, p. 144-147, 2016.
- BIRKENBERG, A.; NARJES, M. E.; WEINMANN, B.; BIRNER, R. The potential of carbon neutral labeling to engage coffee consumers in climate change mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123621, 2021.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Fator de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica no Brasil**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/ptbr/acompanheomcti/cgcl/noticias/>

fator-de-emissao-de-CO2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 e o menor em 12 anos. Acesso em: 13 maio 2025.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatórios e Publicações**: emissão veicular. 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**: café safra 2024, 4º levantamento. Brasília, DF: Conab, v. 11, n. 4, jan. 2025.

CORNELIUS, J. P.; HARDY, F. W.; HARVEY, C. A. Carbon footprints and CO₂ removal in primary production of coffee: a meta-analytical review. **Environmental Reviews**, v. 33, p. 1-15, 2025.

CUSTODIO, A. M.; DE MENEZES SILVA, P. E.; SANTOS, T. R. D.; LOURENÇO, L. L.; AVILA, R. G.; DA SILVA, A. R.; SILVA, F. G. Seasonal variation in physiological traits of Amazonian *Coffea canephora* genotypes in cultivation systems with contrasting water availability. **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3197, 2022.

DAMATTA, F. M.; MARTINS, S. C.; RAMALHO, J. D. Ecophysiology of coffee growth and production in a context of climate changes. **Advances in Botanical Research**, v. 114, p. 97-139, 2025.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. *Revue Franco-Brésilienne de Géographie*. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 1, n. 37, 2018.

FAO. FAOSTAT. **Crops and livestock products**. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/?#data/QCL>. Acesso em: 6 maio 2025.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; VICENTE, L. C.; ALVARENGA, L. C.; MÜLLER, M. W.; PARTELLI, F. L.; FAITANIN, M. A. Perspectives on carbon footprint of agricultural land-use in Brazil. **Carbon Footprints**, v. 1, p. 1-12, 2022.

GUPTA, R. K.; KUMAR, V.; SHARMA, K. R.; BUTTAR, T. S.; SINGH, G.; MIR, G. Carbon sequestration potential through agroforestry: a review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Science**, v. 6, n. 8, p. 211-220, 2017.

HALVORSON, A. D.; SNYDER, C. S.; BLAYLOCK, A. D.; DEL GROSSO, S. J. Enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: potential role in nitrous oxide emission mitigation. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 715-722, 2014.

HERGOUALC'H, K.; BLANCHARTD, E.; SKIBAE, U.; HÉNALTF, C.; HARMANDA, J. M. Changes in carbono stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus na agroforestry system with

Inga densiflora, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, v. 148, p. 102-110, 2012.

IBGE. **Malha municipal**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 29 abr. 2025.

IPCC. Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, preparadas pelo Programa Nacional de Inventários de Gases de Efeito Estufa. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japan: IGES, 2006. 4 v. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 29 abr. 2025.

IPCC. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (ed.). **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 29 abr. 2025.

KOH, I.; GARRETT, R.; JANETOS, A.; MUELLER, N. D. Climate risks to Brazilian coffee production. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104015, 2020.

KISHAIJA, N.; OCWA, A.; KUUNYA, R.; SSEMUGENZE, B.; HEIL, B. Climate change mitigation and livelihood components under smallholder coffee farming: a bibliographic and systematic review. **Agriculture & Food Security**, v. 14, n. 1, p. 3, 2025.

MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. (ed.). **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 474 p.

MARTINS, L. D.; EUGENIO, F. C.; RODRIGUES, W. N.; TOMAZ, M. A.; DOS SANTOS, A. R.; RAMALHO, J. C. Carbon and water footprints in Brazilian coffee plantations - the spatial and temporal distribution. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 30, n. 6, p. 482-488, 2018.

NASIRO, K. The Benefits of Agroforestry Coffee Production Systems: a review. **World Journal of Food Science and Technology**, v. 8, n. 4, p. 86-105, 2024.

NOPONEN, M. R. A.; EDWARDS-JONES, G.; HAGGAR, J. P.; SOTO, G.; ATTARZADEH, N.; HEALEY, J. R. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 151, p. 6-15, 2012.

RAHN, E.; BUNN, C.; CRAPARO, A. Projected shifts in coffee production and sustainability due to climate changes. **Advances in Botanical Research**, v. 114, p. 559-588, 2025.

RODRIGUES, V. G. S.; CASTILLA, C.; COSTA, R. C.; PALM, C. Estoque de carbono em sistema agroflorestal com café em Rondônia – Brasil. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, 2000, Poços de Caldas. **Resumos Expandidos**. Brasília, DF: Embrapa Café/Minasplan, 2000.

RONQUIM, C. C.; ROCHA, N. C. V.; ALVES, E. A. **Levantamento e mapeamento do uso e cobertura da terra com ênfase nas áreas cafezeiras da região das Matas de Rondônia**. Campinas: Embrapa Territorial, 2024. 79 p. (Embrapa Territorial. Documentos, 155). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/265553/1/6222.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

RIBEIRO, J. M. P.; MACULAN, G.; DE ÁVILA, B. O.; MORAIS, V. A.; HOECKESFELD, L.; SECCHI, L.; DE ANDRADE GUERRA, J. B. S. O. Deforestation by production displacement: expansion of cropland and cattle ranching on Amazon Forest. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-32, 2025.

ROSA NETO, C.; ALVES, E. **Perfil socioeconômico e produtivo dos cafeicultores da região das Matas de Rondônia**. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia, 2024. (Embrapa Rondônia. Documentos, 170).

SOLAR, J.; IVANOVA, Y.; OBERLACK, C. Human Rights and Environmental Due Diligence Regulations for Deforestation-Free Value Chains? Exploring the Implementation of the EU Regulation on Deforestation-Free Products in the Cocoa and Coffee Sectors of Peru. **Global Policy**, 2025.

TEIXEIRA, A. L.; ROCHA, R. B.; ESPINDULA, M. C.; RAMALHO, A. R.; VIEIRA JUNIOR, J. R.; ALVES, E. A.; LUNZ, A. M. P.; SOUZA, F. de F.; COSTA, J. N. M.; FERNANDES, C. de F. Amazonian Robustas – new *Coffea canephora* coffee. **Biotechnology**, v. 20, n. 3, e323420318, 2020.

VAN RIKXOORT, H.; SCHROTH, G.; LÄDERACH, P.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, B. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production.

Agronomy for Sustainable Development, v. 34, p. 887-897, 2014.

VOLSI, B.; TELLES, T. S.; CALDARELLI, C. E.; CAMARA, M. R. G. D. The dynamics of coffee production in Brazil. **PloS One**, v. 14, n. 7, e0219742, 2019.

WALSH, C.; HAGGAR, J.; CERRETELLI, S.; VAN OIJEN, M. Comparing carbon agronomic footprint and sequestration in Central American coffee agroforestry systems and assessing trade-offs with economic returns. **Science of the Total Environment**, v. 961, p. 178360, 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 17 maio. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **GHG Protocol Agricultural Guidance**. Washington, DC: WRI; WBCSD, 2014. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/GHG%20Protocol%20Agricultural%20Guidance%20%28April%2026%29_0.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. DC: WRI; WBCSD, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf>. Acesso em: 3 maio. 2025.

ZARO, G. C.; CARAMORI, P. H.; YADA JUNIOR, G. M.; SANQUETTA, C. R.; FILHO, A. A.; NUNES, A. L.; VORONEY, P. Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 799-809, 2020.