

**LAUANA BLENDA SILVA**

**TECNOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DO BALANÇO DE CARBONO NOS  
SETORES FLORESTAL E AGROPECUÁRIO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine

Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586t  
2023  
Silva, Lauana Blenda, 1993-  
Tecnologias para estimativa do balanço de carbono nos  
setores florestal e agropecuário / Lauana Blenda Silva. – Viçosa,  
MG, 2023.

1 tese eletrônica (162 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.036>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mitigação de dióxido de carbono. 2. Mudanças  
climáticas. 3. Carvão vegetal. 4. Agrossilvicultura. 5. Redução  
de gases do efeito estufa. I. Jacovine, Laércio Antônio  
Gonçalves, 1963-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.916132

LAUANA BLENDA SILVA

TECNOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DO BALANÇO DE CARBONO NOS  
SETORES FLORESTAL E AGROPECUÁRIO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

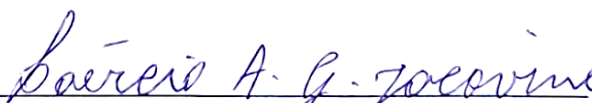
APROVADA: 17 de novembro de 2023.

Assentimento:



---

Lauana Blenda Silva  
Autora



---

Laércio Antônio Gonçalves Jacovine  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

“*Não sou capaz por mim mesma de pensar alguma coisa boa, de construir algo de próprio, mas sois Vós, Senhor, quem me torna capaz*”. A Deus, Princípio e Fim de todas as coisas, que me conduz e é a fonte de toda e qualquer realização em minha vida. Por seu amor e misericórdia. Por ser minha fortaleza e meu sustento. Agradeço, ainda, por todos que Ele permitiu participar dessa trajetória.

Aos meus pais, Geralda Sônia e José Pedro (*in memoriam*), pelo amor, incentivo e confiança. Pela clareza de que “a educação é um ato de amor” e por não medirem esforços para que, hoje, eu pudesse concluir mais essa etapa. Vocês estão comigo em todos os momentos, em pensamentos e em meu coração. Dedico esse trabalho a vocês.

Ao meu amado esposo Joubert, que acompanhou de perto todas as alegrias e me ajudou a superar os desafios durante minha jornada no doutorado. Pelo amor, companheirismo, paciência e por tornar minha vida mais feliz.

Aos meus irmãos, Luana e Igor, pelo amor, torcida e vivências, que apenas irmãos podem compartilhar. Mesmo com tamanha distância e poucos encontros ao longo dos últimos anos, foram fonte de carinho e incentivo.

À minha avó Eliza, pelo amor, orações, exemplo e torcida. Aos tios, primos e toda minha família pelo carinho e apoio.

À Fraternidade Pequena Via, que me aproxima cada vez mais de Deus, por meio do carisma e espiritualidade de Santa Teresinha do Menino Jesus e da Sagrada Face. Aos irmãos de Comunidade, pelas orações, amizade e por sempre me ajudarem a renovar minha fé e esperança.

Ao orientador e amigo, Professor Laércio Jacovine, exemplo de solicitude, atenção e justiça. Agradeço pelas tantas oportunidades oferecidas, apoio, confiança e por suscitar novas ideias e desafios. Quantos aprendizados ao longo desses anos de orientação!

À coorientadora, Professora Angélica de Cássia, pelas valiosas contribuições para o trabalho, por toda gentileza, atenção e solicitude.

Aos demais membros da banca, Professores Carlos Torres, Daniel Brianezi e Dênis Cunha pela solicitude e prontidão ao aceitarem o convite para participação da banca. Aos Professores Carlos e Daniel, que estiveram presentes no início do Programa Carbono Zero UFV, auxiliando na abertura de caminhos, que, felizmente, pude percorrer ao longo de quase 10 anos. Ao Professor Carlos, que também foi presença instigadora ao longo da minha jornada acadêmica.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pelo suporte. A todos os professores e demais funcionários do DEF, que contribuíram preciosamente para minha formação profissional e pessoal.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. À CAPES, pelo aporte financeiro e fomento à pesquisa científica.

Ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) que, por meio do Projeto Siderurgia Sustentável, forneceu o financiamento para parte do trabalho desenvolvido.

Ao Fundo Internacional de Desenvolvimento Agrícola (FIDA) das Nações Unidas e ao Instituto de Políticas Públicas e Desenvolvimento Sustentável (IPPDS) da UFV, que por meio do Projeto Adaptando Conhecimento para Agricultura Sustentável e Acesso ao Mercado (AKSAAM) também contribuíram para a realização e divulgação de parte do trabalho desenvolvido.

Aos antigos e atuais membros do Grupo de Estudos em Economia Ambiental e Manejo Florestal (GEEA) com quem convivi ao longo da minha participação. A oportunidade de conduzir meus trabalhos em um grupo tão diverso engrandeceu ainda mais a minha experiência. Agradeço pelos aprendizados, apoio, motivação e companheirismo.

A todos os meus amigos. Mesmo aqueles que hoje estão distantes fisicamente se fazem tão próximos e são fonte de ânimo e alegria.

Sou eternamente grata a todas as pessoas e situações que me transformaram e que, a partir disso, me oportunizaram concluir mais essa etapa.

## **BIOGRAFIA**

Lauana Blenda Silva, filha de José Pedro da Silva Júnior (*in memoriam*) e Geralda Sônia Arantes da Silva, nasceu em 04 de outubro de 1993, na cidade de Formiga, Minas Gerais. Em 2011 concluiu o Ensino Médio no Colégio Santa Teresinha, em Formiga, Minas Gerais. Em 2012, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, concluindo em julho de 2017. Em agosto de 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFRV, em nível de Mestrado, e defendeu sua dissertação em julho de 2019. Em agosto de 2019, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFRV, em nível de Doutorado, submetendo-se à defesa da tese em novembro de 2023.

*“Quem procura a verdade, consciente ou inconscientemente, procura a Deus.”*

Edith Stein | Santa Teresa Benedita da Cruz

## RESUMO

SILVA, Lauana Blenda, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2023. **Tecnologias para estimativa do balanço de carbono nos setores florestal e agropecuário.** Orientador: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

As mudanças climáticas podem ser a questão mais urgente entre políticos, líderes e acadêmicos. Um dos objetivos do Acordo de Paris é buscar esforços para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Para isso, cada país signatário propõe reduções de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). Neste contexto, muitas iniciativas e novas demandas são criadas. Uma delas é a crescente demanda por rótulos climáticos, capazes de impulsionar padrões de consumo sustentáveis. Diante disso, o estudo foi desenvolvido com os objetivos de: desenvolver um sistema para calcular o balanço de carbono e a viabilidade técnica e econômica na produção de carvão vegetal (Capítulo I); verificar como a adoção de boas práticas na produção de carvão vegetal contribui para a descarbonização da indústria siderúrgica (Capítulo II); desenvolver uma ferramenta para calcular as remoções de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), as emissões de GEE e o balanço de carbono em Sistemas Agroflorestais (SAFs) (Capítulo III). As bases das ferramentas propostas nos Capítulos I e III foram desenvolvidas no *software* Microsoft Excel. Os GEE considerados foram CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). As ferramentas são compostas por etapas de coleta dos dados necessários para os cálculos e por relatórios, que contêm os resultados. O objetivo fundamental das ferramentas é auxiliar os produtores rurais na coleta de dados, cálculos, monitoramento e comunicação das remoções de CO<sub>2</sub>, das emissões de GEE e do balanço de carbono de suas atividades. O uso das ferramentas pode: minimizar os riscos de investimentos para a descarbonização de atividades rurais; sensibilizar os produtores quanto às questões climáticas; auxiliar os produtores nas tomadas de decisão; ser base para a criação de estratégias para uma recompensa financeira aos produtores que adotam práticas climaticamente inteligentes; e auxiliar na adequação às exigências do mercado em relação à pegada de carbono. Os resultados do Capítulo II foram obtidos pelo cálculo do balanço de carbono da carbonização, realizado para onze propriedades rurais, na ferramenta desenvolvida no Capítulo I. Os cálculos foram feitos para dois cenários: linha de base (sem queima de gases) e adoção do sistema fornos-fornalha (com queima de gases). A utilização do sistema fornos-fornalha reduz 45,2% das emissões de GEE, quando comparado aos sistemas sem queima de gases. Este e os demais resultados gerados pelas ferramentas são a base para a descarbonização das atividades consideradas. O cálculo da pegada de carbono auxilia na identificação dos



impactos ambientais negativos dos processos produtivos e, então, metas de redução e compensação de emissões de GEE podem ser traçadas. Os rótulos climáticos também podem melhorar a imagem corporativa e ser uma vantagem competitiva, já que consumidores estão dispostos a pagar mais por produtos “amigos do clima”. A melhor gestão das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub>, a partir do uso das ferramentas, pode contribuir para o alcance das metas da NDC do Brasil e convergem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima).

Palavras-chave: Carvão vegetal; Economia de baixo carbono; Mudanças climáticas; Pegada de carbono; Remoção de CO<sub>2</sub>; Sistemas agroflorestais.

## ABSTRACT

SILVA, Lauana Blenda, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November 2023. **Technologies for carbon balance estimation in forestry and agriculture sectors.** Adviser: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine. Co-adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Climate change perhaps the most pressing issue among politicians, leaders and academics. One of the objectives of the Paris Agreement is to seek efforts to limit the global average temperature rise to 1.5 °C above pre-industrial levels. For this, each signatory country proposed reductions in greenhouse gas (GHG) emissions in its Nationally Determined Contribution (NDC). In this context, many initiatives and new demands are created. One of them is the growing demand for climate labels, capable of driving sustainable consumption patterns. Therefore, the study was developed with the objectives of: developing a system to calculate the carbon balance and technical and economic feasibility in the production of charcoal (Chapter I); verify how the adoption of good practices in the charcoal production contributes to the decarbonization of the steel industry (Chapter II); develop a tool to calculate the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) removals, GHG emissions and carbon balance in Agroforestry Systems (SAFs) (Chapter III). The bases of the tools proposed in Chapters I and III were developed in the Microsoft Excel software. The GHG considered were CO<sub>2</sub>, methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). The tools are composed of stages of data collection necessary for the calculations and reports, which contain the results. The fundamental objective of the tools is to assist rural producers in data collection, calculations, monitoring and communication of CO<sub>2</sub> removals, GHG emissions and carbon balance of their activities. The use of tools can: minimize investments risks for the decarbonization of rural activities; sensitize rural producers on climate issues; assist rural producers in decision making; be the basis for the creation of strategies for a financial reward for rural producers who adopt climate-smart practices; and assist in adapting to market requirements in relation to the carbon footprint. The results of Chapter II were obtained by calculating the carbon balance of carbonization, carried out for eleven farms, in the tool developed in Chapter I. The calculations were made for two scenarios: baseline (without gas burning) and adoption of the kilns-furnace system (with gas burning). The use of the kilns-furnace system reduces 45.2% of GHG emissions when compared to systems without burning gases. This and the other results generated by the tools are the basis for the decarbonization of the considered activities. The calculation of the carbon footprint helps in the identification of the negative environmental impacts of the production processes and, then, goals of reduction and compensation of GHG emissions can be traced. Climate labels can also improve corporate

image and be a competitive advantage, as consumers are willing to pay more for “climate-friendly” products. Better management of GHG emissions and CO<sub>2</sub> removals, from the use of tools, can contribute to the achievement of the NDC goals in Brazil and converge to the UN Sustainable Development Goals (SDG), especially the SDG 13 (Climate action).

**Keywords:** Agroforestry systems; Carbon footprint; Charcoal; Climate changes; CO<sub>2</sub> removal; Low carbon economy.

## SUMÁRIO

Introdução geral.....	12
Referências .....	13
CAPÍTULO I.....	16
<i>Charcoal System</i> : ferramenta brasileira para produção de carvão vegetal de baixa emissão de carbono .....	16
Resumo .....	16
1. Introdução.....	17
2. Material e métodos .....	19
3. Resultados e discussão .....	23
4. Considerações finais.....	45
Referências .....	46
CAPÍTULO II.....	57
Boas práticas na produção de carvão vegetal: auxílio para descarbonização da indústria siderúrgica .....	57
Resumo .....	57
1. Introdução.....	58
2. Material e métodos .....	59
3. Resultados.....	63
4. Discussão.....	65
5. Conclusões.....	68
Referências .....	69
CAPÍTULO III .....	75
Ferramenta para cálculo do balanço de carbono em Sistemas Agroflorestais (SAFs).....	75
Resumo .....	75
1. Introdução.....	76
2. Material e métodos .....	77
3. Resultados e discussão .....	79
4. Considerações finais.....	100
Referências .....	100
Considerações finais.....	118
Referências .....	119
Apêndices .....	120

## Introdução geral

As diversas atividades humanas contribuem para o aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, sendo as principais causas das mudanças climáticas (IPCC, 2021). Estas alterações no clima e os danos nos ecossistemas terrestres são cada vez mais irreversíveis (IPCC, 2023). Por isso, as mudanças climáticas são uma preocupação comum da humanidade e podem ser a questão mais urgente entre políticos, líderes e acadêmicos.

Em nível mundial, o setor de energia é o que possui maior contribuição para as emissões de GEE (WRI, 2023). Durante a 26ª Conferência das Partes (COP26), em 2021, a relação entre o consumo de combustíveis fósseis e as mudanças climáticas teve menções sem precedentes. O acordo firmado durante a conferência exigiu que as Partes acelerassem a transição para sistemas de energia de baixa emissão de carbono (UNFCCC, 2021).

O Brasil, diferente do cenário mundial, possui a maior parte (74%) de suas emissões de GEE relacionadas aos setores “Agropecuária” e “Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas” (SEEG, 2022). A principal fonte de emissão no país são as alterações de uso do solo, associadas ao desmatamento (SEEG 2022). A importância de proteger, conservar e restaurar a natureza também faz parte das discussões mundiais para a mitigação e adaptação climática (UNFCCC, 2021). As florestas, como reservatórios de carbono, têm o potencial de remover dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera e estocar carbono em seus diversos componentes: vegetação, solos e necromassa (Gogoi et al., 2022).

A estruturação, a nível mundial, de objetivos comuns e de estratégias para a descarbonização das atividades antrópicas foi feita a partir do Acordo de Paris. O Acordo, firmado na COP21, em 2015, possui, entre outras metas, a de buscar esforços para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Para que isso aconteça, será necessário atingir emissões líquidas zero por volta de 2050 (IPCC, 2018).

Os objetivos firmados no Acordo devem ser alcançados a partir de metas de mitigação de emissões de GEE, estabelecidas pelos países signatários, em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). O Brasil se comprometeu em reduzir suas emissões de GEE em 48% e 53% abaixo dos níveis de 2005, em 2025 e 2030, respectivamente, além de alcançar a neutralidade climática até 2050 (Talanoa, 2023). Estes objetivos serão alcançados a partir de ações para redução das emissões de GEE, como por exemplo a promoção da adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética (Brasil, 2017), e também ações para maior

remoção de carbono da atmosfera, como o incentivo à adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) (MAPA, 2021).

Neste contexto, muitas iniciativas e novas demandas são criadas, nos setores público e privado. Uma delas é a crescente demanda por rótulos climáticos, capazes de impulsionar padrões de consumo sustentáveis, por parte de grandes organizações e também pelo consumidor final (Birkenberg et al., 2021). De um lado, a oferta de produtos e serviços com menor pegada de carbono ou neutros em carbono pode melhorar a imagem corporativa e ser uma vantagem competitiva (Pinto et al., 2018, Birkenberg et al., 2021). Por outro lado, os consumidores estão cada vez mais assumindo atitudes conscientes frente às mudanças climáticas e estão dispostos a pagar mais por estes serviços e produtos “amigos do clima” (Feucht e Zander, 2018, Birkenberg et al., 2021, Rondoni e Grasso, 2021, Xu e Lin, 2021, Asioli et al., 2023).

Diante desse cenário, o estudo foi desenvolvido com o objetivo de fomentar o cálculo da pegada de carbono e a obtenção de produtos carbono neutro nos setores florestal e agropecuário. Este objetivo é alcançado por meio da elaboração de ferramentas para o cálculo das emissões de GEE, das remoções de CO<sub>2</sub> e do balanço de carbono. Dessa forma, tem-se o intuito de contribuir para o cumprimento das metas estabelecidas na NDC do Brasil e o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (UN, 2015). Para isso, o estudo foi subdividido em três capítulos:

- Capítulo I: *Charcoal System*: ferramenta brasileira para produção de carvão vegetal de baixa emissão de carbono;
- Capítulo II: Boas práticas na produção de carvão vegetal: auxílio para descarbonização da indústria siderúrgica;
- Capítulo III: Ferramenta para cálculo do balanço de carbono em Sistemas Agroflorestais (SAFs).

## Referências

ASIOLI, D.; ZHOU, X.; HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU, A.; VANHATALO, A.; GIVENS, D.I.; RONDONI, A.; TURPEINEN, A.M. Consumers' valuation for low - carbon emission and low – saturated fat butter. *Food Quality and Preference*, v. 108, p. 104859, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.104859>

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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123621>

BRASIL. *Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017*. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. [2017]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm). Acesso em: 08 jan. 2024.

FEUCHT, Y.; ZANDER, K. Consumers' preferences for carbon labels and the underlying reasoning. A mixed methods approach in 6 European countries. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, p. 740-748, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.236>

GOGOI, A.; AHIRWAL, J.; SAHOO, U.K. Evaluation of ecosystem carbon storage in major forest types of Eastern Himalaya: Implications for carbon sink management. *Journal of Environmental Management*, v. 302/A, p. 113972, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113972>

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers*. 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf). Acesso em: 29 jun. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2023: Synthesis Report: Summary for Policymakers*. 2023. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). Acesso em: 06 set. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Global Warming of 1.5 °C: Summary for Policymakers*. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>. Acesso em 17 out. 2023.

[MAPA] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): Visão estratégica para um novo ciclo*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono/publicacoes/abc-portugues.pdf>. Acesso em: 08 set. 2023.

PINTO, R.G.D.; SZKLO, A.S.; RATHMANN, R. CO<sub>2</sub> emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. *Energy Policy*, v. 114, p. 380-393, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.040>

RONDONI, A.; GRASSO, S. Consumers behaviour towards carbon footprint labels on food: A review of the literature and discussion of industry implications. *Journal of Cleaner Production*, v. 301, p. 127031, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127031>

[SEEG] Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. *Base de Dados de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil 1970-2021: versão 10.0*. 2022. Disponível em: <https://seeg.eco.br/download/>. Acesso em: 06 set. 2023.

[TALANOIA] Instituto Talanoa. *NDC 2023: o Brasil aumentou a ambição?*. 2023. Disponível em: [https://institutotalanoa.org/wp-content/uploads/2023/09/NDC-2023\\_-sera-que-o-Brasil-aumentou-a-ambicao\\_.pdf](https://institutotalanoa.org/wp-content/uploads/2023/09/NDC-2023_-sera-que-o-Brasil-aumentou-a-ambicao_.pdf). Acesso em: 12 out. 2023.

[UN] United Nations. *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Adoption of the Paris Agreement: Proposal by the President: Draft decision -/CP.21*. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Glasgow Climate Pact: Decision -/CMA.3 (advance unedited version)*. 2021. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3\\_auv\\_2\\_cover%20decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

[WRI] World Resources Institute. *Climate Watch platform*. 2023. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/>. Acesso em: 23 mai. 2023.

XU, M.; LIN, B. Leveraging carbon label to achieve low-carbon economy: Evidence from a survey in Chinese first-tier cities. *Journal of Environmental Management*, v. 286, p. 112201, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112201>



## CAPÍTULO I

### ***Charcoal System: ferramenta brasileira para produção de carvão vegetal de baixa emissão de carbono***

#### **Resumo**

O setor de energia é o que possui maior contribuição para as emissões mundiais de gases de efeito estufa (GEE). O carvão vegetal é uma fonte de bioenergia que auxilia na mitigação dessas emissões. Instrumentos que auxiliem nas tomadas de decisão para consolidação de práticas mais sustentáveis no processo produtivo de carvão vegetal, por meio da quantificação dos benefícios obtidos pela adoção de boas práticas, são necessários. O objetivo foi desenvolver um sistema para calcular o balanço de carbono e a viabilidade técnica e econômica em diferentes cenários da produção de carvão vegetal, que atenda, especialmente, os produtores brasileiros de carvão vegetal. A definição do escopo do sistema foi realizada com o suporte de especialistas científicos e outros profissionais diretamente envolvidos no segmento de carvão vegetal. A base do sistema foi desenvolvida em planilhas do software Microsoft Excel. Após a validação da metodologia realizou-se a programação do sistema web. O sistema desenvolvido, denominado “*Charcoal System*”, pode ser acessado pela URL “[www.charcoalsystem.com.br](http://www.charcoalsystem.com.br)”, possui seis etapas de coleta de dados e os resultados são apresentados em quatro relatórios. O *Charcoal System*: i) auxilia os produtores de carvão vegetal na tomada de decisões, em relação às questões ambientais, técnicas e econômicas da produção; ii) pode ser utilizado como ferramenta para a certificação do processo produtivo de carvão vegetal; e iii) pode auxiliar no fomento de atividades de baixa emissão de carbono na cadeia de produção de carvão vegetal e nas que utilizam esse produto como matéria-prima. Além dessas aplicações pontuais, espera-se que sua utilização promova transformações nas formas de produção e melhorias na qualidade de vida dos produtores de carvão vegetal, convergindo para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

## 1. Introdução

As mudanças climáticas são uma preocupação comum da humanidade e, talvez, sejam a questão mais urgente entre políticos, líderes e acadêmicos. É incontestável que a influência humana contribui para o aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, causando essas mudanças (IPCC, 2021a). O Acordo de Paris, firmado na Conferência das Partes em 2015 (COP21), possui, entre outras metas, a de buscar esforços para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Para que isso aconteça, será necessário atingir emissões líquidas zero por volta de 2050 (IPCC, 2018).

O setor de energia é o que possui maior contribuição para as emissões mundiais de GEE (WRI, 2023). A relação entre o consumo de combustíveis fósseis e as mudanças climáticas teve menções sem precedentes na COP26. O acordo firmado durante a Conferência exige que as Partes eliminem progressivamente a utilização de carvão mineral e os subsídios aos combustíveis fósseis, e acelerem a transição para sistemas de energia de baixa emissão de carbono (UNFCCC, 2021).

Diversas fontes de bioenergia têm sido pesquisadas para sua possível substituição aos combustíveis fósseis (Welfle et al., 2017, Hammar et al., 2019, Babin et al., 2021, Mumbach et al., 2022). No Brasil, a bioenergia de base florestal (lenha e carvão vegetal) são responsáveis por 19,0% da oferta interna de energia renovável (EPE, 2023a) e o investimento nessa fonte de energia pode trazer mais benefícios que simplesmente a emissão evitada pela não utilização de combustíveis fósseis (Favero et al., 2020).

O segmento de carvão vegetal já possui contribuição para a economia brasileira e de outros países (Zulu e Richardson, 2013, Brobbey et al., 2019, Chidumayo, 2019). O Brasil é o principal produtor de carvão vegetal, contribuindo com 11,5% da produção mundial (FAO, 2021). No país, mais de 85% do consumo total de carvão vegetal se dá pelas indústrias de ferro-ligas e, principalmente, de ferro-gusa e aço (EPE, 2023b). Estas utilizam o carvão vegetal como agente termo redutor no alto-forno, sendo esse o grande diferencial do setor siderúrgico brasileiro (CGEE, 2015).

Essa substituição do coque de carvão mineral por carvão vegetal proporciona uma menor emissão de GEE no processo produtivo (Pinto et al., 2018, Souza e Pacca, 2021), podendo tornar os produtos siderúrgicos brasileiros mais competitivos (CGEE, 2015). Porém, para que esse diferencial competitivo seja concretizado é necessário que a produção do carvão

vegetal utilizado nesse processo também aconteça com mais eficiência econômica e qualidade ambiental (CGEE, 2015, Souza e Pacca, 2021).

O estado brasileiro de Minas Gerais é referência na produção de carvão vegetal e contribuiu com 87,5% da produção nacional em 2020 (IBGE, 2022). A Deliberação Normativa COPAM nº 227, aprovada pelo governo do estado brasileiro de Minas Gerais em 2018, é uma das iniciativas que auxiliam na regulamentação e efetivação de boas práticas e técnicas mais limpas na produção de carvão vegetal (Minas Gerais, 2018). O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) também contribui significativamente nesse sentido, por meio da implementação do Projeto Siderurgia Sustentável. O projeto foi criado para incentivar a redução das emissões de GEE na siderurgia brasileira, a partir do aumento da eficiência na produção de carvão vegetal (UN, 2018a). Paralelamente a essas iniciativas, muitas pesquisas foram e são desenvolvidas, buscando melhorias ambientais, sociais e econômicas na produção de carvão vegetal (Oliveira, 2012, Oliveira et al., 2017, Pereira et al., 2017).

A implementação de inovações digitais contribui para a efetivação da sustentabilidade nas diversas cadeias produtivas (Rosário and Dias, 2022, Schöning et al., 2023, Behl et al., 2024). As tecnologias digitais são ferramentas práticas que auxiliam na criação de uma cultura de sustentabilidade, a partir da qual os impactos negativos serão minimizados e novos impactos ambientais e sociais positivos serão gerados (Rosário and Dias, 2022, Behl et al., 2024).

No âmbito das mudanças climáticas, já existem tecnologias que auxiliam na gestão das emissões de GEE nos diversos setores (Bernal et al., 2018, Assad et al., 2020, FAO, 2022, Lorenzo-Sáez et al., 2022, Cool Farm, 2023, GHG Protocol, 2023). De forma geral, a gestão das emissões de GEE pode auxiliar na mitigação e adaptação climática, na melhoria da imagem corporativa, no acesso aos mercados consumidores mais sustentáveis, na redução de custos operacionais, na obtenção de incentivos financeiros, no atendimento aos requisitos legais e na antecipação às futuras normativas comerciais nacionais e internacionais.

O segmento de carvão vegetal ainda não possui uma ferramenta de gestão ambiental e econômica específica. A aplicação dessa tecnologia no segmento de carvão vegetal poderia auxiliar na sensibilização dos produtores rurais em relação às alterações climáticas, nas tomadas de decisões quanto às formas de produção mais limpas, eficientes e economicamente viáveis, na recompensa aos produtores que adotam práticas mais sustentáveis na produção de carvão vegetal, dentre outras vantagens.

Entende-se também que a criação de instrumentos que permitam a quantificação e o monitoramento dos ganhos ambientais e econômicos obtidos pela adoção de práticas mais sustentáveis na produção de carvão vegetal podem auxiliar na consolidação dessas práticas.

Diante do exposto, o objetivo foi desenvolver um sistema para calcular o balanço de carbono e a viabilidade técnica e econômica em diferentes cenários da produção de carvão vegetal, que atenda, especialmente, os produtores brasileiros de carvão vegetal.

## **2. Material e métodos**

O sistema foi desenvolvido em duas fases:

i) Definição do escopo, desenvolvimento e validação do documento-base: inclui a definição das variáveis que deveriam compor o sistema e o desenvolvimento e validação do documento-base, que é o documento que abrangeu toda a metodologia para o cálculo das emissões de GEE, remoções de dióxido de carbono e viabilidade econômica, e foi a base para programação do sistema web (etapa iniciada por Silva (2019));

ii) Programação e validação do sistema web: a programação permitiu que o sistema fosse disponibilizado no formato web.

### **2.1. Definição do escopo, desenvolvimento e validação do documento-base**

Os dados e informações relevantes para compor o escopo do sistema, foram definidos após intensa exploração do tema. O trabalho exploratório foi realizado por meio de amplo levantamento bibliográfico e diversas entrevistas e, ao longo disso, mapeou-se as necessidades e demandas do setor estudado, a fim de que o escopo do sistema contemplasse as variáveis fundamentais.

O levantamento bibliográfico compreendeu diversos documentos, entre trabalhos científicos, documentos oficiais, livros, cartilhas e notas técnicas. As entrevistas exploratórias foram realizadas com especialistas científicos – professora da cadeira de energia, pesquisadores do Projeto Siderurgia Sustentável e outros profissionais diretamente envolvidos – gestor florestal da produção de carvão vegetal e produtores de carvão vegetal.

O documento-base para a criação do sistema incluiu os cálculos do balanço de carbono e viabilidade técnica e econômica da produção de carvão vegetal, e foi desenvolvido em planilhas do *software* Microsoft Excel. A primeira fase para o seu desenvolvimento foi a definição da abrangência do sistema, incluindo a escolha das unidades das quais o balanço de carbono seria quantificado e as fontes de emissões de GEE e remoções de carbono.

O forno de carbonização foi definido como a unidade da qual será quantificado o balanço de carbono. Portanto, as emissões quantificadas no sistema foram aquelas do processo

de carbonização, ou seja, do processo que ocorre dentro dos fornos. O escopo do sistema, nesta primeira versão, não abrangeu as emissões oriundas das atividades relacionadas à produção de madeira, do transporte de madeira, consumo de combustível por atividades mecanizadas dentro do pátio de carbonização, deslocamento de funcionários, transporte do carvão vegetal até a siderurgia, entre outras.

As fontes de emissão de GEE e remoção de carbono, entendidas como “limite operacional” em inventários de GEE, são categorizadas em diretas e indiretas, em três níveis: Escopo 1, Escopo 2 e Escopo 3. O “Escopo 1 – Emissões diretas de GEE” abrange as emissões de GEE por fontes controladas pela instituição inventariada (WRI, 2004). O “Escopo 2 – Emissões indiretas de GEE de energia” inclui as emissões pela geração de energia (eletricidade, calor, vapor e refrigeração) fora dos limites da instituição inventariada, mas adquirida e consumida pela mesma (WRI, 2015). O “Escopo 3 – Outras emissões indiretas de GEE” contempla outras emissões indiretas, que são consequências das atividades da instituição inventariada, mas não são pertencentes ou controladas por ela (WRI, 2004).

A fonte de emissão de GEE considerada no sistema foi a transformação da madeira em carvão vegetal. As remoções de carbono foram estimadas para as florestas plantadas (matéria-prima para a produção de carvão vegetal) e nativas, tanto das áreas de Reserva Legal (RL), como de Preservação Permanente (APP). As fontes de emissão de GEE e remoção de CO<sub>2</sub> pertencem ao Escopo 1.

As metodologias de cálculo das emissões de GEE e remoções de carbono são fundamentadas em *tiers*. Os *tiers* representam o nível de detalhamento das informações sobre os dados de atividade, fatores de emissão e outros parâmetros que são utilizados na estimativa das emissões e remoções. A precisão das estimativas melhora do *Tier 1* para o *Tier 3*, sendo que o *Tier 1* assume informações *default*, estabelecidas internacionalmente, e o *Tier 3* é o método mais detalhado (IPCC, 2006a). As metodologias de cálculo das emissões de GEE e remoções de carbono no sistema foram fundamentadas no *Tier 2*.

O sistema incluiu os principais GEE emitidos durante a carbonização: metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que, posteriormente, foram convertidos à unidade padrão CO<sub>2</sub>e (dióxido de carbono equivalente), por meio da multiplicação da emissão de cada GEE pelo seu Potencial de Aquecimento Global (PAG). As emissões dos GEE foram calculadas pela combinação de informações sobre a extensão em que uma atividade humana ocorre (chamados dados de atividade) com coeficientes que quantificam as emissões ou remoções por unidade de atividade (chamados fatores de emissão) (IPCC, 2006b).

A remoção de carbono pelas florestas plantadas foi calculada a partir da demanda de madeira para a produção anual de carvão vegetal. As remoções de carbono por florestas nativas foram calculadas a partir de um incremento médio anual (IMA) de carbono (coeficiente que expressa a quantidade de carbono que foi estocado nas áreas florestadas no intervalo de um ano). Os estoques de carbono para criação desses coeficientes foram obtidos por meio de dados secundários, obtidos em revisão bibliográfica. Esses dados, quando obtidos em termos de estoque de biomassa, foram transformados em estoques de carbono pela multiplicação do fator 0,47 (IPCC, 2006c). Já as remoções de carbono pelas florestas plantadas foram estimadas em função da demanda de madeira para a produção anual de carvão vegetal.

As etapas de viabilidade econômica levaram em consideração os custos e receitas desde a obtenção de madeira até a venda do carvão. Os indicadores econômicos considerados foram o Valor Presente Líquido (VPL), Valor Periódico Equivalente (VPE), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Razão Benefício Custo (B/C).

O VPL é a diferença do valor presente das receitas e o valor presente dos custos, sendo o projeto economicamente viável quando o VPL apresenta valores positivos e quanto maior o VPL, mais atrativo o projeto (Silva et al., 2005). O VPL foi calculado pela equação:  $VPL = \sum R_j(1+i)^{-j} - \sum C_j(1+i)^{-j}$ , em que VPL = Valor Presente Líquido;  $R_j$  = valor das receitas para o período  $j$ , sendo  $j$  o período em que as receitas ocorrem;  $C_j$  = valor dos custos para o período  $j$ , sendo  $j$  o período em que os custos ocorrem;  $i$  = taxa de juros mensal, bimestral, trimestral, semestral ou anual.

O VPE transforma o valor atual do projeto ou o VPL em fluxo de receitas ou custos periódicos e contínuos, equivalente ao valor atual, durante a vida útil do projeto (Silva et al., 2005). Este critério tem a vantagem de considerar o tamanho dos projetos, podendo ser utilizado para comparar projetos de diferentes horizontes de planejamento (Silva et al., 2005). O VPE foi calculado pela equação:  $VPE = \{VPL * [(1+i)^t - 1] / [1 - (1+i)^{-nt}]\}$ , em que VPE = Valor Periódico Equivalente; VPL = Valor Presente Líquido;  $i$  = taxa de juros mensal, bimestral, trimestral, semestral ou anual;  $t$  = número de períodos de capitalização;  $n$  = número máximo de períodos, em anos.

A TIR é a taxa de desconto que iguala o VPL a zero, ou seja, o valor presente das receitas é igual ao valor presente dos custos. O projeto será viável quando a TIR for maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e o projeto mais viável economicamente é o que apresentar maior TIR (Silva et al., 2005). A TIR foi calculada pela equação:  $\sum R_j(1+TIR)^{-j} = \sum C_j(1+TIR)^{-j}$ , em que TIR = Taxa Interna de Retorno;  $R_j$  = valor das receitas para o

período  $j$ , sendo  $j$  o período em que as receitas ocorrem;  $C_j$  = valor dos custos para o período  $j$ , sendo  $j$  o período em que os custos ocorrem.

A B/C é o cálculo da razão entre o valor atual das receitas e o valor atual dos custos, sendo o projeto economicamente viável quando B/C for maior que um e quanto maior for esse valor (Silva et al., 2005). A B/C foi calculada pela equação:  $B/C = [\sum R_j(1+i)^{-j}] / [\sum C_j(1+i)^{-j}]$ , em que B/C = Razão Benefício-Custo;  $R_j$  = valor atual das receitas, sendo  $j$  o período em que as receitas ocorrem;  $C_j$  = valor atual dos custos, sendo  $j$  o período em que os custos ocorrem;  $i$  = taxa de juros mensal, bimestral, trimestral, semestral ou anual.

A metodologia utilizada na elaboração do documento-base foi validada tecnicamente por meio da verificação criteriosa e crítica por pesquisadores de áreas afins e específicas – economistas, especialistas em produção de carvão vegetal, dentre outros profissionais envolvidos. Essa validação envolveu a verificação de fórmulas, variáveis e escopo definido para as análises propostas pelo sistema.

## 2.2. Programação e validação do sistema web

A primeira fase da programação do sistema web compreendeu a gestão e o planejamento, aplicando engenharia de requisitos, garantindo que todas as informações e funcionalidades necessárias para criação do sistema fossem levantadas. Um protótipo de todo o sistema foi construído, incluindo o banco de dados, telas e interações, servindo para validar os requisitos levantados. Esse processo foi documentado na forma de diagramas, fluxogramas, mapas mentais, áudios, planilhas e documentos de texto.

A segunda fase compreendeu à modelagem e construção da arquitetura do sistema, realizada no conceito de “*Cloud Computing*”, ou seja, computação em nuvem. Os dados foram armazenados em um servidor *web*, permitindo que os usuários tenham acesso ao sistema de qualquer terminal ou dispositivo, *desktop* ou *mobile*.

A codificação, que corresponde à terceira fase, utilizou linguagens de programação *web* (Java script, angular js, HTML 5), cada uma com sua funcionalidade, chave com recursos que acompanham a tendência de mercado e conceitos modernos, visando o aumento de performance e diminuição de erros. As linguagens utilizadas em conjunto com *frameworks*, ajudam a garantir um produto de alta qualidade.

Por fim, testes de performance e de erros foram realizados, para avaliar o desempenho do sistema e comparar os resultados com os obtidos no documento-base. Nos casos em que os resultados encontrados foram divergentes daqueles do documento-base, foi feita nova conferência das fórmulas e parâmetros, busca pelos erros e atualização do sistema.

Após a programação ser finalizada, o sistema foi disponibilizado e iniciou-se a fase de manutenção. A fase de manutenção compreende: i) atendimento ao usuário, para solução de dúvidas relacionadas à utilização do sistema; ii) atualização de recursos e iii) correção de bugs. Neste sentido, o sistema precisa de acompanhamento contínuo, para garantir manutenção e adequação dos seus recursos frente ao desenvolvimento das demais tecnologias embarcadas, pois ocorre a desatualização da linguagem de programação, *frameworks*, servidores, etc.

Juntamente à fase de manutenção, analisou-se a usabilidade do sistema, definida como “medida na qual um produto pode ser usado por usuários específicos, para alcançar objetivos específicos com eficácia, eficiência e satisfação, em um contexto de uso específico” (ABNT, 2011). Para isso, o sistema foi apresentado a pesquisadores, a interessados diretos da indústria florestal e siderúrgica e à comunidade geral por meio de capacitações, minicursos e palestras. Nesses eventos, a usabilidade do sistema foi analisada por meio de *feedbacks* diretos dos usuários.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. O sistema

O sistema desenvolvido, denominado “*Charcoal System*”, é uma ferramenta inovadora. Seu *layout* foi inspirado na valorização das florestas, reforçando a importância desse componente para a mitigação das emissões de GEE (Figura 1). A sua modelagem, realizada no conceito de “*Cloud Computing*”, possui diversas vantagens, entre elas a economia de operação, a velocidade do serviço, a segurança e a acessibilidade, pois pode ser acessada por meio de qualquer dispositivo, em qualquer horário e parte do mundo (Bello et al., 2021). Isso favorece a utilização do sistema pelos diversos atores envolvidos no segmento de carvão vegetal.

A versão atual do sistema está disponível gratuitamente a todos os interessados pela URL “[www.charcoalsystem.com.br](http://www.charcoalsystem.com.br)” e pode ser acessada por qualquer dispositivo, *desktop* ou *mobile*, desde que haja conexão com a internet.



**Figura 1** – Logo *Charcoal System*.



A página inicial do *Charcoal System* (Figura 2), além dos campos para login (e-mail e senha) e da opção “Cadastrar”, contém uma breve descrição sobre o sistema, o contexto no qual foi criado, sua equipe técnica (Figura 3) e apoiadores (Figura 4).



**Figura 2** – Página inicial do *Charcoal System*.



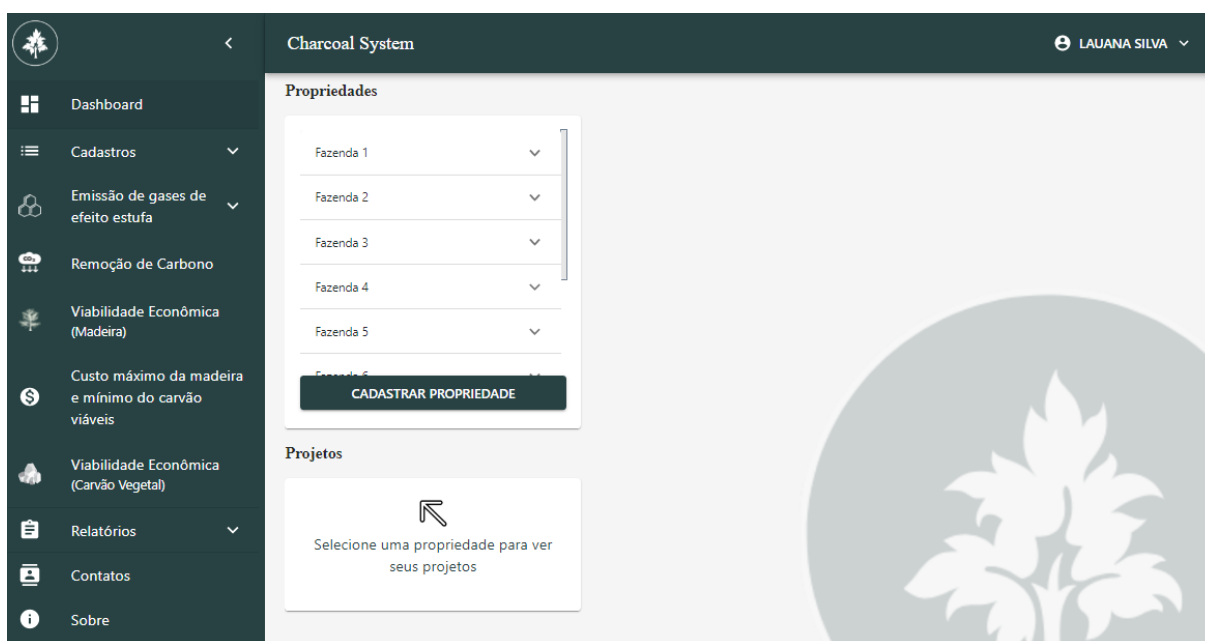
**Figura 3** – Grupos de pesquisa que compõem a equipe técnica do *Charcoal System*: Grupo de Estudos em Economia Ambiental e Manejo Florestal (GEEA); Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e Universidade Federal de Viçosa (UFV).



**Figura 4** – Apoiadores do *Charcoal System*: Projeto Siderurgia Sustentável; *Global Environment Facility* (GEF); Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD); Governo do Estado de Minas Gerais; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC); Ministério da Economia (ME); Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Governo Federal do Brasil.

Buscou-se apresentar o sistema com *layout* amigável, navegabilidade eficiente e linguagem simples e clara (Figura 5). Esses fatores podem facilitar o entendimento das etapas que compõem o sistema e auxiliar a sua utilização por usuários de todos os níveis de conhecimento do tema. Outro facilitador para a melhor interatividade do usuário com o sistema são os *pop-ups* adicionados em alguns campos, que detalham a informação que está sendo solicitada.

Por meio de feedbacks diretos dos usuários, após a apresentação do *Charcoal System* em capacitações e outros eventos, confirmou-se que a forma com que o sistema foi apresentado, seu *layout* e linguagem favorecem a utilização do sistema. Além disso, os usuários atestaram conseguir alcançar os resultados e objetivos esperados com a utilização do sistema.



**Figura 5** – *Layout* da primeira página interna do *Charcoal System*.

O sistema foi subdividido em seis etapas de coleta de dados: Cadastros, Emissão de gases de efeito estufa, Remoção de carbono, Viabilidade econômica (Madeira), Custo máximo da madeira e mínimo do carvão viáveis, Viabilidade econômica (Carvão Vegetal). As etapas foram construídas de tal forma que fossem as mais independentes possíveis. Portanto, o usuário pode obter os resultados desejados preenchendo apenas as etapas de seu interesse.

Em alguns campos das etapas de coleta de dados o usuário tem duas opções de preenchimento das informações: i) utilizar valores *default* sugeridos pelo sistema, que aparecem automaticamente nos seus respectivos campos de preenchimento, ou ii) fornecer o valor

correspondente à variável solicitada. Os valores *default* incluem valores tabelados e aplicação de fórmulas, que possuem como variável outro dado já informado pelo usuário.

Os resultados obtidos a partir das etapas de coleta de dados são apresentados em quatro relatórios: Balanço de carbono, Emissões da siderurgia pela carbonização, Obtenção de madeira e Produção de carvão vegetal.

### 3.1.1. Cadastros

O cadastramento é feito em seis níveis: Cadastro pessoal, Propriedades, Projetos, Funcionários, Equipamentos e Máquinas. O cadastro pessoal é o primeiro a ser realizado e é o que possibilita que o usuário faça *login* e utilize o *Charcoal System*. Em todos os níveis, exceto nesse, o usuário pode cadastrar quantos itens desejar.

Os cadastros das propriedades e projetos permitem que um mesmo usuário realize os cálculos para diversas propriedades e para projetos com diferentes características. O cadastro dos funcionários, equipamentos e máquinas permite que o usuário utilize os mesmos dados desses itens em diferentes simulações.

O cadastro de propriedades é feito por meio de informações básicas em relação ao tamanho e localização da propriedade rural. O cadastro do projeto contém informações mais específicas quanto às características da carbonização e dos fornos. As informações solicitadas são: i) tipo de fornos (circular, fornos de encosta, “rabo-quente”, retangular e outro); ii) quantidade de fornos; iii) tamanho dos fornos (no caso de fornos tipo “circular” e “retangular”); iv) se o monitoramento da temperatura de carbonização é realizado com ferramenta (auxílio de algum instrumento para medição da temperatura) ou sem ferramenta (método empírico); v) tipo de ferramenta para monitoramento da temperatura de carbonização (pirometria ou sistema supervisorio); vi) se há queimador de gases; vii) o tipo de queimador se gases (contínuo ou não-contínuo), quando existente, e viii) o percentual de queima dos gases, quando ocorre.

A diferença entre os tipos de queimadores de gases (contínuo ou não-contínuo) se refere à quantidade, em percentual, do CH<sub>4</sub> que sofre combustão, de acordo com a disponibilidade contínua ou não desse gás para a queima. O sistema fornece os valores default de 80% de queima dos gases para queimadores contínuos e 50% para queimadores não-contínuos (valores baseados na metodologia ACM0001 do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL; UN, 2018b).

O cadastro dos funcionários considera dois tipos de contratação da mão de obra: “Trabalhador eventual” e “Trabalhador fixo”, sendo possível o cadastramento simultâneo de diversos funcionários nas duas opções de contratação. Os trabalhadores eventuais são aqueles

contratados por curtos períodos de tempo. As informações solicitadas para cada trabalhador são: i) o ano de contratação; ii) a jornada de trabalho, em horas, dias ou semanas; e iii) o pagamento, em R\$ hora<sup>-1</sup>, R\$ dia<sup>-1</sup> ou R\$ semana<sup>-1</sup>. A partir disso, é calculado o custo total com cada trabalhador no(s) ano(s) de sua contratação.

No caso de trabalhadores fixos, que são aqueles contratados com carteira assinada, são necessárias informações quanto ao salário, encargos trabalhistas e equipamentos de proteção individual (EPI) relacionados a cada funcionário. Estas informações serão os *inputs* para o cálculo do custo total de cada funcionário fixo, que será considerado em todo o horizonte de planejamento do projeto, nas etapas de viabilidade econômica. O custo anual com cada funcionário fixo é estimado pela equação:  $CT_{\text{trab.fixo}i} = \{\text{Sal.} * [(1 + \text{Enc.}) / 100] + \sum \text{EPI}_i$ , em que  $CT_{\text{trab.fixo}i}$  = custo total com um trabalhador fixo no ano  $i$ , sendo  $i = 0, 1, 2, \dots, i$ ; Sal. = salário de um trabalhador fixo, em R\$ mês<sup>-1</sup>; Enc. = encargos relacionados a um trabalhador fixo, em %;  $\text{EPI}_i$  = gastos com EPI para um trabalhador fixo no ano  $i$ , em R\$, sendo  $i = 0, 1, 2, \dots, i$ .

O cadastro de cada equipamento e máquina é realizado com as informações: i) ano(s) de uso; ii) valor de aquisição, em R\$; iii) valor no final da vida útil, em R\$; e iv) a vida útil, em anos. Por meio dessas informações, a depreciação anual será calculada a fim de estimar o custo anual de utilização de cada equipamento e máquina. A depreciação anual é calculada pela equação:  $D_j = (VA_j - VF_j) / VU_j$ , em que  $D_j$  = depreciação anual do equipamento ou máquina  $j$ ;  $VA_j$  = valor de aquisição do equipamento ou máquina  $j$ , em R\$;  $VF_j$  = valor no final da vida útil do equipamento ou máquina  $j$ , em R\$;  $VU_j$  = vida útil do equipamento ou máquina  $j$ , em anos (Silva et al., 2005). O custo anual de utilização de cada equipamento e máquina é estimado pela equação:  $CT_j = (VA_j * i) + D_j$ , em que  $CT_j$  = custo anual de utilização do equipamento ou máquina  $j$ , em R\$;  $VA_j$  = valor de aquisição do equipamento ou máquina  $j$ , em R\$;  $i$  = taxa de juros, em %;  $D_j$  = depreciação anual do equipamento ou máquina  $j$  (adaptado de Silva et al., 2005). Esses custos também serão considerados nas etapas de viabilidade econômica.

### 3.1.2. Emissão de gases de efeito estufa

A coleta de dados para o cálculo das emissões de GEE é subdividida em Madeira e Carvão Vegetal. Além das emissões de GEE, as informações solicitadas nestas subetapas também são utilizadas para estimar a quantidade total de madeira enforada, a produção total de carvão vegetal e a produção de coprodutos (atiços e finos).

A emissão de CH<sub>4</sub> pela carbonização foi estimada pela equação:  $E_{\text{CH}_4} = FE_{\text{CH}_4} * P_{\text{total}} * (1 - Q)$ , em que  $E_{\text{CH}_4}$  = emissão de CH<sub>4</sub> pela carbonização, em MgCH<sub>4</sub> ano<sup>-1</sup>;

$FE_{CH_4}$  = fator de emissão para carbonização, em  $MgCH_4 MgCarvãoVegetal^{-1}$ ;  $P_{total}$  = produção total de carvão, em  $Mg\ ano^{-1}$ ;  $Q$  = percentual de queima dos gases. O fator de emissão de  $CH_4$  para o processo de carbonização foi estimado por meio da equação:  $FE_{CH_4} = (217,12 - (534,76 * RG)) / 1000$ , em que  $FE_{CH_4}$  = fator de emissão de  $CH_4$  para carbonização, em  $MgCH_4 MgCarvãoVegetal^{-1}$ ;  $RG$  = rendimento gravimétrico, em  $MgCarvãoVegetal MgMadeira^{-1}$ , base seca (UN, 2010).

A emissão de  $CO_2$  pela carbonização sem a queima dos gases foi estimada pela equação:  $E_{CO_2sc} = (FE_{CO_2} * M) / 1000$ , em que  $E_{CO_2sc}$  = emissão de  $CO_2$  pela carbonização sem combustão dos gases, em  $MgCO_2e\ ano^{-1}$ ;  $FE_{CO_2}$  = fator de emissão de  $CO_2$  para carbonização, em  $kgCO_2 MgMadeira^{-1}$ ;  $M$  = total de madeira enfiada, em  $Mg\ ano^{-1}$ . O fator de emissão de  $CO_2$  foi estimado por meio de equação:  $FE_{CO_2} = 114,165574 - (0,025565 * TU) + (0,027518 * TU^2)$ , em que  $FE_{CO_2}$  = fator de emissão de  $CO_2$  para carbonização, em  $kgCO_2 MgMadeira^{-1}$ ;  $TU$ : centro de classe do teor de umidade da madeira enfiada, em % (Tabela 1) (Canal et al., 2016).

A emissão de  $CO_2$  sofre influência da combustão dos gases da carbonização (Cardoso, 2010, Coelho, 2013, Donato, 2017). Por exemplo, a queima do  $CH_4$  causa a dissociação de sua molécula, que se oxida, liberando  $CO_2$  e água. Portanto, para a estimativa da emissão de  $CO_2$  nestes casos, deve-se: i) quantificar a emissão de  $CO_2$  sem a combustão dos gases; ii) acrescentar a quantidade de  $CO_2$  emitida pela queima dos gases, resultando na equação:  $E_{CO_2cc} = [(FE_{CO_2} * M) / 1000] * (1 + 0,8993)$ , em que  $E_{CO_2cc}$  = emissão de  $CO_2$  pela carbonização com combustão dos gases, em  $MgCO_2e\ ano^{-1}$ ;  $FE_{CO_2}$  = fator de emissão de  $CO_2$  para carbonização, em  $kgCO_2 MgMadeira^{-1}$ ;  $M$  = total de madeira enfiada, em  $Mg\ ano^{-1}$ ; 0,8993 = variação da quantidade de  $CO_2$  emitida entre a carbonização sem e com a queima dos gases (Coelho, 2013).

A emissão total de GEE pela carbonização foi calculada em termos de  $CO_2e$ , pela equação:  $E_{CO_2e} = \sum(E_i * PAG_i)$ , em que  $E_{CO_2e}$  = emissão total de GEE pela carbonização, em  $MgCO_2e\ ano^{-1}$ ;  $E_i$  = emissão do GEE  $i$ , sendo  $i = CH_4$  e  $CO_2$ , em  $MgGEE\ ano^{-1}$ ;  $PAG_i$  = Potencial de Aquecimento Global do GEE  $i$ , sendo  $PAG_{CH_4} = 25$  e  $PAG_{CO_2} = 1$  (IPCC, 2007<sup>1</sup>).

### 3.1.2.1. Madeira

As informações relacionadas à qualidade e quantidade de madeira consumida são: material genético, teor de umidade base seca ( $U\%$ ), densidade básica, fator de empilhamento e quantidade de madeira enfiada por ciclo. O campo “Material genético” é preenchido por

<sup>1</sup>A ferramenta foi finalizada no ano de 2020. A atualização dos potenciais de aquecimento global feita em 2021 (IPCC, 2021b) não pôde ser contemplada no desenvolvimento do *Charcoal System*.

meio de seleção em lista, que abrange diversas espécies, híbridos, clones (Tabela 2) e a opção “Outro”, caso o material genético utilizado não conste na lista.

A umidade base seca da madeira também é selecionada em lista e abrange quatro faixas, definidas de acordo com as recomendações da DN 227/2018 (Minas Gerais, 2018). O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> necessita de um valor único de umidade e, para isso, utiliza-se o centro de classe do teor de umidade (Tabela 1).

**Tabela 1** – Faixas do teor de umidade base seca (U%), em %, e centro de classe do teor de umidade base seca da madeira (Centro de classe), em %, considerados no sistema

U%	Centro de classe
< 30	28,0
31 – 35	33,0
36 – 40	38,0
> 41	43,0

Fonte: a autora

O sistema fornece valores default de densidade básica da madeira, em kg m<sup>-3</sup>, de acordo com o material genético selecionado. A densidade básica da madeira, pré-definida para cada material genético, foi obtida por levantamento bibliográfico, considerando a idade entre 6 e 8 anos (Tabela 2). Nos casos em que o material genético utilizado não estiver contemplado na lista de seleção do campo “Material genético”, a densidade básica da madeira deverá, obrigatoriamente, ser fornecida pelo usuário do sistema.

A quantidade de madeira consumida na produção de carvão vegetal deve ser informada pelo usuário do sistema, em m<sup>3</sup> forno<sup>-1</sup> ou st forno<sup>-1</sup>. Quando o dado for informado em metro estéreo de madeira por forno (st forno<sup>-1</sup>) será transformado em m<sup>3</sup> forno<sup>-1</sup>, por meio da multiplicação pelo fator de empilhamento (relação m<sup>3</sup> st<sup>-1</sup>), que também deve ser informado pelo usuário.

**Tabela 2** – Densidade básica (DB), em kg m<sup>-3</sup>, por material genético

<b>Material genético</b>	<b>DB</b>	<b>Fonte</b>
Clone 3336 ( <i>E. urophylla</i> )	494,7	Reis et al., 2012a
Clone A08 ( <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> )	530,0	Arruda et al., 2011
Clone GG 100 ( <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> )	520,0	Castro et al., 2013
Clone GG 157 ( <i>E. urophylla</i> )	540,0	Castro et al., 2013
Clone GG 3119 ( <i>E. camaldulensis</i> )	570,0	Castro et al., 2013
Clone GG 3192 ( <i>E. urophylla</i> )	550,0	Castro et al., 2013
Clone GG 3370 ( <i>E. grandis</i> )	570,0	Castro et al., 2013
Clone GG 3403 ( <i>E. urophylla</i> )	550,0	Castro et al., 2013
Clone GG 3520 ( <i>E. urophylla</i> )	590,0	Castro et al., 2013
Clone GG 3616 ( <i>E. camaldulensis</i> )	530,0	Castro et al., 2013
Clone GG 680 ( <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> )	560,0	Castro et al., 2013
<i>E. camaldulensis</i>	600,6	Pereira, 2012; Teixeira, 2018
<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> x <i>E. sp.</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. cloeziana</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. grandis</i>	559,4	Teixeira, 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	558,7	Teixeira, 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. spp.</i>	596,1	Teixeira, 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	566,2	Teixeira, 2018
<i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>	591,6	Teixeira, 2018
<i>E. resinifera</i> x <i>E. grandis</i>	570,2	Teixeira, 2018
<i>E. urophylla</i>	573,1	Pereira, 2012; Teixeira, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> x <i>E. globulus</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> x <i>E. maidenii</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> x <i>E. sp.</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	577,0	Teixeira, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. maidenii</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i> x <i>E. sp.</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. sp.</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. sp.</i> x <i>E. globulus</i>	560,0	Fialho, 2018
<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	557,2	Teixeira, 2018
Híbrido de <i>E. grandis</i>	577,0	Pereira, 2012
Híbrido de <i>E. urophylla</i>	546,5	Pereira, 2012

### 3.1.2.2. Carvão vegetal

O sistema inclui variáveis relacionadas à carbonização e ao carvão vegetal, que se referem à produção, qualidade, rendimento volumétrico (RV), rendimento gravimétrico (RG) e geração de coprodutos.

A produtividade média dos fornos (em ciclos mês<sup>-1</sup>) é estimada pela equação:  $NC = (30 - NDI) / C_{Carb}$ , em que NC = produtividade média dos fornos, em ciclos mês<sup>-1</sup>; 30 = dias do mês;

NDI = período de inatividade, em dias  $\text{mês}^{-1}$ ;  $C_{\text{carb}}$  = duração média do ciclo de carbonização, em dias. O ciclo de carbonização compreende as etapas de enchimento dos fornos, carbonização, resfriamento e descarga dos fornos. O período de inatividade corresponde ao tempo em que os fornos não estão em funcionamento, como, por exemplo, os períodos de limpeza e manutenção dos fornos; o intervalo de tempo entre o fim do descarregamento e o início do próximo enchimento; e os períodos inativos devido às chuvas. Ambas informações devem ser informadas pelo usuário do sistema

A estimativa da produção anual de carvão vegetal considerou a diferença de produção nas estações seca e chuvosa. Portanto, é necessário informar o período útil de utilização dos fornos, em meses por ano, em cada estação. A produção por ciclo, em metros de carvão vegetal por forno ( $\text{mdc forno}^{-1}$ ), na estação seca também deve ser informada pelo usuário do sistema. A produção por ciclo, em  $\text{mdc forno}^{-1}$ , na estação chuvosa é considerada como 75% (informação pessoal<sup>2</sup>) da produção na estação seca.

A partir dessas informações estima-se a produção anual de carvão vegetal pela equação:  $P_{\text{totalmdc}} = \sum (P_{\text{ciclo}i} * NC * PU_{\text{forno}i} * N)$ , em que  $P_{\text{totalmdc}}$  = produção total de carvão vegetal, em  $\text{mdc ano}^{-1}$ ;  $P_{\text{ciclo}i}$ : produção por ciclo na estação  $i$ , sendo  $i$  = chuvosa e seca, em  $\text{mdc forno}^{-1}$ ;  $NC$ : número de ciclos de carbonização, em  $\text{ciclos mês}^{-1}$ ;  $PU_{\text{forno}i}$ : período útil de utilização do forno na estação  $i$ , sendo  $i$  = chuvosa e seca, em  $\text{meses ano}^{-1}$ ;  $N$ : quantidade de fornos. No sistema também há a conversão dos resultados em  $\text{mdc}$  para Megagramas (Mg), pela equação:  $P_{\text{totalMg}} = (\text{mdc} * d_{\text{carvão}}) / 1000$ , em que  $P_{\text{totalMg}}$  = produção total de carvão vegetal, em  $\text{Mg ano}^{-1}$ ;  $\text{mdc}$  = produção total de carvão vegetal, em  $\text{mdc ano}^{-1}$ ;  $d_{\text{carvão}}$  = densidade à granel do carvão vegetal, em  $\text{kg mdc}^{-1}$ .

A densidade à granel e o teor de carbono fixo são os parâmetros de qualidade do carvão vegetal considerados no sistema. A densidade à granel do carvão vegetal, em  $\text{kg mdc}^{-1}$ , é estimada pelo sistema como sendo 39,9% da densidade básica da madeira (em  $\text{kg m}^{-3}$ ) que lhe deu origem (Apêndice A). O teor de carbono fixo possui o valor default de 75,3% (Apêndice B). Ambas informações podem ser editadas pelo usuário do sistema.

O rendimento volumétrico (RV) pode ser informado pelo usuário ou estimado pelo sistema. Para a estimativa do RV pelo sistema, o usuário deve informar a unidade em que deseja o resultado dessa variável –  $\text{m}^3 \text{mdc}^{-1}$  ou  $\text{st mdc}^{-1}$ . A estimativa do RV é realizada pela equação:  $RV = M / P_{\text{totalmdc}}$ , em que  $RV$  = rendimento volumétrico, em  $\text{m}^3 \text{mdc}^{-1}$  ou  $\text{st mdc}^{-1}$ ;  $M$  = total de madeira enfiada, em  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  ou  $\text{st ano}^{-1}$ ;  $P_{\text{totalmdc}}$  = produção total de carvão vegetal, em  $\text{mdc ano}^{-1}$ .

<sup>2</sup>Dado fornecido pelo especialista em produção de carvão vegetal, João Cancio de Andrade Araújo, durante entrevista exploratória.



O rendimento gravimétrico (RG) pode ser obtido de três formas: i) informado pelo usuário; ii) estimado pela equação:  $RG=(P_{total}/M)*100$ , em que RG = rendimento gravimétrico, em %;  $P_{total}$  = produção total de carvão vegetal, em Mg ano<sup>-1</sup>; M = total de madeira enforada, em Mg ano<sup>-1</sup>; iii) valor default (Tabela 3).

**Tabela 3** – Rendimento gravimétrico médio (RG), em %, por tipo de forno, forma do monitoramento da temperatura de carbonização (MTC) e faixa do teor de umidade da madeira, base seca (TU)

Tipo de forno	MTC	TU	RG
Circular	Sem ferramenta	< 30	34,0
		31 - 35	32,0
		36 - 40	30,0
		> 41	28,0
	Com ferramenta	< 30	36,0
		31 - 35	34,0
		36 - 40	32,0
		> 41	30,0
Retangular	Sem ferramenta	< 30	34,0
		31 - 35	32,0
		36 - 40	30,0
		> 41	28,0
	Com ferramenta	< 30	36,0
		31 - 35	34,0
		36 - 40	32,0
		> 41	30,0
Encosta	Sem ferramenta	< 30	34,0
		31 - 35	32,0
		36 - 40	30,0
		> 41	28,0

Fonte: adaptado de CGEE, 2015; informação pessoal<sup>3</sup>

Os atíços (madeira parcialmente carbonizada) e os finos (carvão vegetal com granulometria inferior a 12,7 mm) (Oliveira et al., 2013) são os coprodutos da carbonização considerados no sistema. O sistema fornece valores default do percentual de geração dos coprodutos em relação à quantidade total de madeira enforada (Tabela 4), mas permite que o usuário altere esses valores.

<sup>3</sup>Valores médios da base de dados do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), fornecidos pela professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

**Tabela 4** – Geração de coprodutos em relação à quantidade total de madeira enforcada, em %, por operação na produção de carvão vegetal

Coproduto	Operações	%	Fonte
Atiços	-	4,05	Cardoso et al., 2010
Finos (moinha)	Unidade de produção de carvão vegetal (UPC) – forno	3,7	Oliveira, 1977
	Carregamento e transporte	5,3	Oliveira, 1977
	Peneiramento	9,7	Oliveira, 1977

### 3.1.3. Remoção de carbono

As remoções de carbono pelas florestas plantadas e nativas foram consideradas no cálculo do balanço de carbono. A remoção de carbono pelas florestas plantadas foi considerada igual ao estoque de carbono na madeira consumida na produção de carvão vegetal. A área de florestas plantadas considerada para estimar a remoção de carbono foi calculada pela equação:  $A_{FP}=M/P_{total}$ , em que  $A_{FP}$  = área de floresta plantada que deve ser colhida para atender à demanda anual de madeira, em ha ano<sup>-1</sup>; M = total de madeira enforcada, em m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>, st ano<sup>-1</sup> ou Mg ano<sup>-1</sup>;  $P_{total}$  = total de madeira na idade de corte, em m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, st ha<sup>-1</sup> ou Mg ha<sup>-1</sup>. O total de madeira na idade de corte deve ser informado pelo usuário do sistema.

A partir da área demandada, calcula-se a remoção de carbono, transformando-a também para a unidade padrão CO<sub>2</sub>e, pela equação  $R_{FP}=A_{FP}*P*0,47*(44/12)$ , em que  $R_{FP}$  = remoção de carbono pelas florestas plantadas, em MgCO<sub>2</sub> ano<sup>-1</sup>;  $A_{FP}$  = área de floresta plantada que deve ser colhida para atender à demanda anual de madeira, em ha ano<sup>-1</sup>; P = total de madeira na idade de corte, em Mg ha<sup>-1</sup>; 0,47 = conteúdo de carbono na biomassa (IPCC, 2006c); 44/12 = fator de conversão de C para CO<sub>2</sub>.

O Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012) estabelece que as propriedades rurais com plantios de florestas comerciais devem possuir áreas de florestas nativas (Reserva Legal (RL) e Área de Preservação Permanente (APP)). O percentual de RL presente na propriedade depende da localização da propriedade, da situação do imóvel (em caso de propriedades localizadas na Amazônia Legal) e do bioma em que a propriedade está inserida (Brasil, 2012).

A remoção de carbono pelas florestas nativas foi estimada pela equação:  $R_{FN}=A_{FN}*I_{FN}*(44/12)$ , em que  $R_{FN}$  = remoção de carbono pelas florestas nativas, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>;  $A_{FN}$  = área de florestas nativas, em ha;  $I_{FN}$  = incremento médio anual de carbono para a área de floresta nativa, em MgC ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; 44/12 = fator de conversão de C para CO<sub>2</sub>. As áreas de florestas nativas (RL e APP) consideradas para a estimativa de remoção de carbono foram estabelecidas proporcionalmente às áreas de florestas plantadas e não em relação à área total da propriedade, pela equação:  $A_{FN}=(A_{FP}*RL)+[(APP*A_{FP})/AP]$ , em que  $A_{FN}$  = área de florestas

nativas, em ha;  $A_{FP}$  = área de floresta plantada que deve ser colhida para atender à demanda anual de madeira, em  $ha\ ano^{-1}$ ; RL = percentual exigido de área de reserva legal na propriedade, em %; APP = Área de Preservação Permanente presente na propriedade, em ha; AP = área total da propriedade, em ha.

O incremento médio anual de carbono varia em função do bioma brasileiro em que a floresta está localizada e da idade da floresta (Tabela 5), informações que também devem ser fornecidas pelo usuário do sistema.

**Tabela 5** – Incremento médio anual de carbono (IMAC), em  $MgC\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ , para áreas de florestas nativas em diferentes biomas brasileiros e idades, em anos

<b>Bioma</b>	<b>Idade</b>	<b>IMAC*</b>	<b>Fonte</b>
Amazônia	$\leq 2$	12,014	Alves et al., 1997
	$2 < idade \leq 5$	5,780	Alves et al., 1997; Rodrigues et al., 2000; Salomão, 1994; Salomão et al., 1998 apud Lopes, 2011
	$5 < idade \leq 10$	3,830	Alves et al., 1997; Salomão, 1994; Salomão et al., 1998 apud Lopes, 2011
	$10 < idade \leq 15$	4,283	Adaptado de Silva, 2007; Alves et al., 1997
	$15 < idade \leq 20$	5,657	Alves et al., 1997; Salomão, 1994; Salomão et al., 1998 apud Lopes, 2011
	$> 20$	2,422	Adaptado de Silva, 2007
	Primária recém manejada	1,945	Silva, 2007
Caatinga	$\leq 10$	3,052	Adaptado de Souza et al., 2012; Grace et al., 1995; Higuchi et al., 2004; Phillips et al., 1998
	$> 10$	0,458	Sampaio et al., 1998
Cerrado	-	1,033	Adaptado de Costa, 2013
Mata Atlântica	$\leq 10$	4,753	Melo e Durigan, 2006
	$10 < idade \leq 20$	3,680	Azevedo, 2012; Ferez et al., 2015; Melo e Durigan, 2006
	$20 < idade \leq 30$	2,320	Faria, 2012; Melo e Durigan, 2006
	$> 30$	1,741	Melo e Durigan, 2006; Ribeiro, 2007
Pampa	-	1,279	Adaptado de Tanizaki, 2000 apud Santos et al., 2009; Coutinho, 2009; Cunha et al., 2009; Ribeiro, 2007; Santos et al., 2009
Pantanal	-	1,756	Adaptado de Brun, 2004
			Schöngart et al., 2011; Stape et al., 2011

\*Valores médios da parte aérea

Apesar da remoção de carbono pelas florestas ser estimada e inclusa no balanço de carbono, as emissões relacionadas ao manejo dessas florestas e ao transporte da madeira até o pátio de carbonização não foram consideradas, pois estão fora do limite definido.

### 3.1.4. Viabilidade econômica (Madeira)

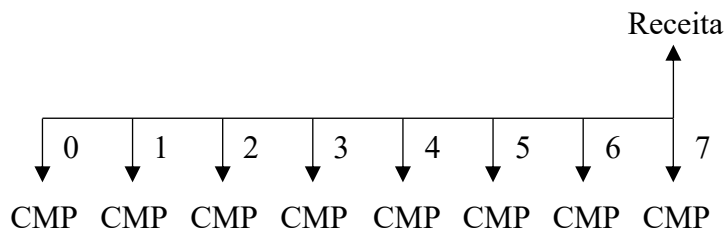
O sistema contempla três possibilidades de obtenção da madeira: “Compra”, “Plantio próprio” e “Compra e plantio próprio”. A compra de madeira envolve, ainda, as opções de compra de madeira em pé ou no pátio. Os indicadores de viabilidade econômica não são calculados quando a opção “Compra” é selecionada, uma vez que essa atividade não envolve receitas. Nesse caso, os dados solicitados são o ano de compra de madeira, a quantidade (em  $m^3$ , st ou Mg), o preço médio pago por unidade (em R\$) e os custos de colheita e de transporte/frete (em reais), sendo os dois últimos considerados quando a madeira é comprada “em pé”. Os resultados gerados são a quantidade total de madeira comprada e o custo médio para compra.

Os indicadores de viabilidade econômica são calculados quando a madeira é obtida por meio de “Plantio próprio”. Os regimes de corte considerados no sistema são: “Primeiro corte (alto fuste)”; “Talhadia” (condução da brotação); “Primeiro e segundo cortes (alto fuste e talhadia)” e “Reforma (novo plantio)”. Além dessa informação, o usuário deve fornecer o ano de início e final do projeto, a TMA e outras taxas envolvidas na produção florestal.

A entrada de dados dos custos e receitas relacionados ao plantio próprio pode ocorrer de três formas: “Valor fixo único”, “Valor fixo por etapa” ou “Valores discriminados”, que se distinguem pelo nível de detalhamento das informações solicitadas. Ao escolher uma das opções, o usuário deve preencher todos os dados solicitados nessa alternativa e exclui a possibilidade de preencher algum dado nas demais.

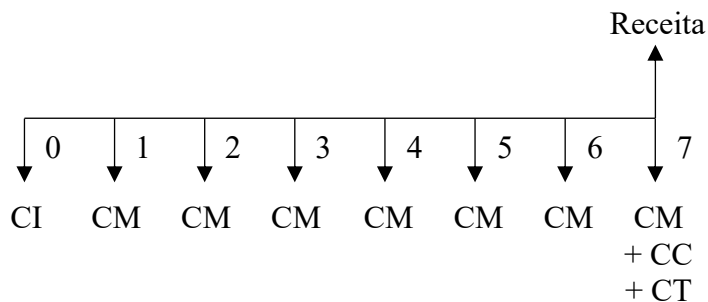
Quando o regime de corte selecionado for “Primeiro e segundo cortes (alto fuste e talhadia)” a entrada de dados pode ocorrer apenas pela opção “Valores discriminados”. Para os demais regimes de corte, a entrada de dados pode ocorrer das três formas descritas.

Os dados solicitados na opção “Valor fixo único” são a produção total de madeira na idade de corte, em  $m^3 ha^{-1}$ , st  $ha^{-1}$  ou Mg  $ha^{-1}$ ; a área plantada e colhida, em ha, que pode ou não ser igual à área estimada pelo sistema; a idade de corte do plantio, em anos; o custo médio de produção da madeira, em R\$  $m^{-3}$ , R\$ st $^{-1}$  ou R\$ Mg $^{-1}$ ; e o preço médio de venda da madeira, em R\$  $m^{-3}$ , R\$ st $^{-1}$  ou R\$ Mg $^{-1}$ . Nessa opção, o custo médio de produção da madeira – incluindo custos de implantação, manutenção, colheita e transporte – será o mesmo em todo o horizonte de planejamento do projeto. Por exemplo: considerando o regime de corte “Primeiro corte (alto fuste)” e a idade de corte do plantio de 7 anos, o custo médio de produção será considerado do ano 0 ao ano 7, e as receitas pela produção da madeira serão consideradas no ano 7 (Figura 6).



**Figura 6** – Fluxo de caixa para obtenção de madeira por meio de plantio próprio, com forma de obtenção dos dados “Valor fixo único”. CMP: custo médio de produção.

A entrada de dados por “Valor fixo por etapa” tem os custos de produção da madeira subdivididos em: “Plantio”, “Manutenção”, “Colheita” e “Transporte”. Os dados solicitados são o custo médio de implantação do plantio, R\$ ha<sup>-1</sup>; custo médio para manutenção, em R\$ ha<sup>-1</sup>; custo médio de colheita, em R\$ ha<sup>-1</sup>; custo médio do transporte da madeira, em R\$ (unidade de madeira produzida)<sup>-1</sup>; e o preço médio de venda da madeira, em R\$ m<sup>-3</sup>, R\$ st<sup>-1</sup> ou R\$ Mg<sup>-1</sup>. Os custos anuais de produção se diferenciarão ao longo do horizonte de planejamento (Figura 7).



**Figura 7** – Fluxo de caixa para obtenção de madeira por meio de plantio próprio, considerando o regime de corte “Primeiro corte (alto fuste)” e idade de corte do plantio de 7 anos, com forma de obtenção dos dados “Valor fixo por etapa”. CI: custo de implantação do plantio; CM: custo de manutenção do plantio; CC: custo de colheita; CT: custo de transporte.

A opção “Valores discriminados” é a de maior nível de detalhamento da coleta de dados, e é subdividida em: Custos (Insumos, Mão de obra, Máquinas e equipamentos, Utilização da terra) e Receitas. Nessa opção, além desses custos, considera-se o valor referente à taxa administrativa, calculado em relação à soma dos outros custos e considerada em todo o horizonte de planejamento.

Os insumos utilizados em cada uma das fases de manejo do plantio (implantação, manutenção, colheita e transporte) devem ser informados, juntamente com as informações: i) ano em que o insumo foi adquirido; ii) quantidade adquirida; e iii) valor pago por unidade adquirida, em R\$ unidade<sup>-1</sup>.

Nas etapas de “Mão de obra” e “Máquinas e equipamentos” o usuário deve apenas selecionar aqueles funcionários, equipamentos e máquinas que fazem parte do projeto em questão, uma vez que já foram cadastrados. O cálculo dos indicadores de viabilidade econômica considera o custo total anual com cada funcionário (incluindo salário, encargos trabalhistas e EPI) e o custo de utilização anual de cada equipamento e máquina.

O custo de oportunidade da terra também é considerado no escopo do *Charcoal System* e é estimado pela equação:  $C_{\text{terra}} = AT * PMT * i$ , em que  $C_{\text{terra}}$  = custo anual de utilização da terra, em R\$; AT = área total, em ha; PMT = preço médio da terra na região, em R\$ ha<sup>-1</sup>;  $i$  = taxa de juros, em %. A área total é a soma das áreas das florestas plantadas, das florestas nativas (obtida na etapa de Remoção de carbono) e das áreas de manutenção.

A área do plantio pode ser estimada pelo sistema por meio da demanda de madeira (dado obtido na etapa de Emissão de GEE) e do total de madeira na idade de corte (dado informado pelo usuário em m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, st ha<sup>-1</sup> ou Mg ha<sup>-1</sup>), ou informada diretamente pelo usuário. A estimativa da área plantada só poderá ser realizada caso o usuário do sistema tenha preenchido as etapas relacionadas ao balanço de carbono. As áreas de manutenção dizem respeito à área destinada às estradas, pátios de estocagem, entre outras necessárias em plantios florestais.

As receitas relacionadas à produção e venda da madeira foram consideradas no(s) ano(s) correspondente(s) à idade de corte, e estimadas pela multiplicação da produção total de madeira e o preço médio de venda da madeira. A produção total de madeira foi estimada com base nas informações obtidas na etapa anterior (Utilização da terra). O preço médio de venda da madeira deve ser informado pelo usuário.

Caso a obtenção de madeira ocorra por “Compra e plantio próprio”, o usuário do sistema deverá preencher as etapas de ambos os casos. Da mesma forma, os indicadores de viabilidade econômica serão calculados apenas para o plantio próprio. Além dos resultados individuais de cada uma das opções (“Compra” e “Plantio próprio”), o sistema gera os resultados: total de madeira obtida, por compra e plantio próprio, e o preço médio de obtenção da madeira.

### **3.1.5. Custo máximo da madeira e mínimo do carvão viáveis**

A próxima etapa do *Charcoal System* simula: i) qual deveria ser o custo máximo de produção da madeira, do plantio até o transporte, para que o projeto de produção de madeira para carbonização seja viável; e ii) preço mínimo de venda do carvão vegetal para que o projeto

seja viável. Os dados solicitados nessa etapa são o custo de produção, custo do frete e o preço do carvão vegetal, em R\$ mdc<sup>-1</sup>.

### 3.1.6. Viabilidade econômica (Carvão Vegetal)

Os custos de produção considerados para a análise de viabilidade econômica da produção de carvão vegetal são relacionados à obtenção de madeira, à construção e manutenção dos fornos, fornalha e demais infraestruturas e ao frete para transporte do carvão. Já as receitas consideradas são aquelas advindas da venda do carvão vegetal.

A quantidade e os custos de obtenção da madeira por plantio próprio e compra (se houver) são obtidos das etapas de “Emissão de GEE” e “Viabilidade econômica (Madeira)”, tornando essa etapa dependente das anteriores. Os demais custos podem ser fornecidos por “Valor fixo por etapa” ou “Valores discriminados”, de forma semelhante à etapa de viabilidade econômica da obtenção de madeira.

Na opção “Valor fixo por etapa” o horizonte de planejamento do projeto é igual à vida útil dos fornos. Os dados solicitados nessa etapa são subdivididos em: Fornos, Infraestrutura, Frete e Fornalha (este último só é considerado caso a produção seja feita com a queima dos gases da carbonização). Em cada uma das subdivisões os valores inseridos devem incluir os gastos com insumos, mão de obra, taxas e todos os demais referentes à construção e manutenção anual de cada estrutura. Por exemplo, o custo de manutenção anual dos fornos deve incluir todos os custos de produção do carvão vegetal, inclusive com mão de obra e reparos.

O custo total de construção das estruturas (fornos, fornalhas e demais infraestruturas) é considerado no ano 0 do horizonte de planejamento. O custo total anual de manutenção das estruturas (fornos, fornalhas e demais infraestruturas) será considerado do ano 1 ao final do horizonte de planejamento. Além dos custos de construção e manutenção, o sistema também considera a depreciação das estruturas (fornos, fornalhas e demais infraestruturas), que também será considerada do ano 1 ao final do horizonte de planejamento do projeto. Como não há valor residual estimado, a depreciação é estimada pela equação:  $D_i = CC_i / VU_i$ , em que  $D_i$  = depreciação anual da estrutura  $i$ , sendo  $i$  = fornos, fornalhas e demais infraestruturas, em R\$;  $CC_i$  = custo total de construção da estrutura  $i$ , sendo  $i$  = fornos, fornalhas e demais infraestruturas, em R\$;  $VU_i$  = vida útil da estrutura  $i$ , sendo  $i$  = fornos, fornalhas e demais infraestruturas, em anos.

O custo total de construção dos fornos e fornalhas será calculado pelo produto dos seus respectivos custos médios de construção e a quantidade de cada estrutura. Os custos anuais de

manutenção dessas estruturas serão calculados de forma semelhante. Porém, os custos para construção e manutenção das demais infraestruturas, será estimado em relação ao custo total de construção e manutenção dos fornos. O sistema possui o valor default de 70% (informação pessoal<sup>4</sup>).

Usualmente, o custo do frete do carvão vegetal até o consumidor também é responsabilidade do produtor. Neste caso, o usuário do sistema deve fornecer o custo médio, em R\$ mdc<sup>-1</sup> ou R\$ t<sup>-1</sup>. O custo total do frete será estimado pelo produto do custo médio do frete e a quantidade de carvão vegetal vendido em cada ano (dado obtido posteriormente, na etapa “Receitas”).

A opção “Valores discriminados” é subdividida em: Custos (Insumos, Mão de obra, Máquinas e equipamentos, Utilização da terra e frete) e Receitas; e também considera o custo referente à taxa administrativa, calculado em relação à soma dos outros custos. A entrada de dados nas etapas Insumos, Mão de obra e Máquinas e equipamentos é semelhante àquela da fase de viabilidade econômica do plantio próprio.

O custo anual de utilização da terra considera a área da Unidade de Produção de Carvão Vegetal (UPC) e é calculada pela equação:  $C_{\text{terra}} = AT * PMT * i$ , em que  $C_{\text{terra}}$  = custo anual de utilização da terra, em R\$;  $AT$  = área total da UPC, em ha;  $PMT$  = preço médio da terra na região, em R\$ ha<sup>-1</sup>;  $i$  = taxa de juros, em %. Esse custo será considerado durante o horizonte de planejamento do projeto.

Assim como na coleta de dados por “Valor fixo por etapa”, o custo total com o frete do carvão vegetal será calculado pelo produto entre o valor médio pago, em R\$ mdc<sup>-1</sup> ou R\$ t<sup>-1</sup>, que deve ser informado pelo usuário do sistema, e a quantidade de carvão vegetal vendido em cada ano, que será obtida posteriormente.

As receitas pela venda do carvão vegetal são obtidas na última etapa de coleta de dados. Nesta, o usuário deve registrar o ano de venda, a quantidade e o preço médio, em R\$ (unidade de carvão vegetal vendido)<sup>-1</sup>. A página de coleta de dados em relação às receitas pela venda do carvão vegetal é única. Independente da forma de obtenção dos dados relacionados aos custos (Valor fixo por etapa ou Valores discriminados), os dados de receitas serão obtidos nessa etapa.

### **3.1.7. Apresentação dos resultados: relatórios e *dashboard***

O sistema gera quatro relatórios – Balanço de carbono, Emissões da siderurgia pela carbonização, Obtenção de madeira e Produção de carvão vegetal (Apêndice C).

<sup>4</sup>Dado fornecido pelo especialista em produção de carvão vegetal, João Cancio de Andrade Araújo, durante entrevista exploratória.



O primeiro relatório – Balanço de carbono – apresenta, além dos dados cadastrais, a produção de carvão vegetal (produção líquida de carvão vegetal e quantidade de coprodutos), as emissões de GEE (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e emissão total, em CO<sub>2</sub>e), as remoções de carbono e o balanço de carbono (diferença entre o total de remoções de carbono e o total de emissões de GEE). Além dos resultados quantitativos, o relatório contém a interpretação desses resultados<sup>5</sup> (Quadro 1).

O segundo relatório – Emissões da siderurgia pela carbonização – tem como resultado quantitativo o balanço de carbono por tonelada de ferro-gusa produzida (MgCO<sub>2</sub>e MgGusa<sup>-1</sup>) e, também, a sua interpretação (Quadro 1). O resultado é calculado a partir do balanço de carbono da carbonização (emissões pela carbonização da madeira e remoções associadas ao estoque total de carbono na madeira carbonizada e ao incremento anual de carbono nas florestas nativas) e da demanda de carbono fixo para produção de ferro-gusa. A demanda de carbono fixo para produção de uma megagrama de ferro-gusa foi considerada 0,45 megagrama de carbono fixo.

**Quadro 1** – Interpretação dos resultados apresentados nos relatórios “Balanço de carbono” e “Emissões da siderurgia pela carbonização”

Relatório	Resultado	Interpretação
Balanço de carbono	Balanço de carbono <sup>a</sup> positivo	PARABÉNS! O balanço de carbono da sua produção de carvão vegetal é positivo. Isso significa que sua atividade está contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.
	Balanço de carbono <sup>a</sup> negativo	O balanço de carbono da sua produção de carvão vegetal é negativo. Isso significa que sua atividade está contribuindo para a intensificação das mudanças climáticas.
Emissões da siderurgia pela carbonização	Positivo	PARABÉNS! Cada tonelada de ferro gusa produzida com o seu carvão vegetal contribui para a remoção de X <sup>b</sup> tCO <sub>2</sub> e da atmosfera.
	Negativo	Cada tonelada de ferro gusa produzida com o seu carvão vegetal contribui para a emissão de X <sup>b</sup> tCO <sub>2</sub> e para a atmosfera.

<sup>a</sup>Balanço de carbono para remoções (resultados positivos indicam que as remoções de CO<sub>2</sub> são superiores às emissões de GEE)

<sup>b</sup>Resultado do campo “Emissão da siderurgia pela carbonização”

É importante ressaltar que os resultados apresentados nos relatórios 1 e 2 consideram as emissões de GEE e as remoções de carbono apenas pela produção de carvão vegetal. As emissões incluídas são aquelas oriundas do processo de carbonização. As remoções de carbono são, principalmente, devidas ao crescimento das florestas plantadas utilizadas como matéria-prima. Ou seja, o balanço de carbono calculado considera que a absorção de CO<sub>2</sub> da atmosfera

<sup>5</sup>A ferramenta foi finalizada no ano de 2020. Desde então, nomenclaturas e terminologias foram atualizadas. Atualmente, os resultados gerados pelo *Charcoal System* seriam interpretados segundo as informações abaixo:

- Balanço de carbono positivo: emissões de GEE superiores às remoções de CO<sub>2</sub>;
- Balanço de carbono negativo: remoções de CO<sub>2</sub> superiores às emissões de GEE.

pelas árvores utilizadas para a produção de carvão vegetal contribui para a mitigação das emissões de GEE da carbonização.

A origem da madeira utilizada para a produção de carvão vegetal é fator fundamental para a inclusão da remoção no cálculo do balanço de carbono. No Brasil, 94% da produção de carvão vegetal é realizada com madeira de plantios florestais (IBÁ, 2023). Em outros países, a madeira provém majoritariamente do desmatamento de florestas nativas, resultando na degradação desses ecossistemas (Sedano et al., 2020, Pelletier et al., 2021). Nestes casos, a produção de carvão vegetal não é caracterizada como sustentável, pois o carbono estocado na vegetação nativa é permanentemente perdido para a atmosfera (Assad et al., 2020). Desta forma, o carvão vegetal produzido por madeira oriunda de desmatamento possui balanço de carbono negativo (Quadro 1).

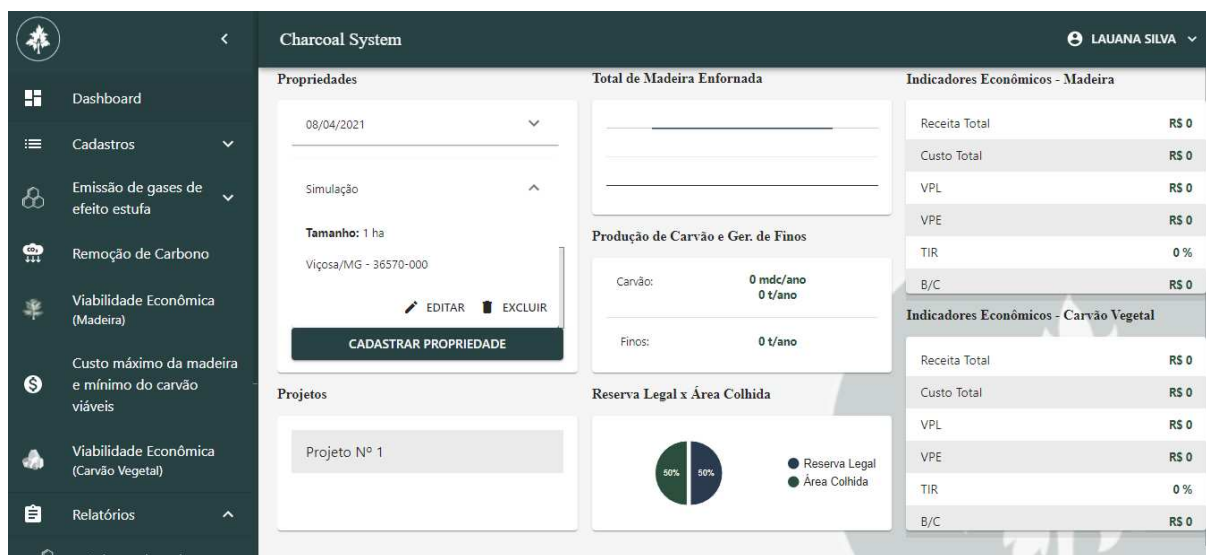
Ao utilizar madeira de plantios florestais, a produção de carvão vegetal terá balanço de carbono positivo, pois parte do carbono estocado na madeira carbonizada permanecerá no carvão vegetal. Porém, durante a utilização do carvão vegetal também ocorrerão emissões de GEE. Estas emissões devem ser incluídas no resultado gerado pelo *Charcoal System*, caso o objetivo seja obter a pegada de carbono de toda a cadeia do carvão vegetal, como, por exemplo, numa análise de ciclo de vida do berço ao túmulo.

Ainda que durante a utilização do carvão vegetal ocorram emissões de GEE, quando comparamos o uso deste insumo com o uso do carvão mineral, é evidente que o balanço de carbono ao longo de toda a cadeia será melhor ao utilizar o carvão vegetal (Pinto et al., 2018, Souza e Pacca, 2021). Diferente do carvão mineral, e conforme já relatado, a produção do carvão vegetal no Brasil está intimamente relacionada à remoção de carbono por plantios florestais.

O terceiro relatório – Obtenção de madeira – contém os resultados relacionados à compra de madeira (quantidade total de madeira comprada ao longo do projeto e custo médio de compra) e à viabilidade econômica do plantio próprio (VPL, VPE, TIR, B/C, situação do projeto – viável ou inviável, quantidade total de madeira produzida durante o horizonte de planejamento e custo médio de produção). Ao final, o relatório também contém a quantidade total de madeira obtida e o custo médio, considerando todas as formas de obtenção (compra e plantio próprio).

O último relatório gerado pelo sistema – Produção de carvão vegetal – possui os resultados dos indicadores econômicos (VPL, VPE, TIR, B/C, situação do projeto – viável ou inviável), a quantidade total de carvão vegetal produzido e o custo médio de produção.

Além dos relatórios, o sistema também possui um *dashboard* em sua primeira página interna, que apresenta de forma centralizada o resumo dos resultados gerados nos quatro relatórios (Figura 8). Esse painel facilita a visualização global do processo, de forma dinâmica e objetiva, o que auxilia na tomada de decisões.



**Figura 8** – *Dashboard do Charcoal System.*

### 3.2. Aplicações

No contexto das mudanças climáticas, a demanda por bioenergia com base em madeira tende a crescer com o passar tempo (Favero et al., 2020). Entende-se então que o carvão vegetal pode assumir papel importante nesse cenário, inclusive pela mitigação das mudanças climáticas. Portanto, é necessário que o segmento de carvão vegetal continue passando por melhorias constantes nos processos produtivos. O *Charcoal System* pode auxiliar na promoção, quantificação e no monitoramento dos benefícios alcançados pela adoção de boas práticas nesse segmento.

O sistema pode ajudar a sensibilizar os produtores de carvão vegetal sobre as alterações climáticas e ajudá-los a tomar decisões quanto às formas de produção mais limpas, mais eficientes e economicamente viáveis. Muitos fatores influenciam os produtores rurais nestas tomadas de decisões, como o acesso a incentivos financeiros, fatores sociodemográficos, econômicos, institucionais e ambientais (Ren et al., 2023, Teklu et al., 2023). Um desses fatores é o conhecimento sobre os impactos dos processos produtivos nas alterações climáticas, e vice-versa, que aumentam a probabilidade de adoção de práticas mais sustentáveis (Teklu et al., 2023).

O acesso, especialmente pelos pequenos e médios produtores rurais, a esses conhecimentos, inclusive por meio da ferramenta desenvolvida, é facilitado pela assistência técnica rural. Equipes técnicas de extensão rural são “agentes de apoio”, que geram impactos positivos a partir da transferência de informação, mas ainda podem ser escassas em muitas regiões (Kumar et al., 2018, Moreira-Dantas et al., 2023). Tais equipes podem atuar na apresentação e auxílio na utilização do *Charcoal System* pelos produtores rurais.

A partir da disseminação e contínua utilização do *Charcoal System*, o sistema possibilitará: i) o monitoramento das emissões de GEE e demais aspectos técnicos da produção de carvão vegetal; ii) a visualização geral da saúde financeira da propriedade rural, quanto à produção florestal e de carvão vegetal; e iii) a identificação das variáveis que mais influenciam na produção, nas emissões de GEE e na viabilidade econômica. Com isso, os gestores das UPC terão maior embasamento para alteração dos fatores relacionados ao processo produtivo, a fim de promover melhorias e torná-lo mais sustentável.

Além de auxiliar os produtores nas tomadas de decisões, o *Charcoal System* pode ser utilizado como ferramenta para a certificação do processo produtivo de carvão vegetal. A criação de um selo de baixo carbono, atestando a adoção de boas práticas na produção de carvão vegetal, pode auxiliar a romper barreiras informacionais e econômicas que existem hoje (Pinto et al., 2018). Nesse sentido, o sistema pode: i) auxiliar no monitoramento das emissões de GEE e remoções de carbono, ii) comprovar que o carvão vegetal produzido em determinadas condições possui balanço de carbono positivo para remoções e iii) mostrar as possibilidades de melhorias no processo. A partir disso, os produtores de carvão vegetal que adotam práticas menos emissoras poderiam ser recompensados financeiramente pelo benefício ambiental proporcionado.

Ainda nessa perspectiva, ao auxiliar na gestão das emissões de GEE, o sistema pode auxiliar no fomento de atividades de baixa emissão de carbono na cadeia de produção de carvão vegetal e nas que utilizam esse produto como matéria-prima, como as siderurgias. Os setores e consumidores, cada vez mais, demandam por serviços e produtos “GEE net zero”, que atestem que suas emissões de GEE são zeradas, neutralizadas (Birkenberg et al., 2021). A indústria siderúrgica brasileira, por já utilizar carvão vegetal renovável e produzir aço “verde”, poderia diferenciar o seu produto no mercado internacional (Pinto et al., 2018). Dessa forma, o segmento de carvão vegetal seria ainda mais promissor e a utilização do *Charcoal System* poderia auxiliar na transformação tão necessária para alcançar uma economia de baixo carbono.

### 3.3. Adaptações para aplicação em outros países, limitações e trabalhos futuros

A primeira versão do *Charcoal System* foi desenvolvida especialmente para os produtores brasileiros de carvão vegetal. Essa decisão tem como base os fatos de que o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal no mundo (FAO, 2021) e que 89,1% do consumo final desse produto se dá pelo setor industrial (EPE, 2023b). Dessa forma, o sistema apresenta parâmetros específicos para a realidade brasileira, que precisam ser adaptados para a aplicação em outras situações, visando garantir a mesma confiabilidade dos resultados.

A primeira mudança para que o *Charcoal System* consiga atingir o público de outros países é a possibilidade de alteração do idioma. Atualmente, o sistema possui o português como único idioma.

Os valores de incremento médio anual de carbono, utilizados para quantificar a remoção de carbono por florestas nativas, também são específicos para a realidade brasileira. O sistema abrange todos os biomas brasileiros, considerando diferentes idades das florestas. Porém, ainda não possui incremento de carbono para florestas naturais de outros países. Dessa forma, para a próxima versão do sistema, sugere-se a inclusão de fatores de incremento de florestas nativas de outros países.

Mesmo considerando apenas a realidade brasileira, é importante que a metodologia adotada no sistema seja revisada. Novas metodologias de quantificação de emissões de GEE são constantemente desenvolvidas. Por isso, a revisão e atualização das metodologias adotadas no *Charcoal System* deve ser feita, para garantir que o sistema gere os resultados mais precisos possíveis.

O cálculo das remoções de CO<sub>2</sub> pelas florestas nativas também precisa ser revisado e a contribuição dessas florestas para a maior sustentabilidade da produção de carvão vegetal precisa de maior destaque nos resultados gerados pelo sistema. Neste sentido, sugere-se:

- Incluir no cálculo do balanço de carbono apenas as remoções de CO<sub>2</sub> associadas às florestas plantadas, ou seja, o estoque de carbono na madeira a ser carbonizada;
- Nos relatórios gerados, dar mais destaque às remoções de CO<sub>2</sub> pelas florestas nativas, pois essas são um diferencial para os produtores que possuem áreas conservadas;
- Revisar o cálculo de área de florestas nativas, evitando que haja dupla contagem, nos casos em que as áreas de APP são contabilizadas juntamente às áreas de RL.

O sistema também pode ser aprimorado com a inclusão de outras fontes de emissão de GEE. A versão atual considera as emissões de GEE provenientes do processo de carbonização (transformação da madeira em carvão vegetal). A inclusão das emissões de GEE de outras fontes (por exemplo, atividades relacionadas à produção de madeira, transporte de

madeira até a UPC, transporte do carvão vegetal da UPC até consumidor) auxiliaria a gestão das emissões de todo esse processo.

Os resultados de emissão de GEE e remoção de CO<sub>2</sub> de cada etapa do processo de produção (desde o plantio da floresta até a distribuição do carvão vegetal) também poderiam ser relacionados com os resultados de viabilidade econômica. Isso permitiria a inclusão de novos indicadores aos relatórios, como, por exemplo, a intensidade de carbono, em Receita MgCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>, Custo MgCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup> e MgCO<sub>2</sub>e MgCarvãoVegetal<sup>-1</sup>.

Outro aspecto relacionado à produção de carvão vegetal que pode aprimorar os resultados gerados pelo *Charcoal System* é incluir a rota de gases condensáveis. As emissões e remoções que ocorrem nas diferentes destinações desse subproduto (recuperação para outros usos ou queima) podem ser adicionadas ao sistema, para deixar o resultado de balanço de carbono ainda mais preciso.

Além dos aspectos técnicos quanto aos cálculos das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub>, ressalta-se a importância da atualização da programação do sistema. A linguagem de programação, *frameworks*, servidores, entre outros aspectos relacionados, ficam desatualizados ao longo do tempo. Caso a manutenção não seja feita periodicamente, o uso do sistema pode ser inviabilizado.

#### 4. Considerações finais

O *Charcoal System* é uma ferramenta inovadora para o segmento de carvão vegetal. O sistema permite estimar as emissões de GEE e remoções de carbono na carbonização, e calcular os indicadores de viabilidade econômica para a produção florestal e de carvão vegetal. As funcionalidades e resultados que podem ser gerados pela utilização do *Charcoal System* convergem direta e indiretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o objetivo 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima.

O sistema é uma ferramenta de suporte aos produtores de carvão vegetal, para auxiliá-los na tomada de decisões, em relação às questões ambientais, técnicas e econômicas da produção. Assim, espera-se que, por meio de sua contínua utilização e difusão, o *Charcoal System* seja disseminador de conhecimentos relacionados a fatores e conceitos antes desconhecidos pelos produtores, especialmente os pequenos e médios.

Os resultados gerados pelo sistema refletem os benefícios alcançados pela adoção de boas práticas na produção de carvão vegetal. Com isso, é esperado que haja uma mudança de

posicionamento dos produtores de carvão vegetal, que irão preferir as técnicas mais limpas, com a certeza da promoção de melhorias ambientais, ganhos financeiros e melhores condições de trabalho.

Acredita-se que, ainda que em médio e longo prazo, o sistema desenvolvido irá contribuir para a capacitação dos produtores de carvão vegetal (ODS 4) e para o aprimoramento das técnicas e infraestruturas de produção (ODS 9), promovendo crescimento econômico (ODSs 1 e 8). Espera-se também a melhoria da qualidade do ar, da saúde e do bem-estar dos produtores rurais (ODS 3) e o fomento à utilização responsável dos recursos florestais (ODS 15). Tudo isso colabora para a produção sustentável (ODS 12) de carvão vegetal e para condições de trabalho decente (ODS 8) para os produtores de todo o mundo – especialmente daqueles onde a produção ainda é, muitas vezes, precária e insustentável, como os países africanos (Silva et al., 2019, Pelletier et al., 2021).

Espera-se que o *Charcoal System*, ferramenta brasileira, desperte o interesse de pesquisadores e empresários em outros países. Conforme demonstrado, o potencial de utilização é de extrema relevância no âmbito das mudanças climáticas. Adequações podem ser necessárias como forma de se obter melhorias contínuas, de acordo com o desenvolvimento tecnológico da atividade de produção de carvão vegetal.

## Referências

[ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR ISO 9241-11: Requisitos ergonômicos para o trabalho com dispositivos de interação visual: Parte 11: Orientações sobre usabilidade*. 26 p. 2011.

ALVES, D.; SOARES, J.V.; AMARAL, S.; MELLO, E.M.K.; ALMEIDA, S.A.S.; SILVA, O.F.; SILVEIRA, A.M. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, v. 3, p. 451-461, 1997. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1997.00081.x>

ARRUDA, T.P.M.; PIMENTA, A.S.; VITAL, B.R.; LUCIA, R.M.D.; ACOSTA, F.C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. *Revista Árvore*, v. 35, p. 949-955, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500020>

ASSAD, E.D.; MARTINS, S.C.; PAVÃO, E.D.; GUSSON, E.; SILVA, J.P.; PRADO, A.; PONTES, C.; BIDERMAN, R.; ESTURBA, T.; ROMEIRO, V. *Greenhouse gas protocol calculation tool for forestry in Brazil*. WRI Brasil: Technical Note. 2020. Disponível em: [https://wribrasil.org.br/sites/default/files/ghg\\_protocolo-florestas-technicalnote.pdf](https://wribrasil.org.br/sites/default/files/ghg_protocolo-florestas-technicalnote.pdf). Acesso em: 14 jun 2023.

ASSIS, M.R.; PROTÁSIO, T.P.; ASSIS, C.O.; TRUGILHO, P.F.; SANTANA, W.M.S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 32, p. 291-302, 2012. <https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.291>

AZEVEDO, A.D. *Composição florística e estoque de carbono em áreas de recuperação de Mata Atlântica na bacia do rio Guapiaçu, Cachoeiras de Macacu, RJ*. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2012.

BABIN, A.; VANEECKHAUTE, C.; ILIUTA, M.C. Potential and challenges of bioenergy with carbon capture and storage as a carbon-negative energy source: A review. *Biomass and Bioenergy*, v. 146, p. 105968, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105968>

BARCELLOS, D.C. *Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo*. 2007. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2007.

BEHL, A.; SAMPAT, B.; GAUR, J.; PEREIRA, V.; LAKER, B.; SHANKAR, A.; SHI, P.; ROOHANIFAR, M. Can gamification help green supply chain management firms achieve sustainable results in servitized ecosystem? An empirical investigation. *Technovation*, v. 129, p. 102915, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102915>

BELLO, S.A.; OYDELE, L.O.; AKINADE, O.O.; BILAL, M.; DELGADO, J.M.D.; AKANBI, L.A.; AJAYI, A.O.; OWOLABI, H.A. Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. *Automation in Construction*, v. 122, p. 103441, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>

BERNAL, B.; MURRAY, L.T.; PEARSON, T.R.H. Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance Manage*, v. 13, p. 1-13, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>

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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123621>

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; SILVA, J.R.M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, v. 31, p. 391-398, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000300004>

BRASIL. *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. [2012]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 14 out. 2023.



BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G.; SEIXAS, F. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 23, p. 53-56, 1983.

BROBBEY, L.K.; HANSEN, C.P.; KYEREH, B.; POULIOT, M. The economic importance of charcoal to rural livelihoods: Evidence from a key charcoal-producing area in Ghana. *For. Policy and Economics*, v. 101, p. 19-31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.013>

BRUN, E.J. *Biomassa e nutrientes na Floresta Estacional Decidual, em Santa Tereza, RS*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004.

CANAL, W.D.; CARVALHO, A.M.M.L.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; PEREIRA, B.L.C.; DONATO, D.B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. *Scientia Forestalis*, v. 44, p. 831-840, 2016. [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n112.05](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n112.05)

CARDOSO, M.T. *Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira*. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2010.

CARDOSO, M.T.; CARNEIRO, A.C.O.; DAMÁSIO, R.A.P.; JACOVINE, L.A.G.; VITAL, B.R.; MARTINS, M.C.; SANTOS, R.C. Efeito da combustão dos gases da carbonização no rendimento gravimétrico da madeira de *Eucalyptus sp.* *Ciência da Madeira*, v. 01, p. 20-31, 2010. [10.12953/2177-6830.v01n02a02](https://doi.org/10.12953/2177-6830.v01n02a02)

CASTRO, A.F.N.M.; CASTRO, R.V.O.; CARNEIRO, A.C.O.; LIMA, J.E.; SANTOS, R.C.; PEREIRA, B.L.C.; ALVES, I.C.N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, p. 627-635, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600008>

[CGEE] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: Subsídios para revisão do Plano Siderurgia*. 2015. Disponível em: [https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao\\_Vegetal\\_WEB\\_02102015\\_10225.PDF](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF). Acesso em: 29 jun. 2022.

CHIDUMAYO, E.N. Is charcoal production in *Brachystegia-Julbernardia* woodlands of Zambia sustainable?. *Biomass and Bioenergy*, v. 125, p. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.010>

COELHO, M.P. *Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização de madeira*. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2013.

[Cool Farm] Cool Farm. *About the Cool Farm Tool*. 2023. Disponível em: <https://coolfarm.org/the-tool/>. Acesso em: 17 jan. 2024.

COSTA, J.M.F.N. *Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono*. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

COSTA, T.L. *Biomassas radiculares e aéreas em comunidades de Caatinga*. 2013. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2013.

COUTINHO, R.P. *Estoques de carbono e emissão de N<sub>2</sub>O no sistema solo-planta em região da Mata Atlântica*. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2009.

CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; VELLOSO, A.C.X. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em florestas montanas da Mata Atlântica na região norte do estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1175-1185, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500011>

DAMÁSIO, R.A.P.; OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; BARCELOS, D.C.; PAREIRA, B.L.C.; MAGALHÃES, M.A.; SILVA, C.M.S. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circulas por meio da temperatura interna. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 6, p. 11-22, 2015. 10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p11-22

DONATO DB. *Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira*. 2017. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

[EPE] Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2023: Relatório Síntese 2023: Ano base 2022*. 2023a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf). Acesso em: 17 jan. 2024.

[EPE] Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2023: Matriz Energética Nacional 2023: Ano base 2022*. 2023b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 17 jan. 2024.

[FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Ex-Ante Carbon-balance Tool: EX-ACT – Guidelines*. Second edition – Tool version 9. Rome. 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0142en>

[FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAOSTAT: Forestry Production and Trade*. 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 23 mai. 2023.

FARIA, R.A.V.B. *Estoque de carbono e atributos florísticos e edáficos de ecossistemas florestais em processo de restauração*. 2012. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2012.

FAVERO, A.; DAIGNEAULT, A.; SOHNGEN, B. Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?. *Science Advances*, v. 6, p. 1-13, 2020. 10.1126/sciadv.aay6792

FEREZ, A.P.C.; CAMPOE, O.C.; MENDES, J.C.T.; STAPE, J.L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 350, p. 40-45, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.015>

FIALHO, L.F. *Seleção de materiais genéticos de Eucalyptus sp. para a produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada*. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2018.

[GHG Protocol] Greenhouse Gas Protocol. *Calculation Tools and Guidance*. 2023. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>. Acesso em: 08 dez. 2023.

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.C.; MEIR, P.; MIRANDA, H.S.; NOBRE, C.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. *Science*, v. 270, p. 778-780, 1995. 10.1126/science.270.5237.778

HAMMAR, T.; STENDAHL, J.; SUNDBERG, C.; HOLMSTRÖM, H.; HANSSON, P. Climate impact and energy efficiency of woody bioenergy systems from a landscape perspective. *Biomass and Bioenergy*, v. 120, p. 189-199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.026>

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R.J.; PINTO, A.C.M.; SILVA, R.P.; ROCHA, R.M.; TRIBUZY, E.S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. *Floresta*, v. 34, 295–304, 2004. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v34i3.2417>

[IBÁ] Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório anual 2022*. 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2023.

[IBGE] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura: Tabelas - 2020*. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>. Acesso em: 25 jul. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf). Acesso em: 29 jun. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers*. 2021a. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf). Acesso em: 29 jun. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity*. 2021b. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter07.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf). Acesso em: 22 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: Overview*. 2006a. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0\\_Overview/V0\\_1\\_Overview.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_1_Overview.pdf). Acesso em: 29 jun. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: General guidance and reporting. Introduction*. 2006b. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1\\_Volume1/V1\\_1\\_Ch1\\_Introduction.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf). Acesso em: 29 jun. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: Agriculture, forestry and other land use. Forest Land*. 2006c. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_04\\_Ch4\\_Forest\\_Land.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf). Acesso em: 29 jun. 2022.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Global Warming of 1.5 °C: Summary for Policymakers*. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>. Acesso em: 29 jun. 2022.

KUMAR, N.; SCOTT, S.; MENON, P.; KANNAN, S.; CUNNINGHAM, K.; TYAHI, P.; WABLE, G.; RAGHUNATHAN, K.; QUISUMBING, A. Pathways from women's group-based programs to nutrition change in South Asia: A conceptual framework and literature review. *Global Food Security*, v. 17, p. 172-185, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.11.002>

LORENZO-SÁEZ, E.; OLIVER-VILLANUEVA, J.; LEMUS-ZÚÑIGA, L.; URCHUEGUÍA, J.F.; LERMA-ARCE, V. Development of sectorial and territorial information system to monitor GHG emissions as local and regional climate governance tool: Case study in Valencia (Spain). *Urban Climate*, v. 42, p. 101125, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101125>

MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa COPAM nº 227, de 29 de agosto de 2018*. Estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências. [2018]. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=46681>. Acesso em: 29 jun. 2022.

MELO, A.C.G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. *Scientia Forestalis*, v. 71, p. 149-154, 2006.

MOREIRA-DANTAS, I.R.; MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; HENNING, H.; SOUZA DOS SANTOS, M.A. Rural credit acquisition for family farming in Brazil: Evidence from the

Legal Amazon. *Journal of Rural Studies*, v. 101, p. 103041, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103041>

MUMBACH, G.D.; ALVES, J.L.F.; SILVA, J.C.G.; DOMENICO, M.D.; ARIAS, S.; PACHECO, J.G.A.; MARANGONI, C.; MACHADO, R.A.F.; BOLZAN, A. Prospecting pecan nutshell pyrolysis as a source of bioenergy and bio-based chemicals using multicomponent kinetic modeling, thermodynamic parameters estimation, and Py-GC/MS analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 153, p. 111753, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111753>

NEVES, T.A.; PROTÁSIO, T.P.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; VIEIRA, C.M.M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 31, p. 319-330, 2011. 10.4336/2011.pfb.31.68.319

OLIVEIRA, A.C. *Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal*. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

OLIVEIRA, A.C., CARNEIRO, A.C.O., PEREIRA, B.L.C., VITAL, B.R., CARVALHO, A.M.M.L., TRUGILHO, P.F., DAMÁSIO, R.A.P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. *Revista Árvore*, v. 37, p. 557-566, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>

OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C.; SALLES, T.T.; CARNEIRO, A.C.O.; LANA, A.Q. Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. *Floresta e Ambiente*, v. 24, p. e20160265, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.026516>

OLIVEIRA, J.V. Análise econômica do carvão vegetal. In: Seminário sobre Carvão Vegetal, 1., 1977, Belo Horizonte. *Anais*. Belo Horizonte: IBS/ABM/BDMG, 1977.

PELLETIER, J.; HAMALAMBO, B.; TRAINOR, A.; BARRETT, C.B. How land tenure and labor relations mediate charcoal's environmental footprint in Zambia: Implications for sustainable energy transitions. *World Development*, v. 146, p. 105600, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105600>

PEREIRA, B.L.C. *Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal*. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

PEREIRA, E.G.; MARTINS, M.A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A.C.O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, p. 592-600, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.028>

PINTO, R.G.D.; SZKLO, A.S.; RATHMANN, R. CO<sub>2</sub> emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. *Energy Policy*, v. 114, p. 380-393, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.040>

PHILLIPS, O.L.; MALHI, Y.; HIGUCHI, N.; LAURANCE, W.F.; NUNEZ, P.V.; VASQUEZ, R.M.; LAURANCE, S.G.; FERREIRA, L.V.; STERN, M.; BROWN, S.;

GRACE, J. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*: v. 282, p. 439-442, 1998. 10.1126/science.282.5388.439

REIS, A.A.; MELO, I.C.N.A.; PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; CARNEIRO, A.C.O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Floresta e Ambiente*: v. 19, p. 497-505, 2012a. <https://doi.org/10.4322/floram.2012.055>

REIS, A.A.; PROTÁSIO, T.P.; MELO, I.C.N.A.; TRUGILHO, P.F.; CARNEIRO, A.C.O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. *Pesquisa Florestal Brasileira*: v. 32, p. 277-290, 2012b. 10.4336/2012.pfb.32.71.277

REN, X.; HE, J.; HUANG, Z. Innovation, natural resources abundance, climate change and green growth in agriculture. *Resources Policy*, v. 85/A, p. 103970, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103970>

RIBEIRO, S.C. *Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando a geração de créditos de carbono em pastagem, capoeira e floresta primária*. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2007.

RODRIGUES, V.G.; CASTILLA, C.; COSTA, R.S.C.; PALM, C. Estoque de carbono em sistema agroflorestal com café em Rondônia – Brasil. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 1., 2000. *Anais*.

ROSÁRIO, A.T.; DIAS, J.C. Sustainability and the Digital Transition: A Literature Review. *Sustainability*, v. 14, p. 4072, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14074072>

SALOMÃO, R.P. *Estimativas de biomassa e avaliação do estoque de carbono da vegetação de florestas primárias e secundárias de diversas idades (capoeiras) na Amazônia oriental, município de Peixe-boi, Pará*. 1994. Dissertação (Mestrado em Biologia Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 1994.

SALOMÃO, R.P.; DANIEL, C.N.; VIEIRA, I.C.G. *Biomassa e estoque de carbono de florestas tropicais primárias e secundárias*. 1998. In: LOPES, A.P. *Estoque e incremento de carbono em florestas nativas do Brasil: base para elaboração de projetos de compensação de emissões de gases de efeito estufa*. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2011.

SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, E.L.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H. Regeneração da vegetação de Caatinga após corte e queima, em Serra Talhada, PE. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, p. 621-632, 1998.

SANTOS, F.C.C.; TANIZAKI, K.; MENDONÇA, A.R.; SANTOS, H.F.; RAMOS, P.T.; FERNANDES, F.S. Estimativa do estoque de carbono na biomassa viva acima do solo em floresta secundária de Mata Atlântica – Município Engenheiro Paulo de Frontin, RJ. In: Congresso de Ecologia do Brasil, 9., 2009, São Lourenço. *Anais*. São Lourenço, 2009.

SCHÖNGART, J.; ARIEIRA, J.; FORTES, C.F.; ARRUDA, E.C.; CUNHA, C.N. Age-related and stand-wise estimates of carbon stocks and sequestration in the aboveground coarse

wood biomass of wetland forests in the northern Pantanal, Brazil. *Biogeosciences*, v. 8, p. 3407-3421, 2011. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3407-2011>

SCHÖNING, J.; WACHTER, P.; TRAUTZ, D. Crop rotation and management tools for every farmer?: The current status on crop rotation and management tools for enabling sustainable agriculture worldwide. *Smart Agricultural Technology*, v. 3, p. 100086, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100086>

SEDANO, F.; LISBOA, S.; DUNCANSON, L.; RIBEIRO, N.; SITEO, A.; SAHAJPAL, R.; HURTT, G.; TUCKER, C. Monitoring intra and inter annual dynamics of forest degradation from charcoal production in Southern Africa with Sentinel – 2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 92, p. 102184, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102184>

SILVA, L.B. *Sistema para cálculo do balanço de carbono e viabilidade técnica e econômica na produção de carvão vegetal*. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2019.

SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; VALVERDE, S.R. *Economia florestal*. 2 ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2005.

SILVA, R.P. *Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM)*. 2007. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, 2007.

SILVA, J.A.; SEDANO, F.; FLANAGAN, S.; OMBE, Z.A.; MACHOCO, R.; MEQUE, C.H.; SITEO, A.; RIBEIRO, N.; ANDERSON, K.; BAULE, S.; HURTT, G. Charcoal-related forest degradation dynamics in dry African woodlands: Evidence from Mozambique. *Applied Geography*, v. 107, p. 72-81, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.04.006>

SOUZA, C.R.; AZEVEDO, C.P.; ROSSI, L.M.B.; SILVA, K.E.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. *Acta Amazonica*, v. 42, p. 501-506, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000400007>

SOUZA, J.F.T.; PACCA, S.A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105517, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>

STAPE, J.L.; SOUZA, V.C.; TORRADO, P.V.; RODRIGUEZ, L.C.E. *Estimativas das taxas de sequestro de carbono na Reserva Particular do Patrimônio Natural SESC Pantanal*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: SESC - Serviço Social do Comércio, 2011.

TANIZAKI, K.F. *Impacto do uso da terra no estoque e fluxo de carbono na área de domínio da Mata Atlântica: Estudo de caso Estado do Rio de Janeiro*. 2000. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2000. In: SANTOS, F.C.C., TANIZAKI, K., MENDONÇA, A.R., SANTOS, H.F., RAMOS, P.T., FERNANDES, F.S. Estimativa do estoque de carbono na biomassa viva acima do solo em floresta secundária de Mata Atlântica – Município Engenheiro Paulo de Frontin, RJ. In: Congresso de Ecologia do Brasil, 9., 2009, São Lourenço. *Anais*. São Lourenço, 2009.

TEIXEIRA, V.L. *Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada e redes neurais*. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2018.

TEKLU, A.; SIMANE, B.; BEZABIH, M. Multiple adoption of climate-smart agriculture innovation for agricultural sustainability: Empirical evidence from the Upper Blue Nile Highlands of Ethiopia. *Climate Risk Management*, v. 39, p. 100477, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100477>

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. *Cerne*, v. 7, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M.; MORI, F.A.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M.; MENDES, L.F.B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. *Cerne*, v. 11, p. 178-186, 2005.

[UN] United Nations. *Siderurgia Sustentável desenvolve cadeia de produção com baixa emissão de poluentes*. 2018a. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/81394-siderurgia-sustentavel-desenvolve-cadeia-de-producao-com-baixa-emissao-de-poluente>. Acesso em: 30 jun. 2022.

[UN] United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *ACM0001 Large-scale Consolidated Methodology: Flaring or use of landfill gas*. 2018b. Versão 18.1, 40p.

[UN] United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Formulário do documento de concepção de projeto (MDL DCP). *Projeto Energia Verde Carbonização: Mitigação de emissões de metano na produção de carvão vegetal do Grupo Queiroz Galvão, Maranhão, Brasil*. 2010. Versão 4, 209p.

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Glasgow Climate Pact: Decision -/CMA.3 (advance unedited version)*. 2021. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3\\_auv\\_2\\_cover%20decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Adoption of the Paris Agreement: Decision -/CP.21*. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

VITAL, B.R.; ANDRADE, A.M.; VALENTE, O.F.; CAMPOS, J.C.C. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 41/42, p. 44-49, 1989.

WELFLE, A.; GILBERT, P.; THORNLEY, P.; STEPHENSON, A. Generating low-carbon heat from biomass: Life cycle assessment of bioenergy scenarios. *Journal of Cleaner Production*, v. 149, p. 448-460, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.035>

[WRI] World Resources Institute. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard: Revised Edition*. 2004. Disponível em:



<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

[WRI] World Resources Institute. *GHG Protocol: Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard*. 2015. Disponível em: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%20%20Guidance\\_Final\\_Sept26.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%20%20Guidance_Final_Sept26.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

[WRI] World Resources Institute. *Climate Watch platform*. 2023. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/>. Acesso em: 23 mai. 2023.

ZULU, L.C.; RICHARDSON, R.B. Charcoal, livelihoods, and poverty reduction: Evidence from sub-Saharan Africa. *Energy for Sustainable Development*, v. 17, p. 127-137, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.007>

## CAPÍTULO II

### **Boas práticas na produção de carvão vegetal: auxílio para descarbonização da indústria siderúrgica**

#### **Resumo**

No Brasil, principal país produtor de carvão vegetal, esse insumo é utilizado principalmente em indústrias de ferro-gusa e aço. Por ser de origem renovável, o carvão vegetal reduz as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) desses processos, quando comparado à utilização de carvão mineral. A emissão de GEE na produção de carvão vegetal varia em função da tecnologia adotada. A adoção de boas práticas na produção do carvão vegetal contribui para a descarbonização da indústria siderúrgica e uma das alternativas é o sistema fornos-fornalha. O objetivo foi verificar como a adoção de boas práticas na produção de carvão vegetal pode contribuir para a descarbonização da indústria siderúrgica. O cálculo do balanço de carbono da carbonização foi realizado para onze propriedades rurais, por meio do sistema web *Charcoal System*, considerando dois cenários: i) linha de base (sem queima de gases) e ii) adoção do sistema fornos-fornalha (com queima de gases). O balanço de carbono considerou as emissões de GEE pela carbonização da madeira, o carbono estocado na madeira carbonizada e o incremento médio anual de carbono das florestas nativas. Valores negativos do balanço de carbono indicam maior sustentabilidade ambiental da produção de carvão vegetal. Em ambos os cenários todas as propriedades obtiveram um balanço de carbono negativo, o que indica que as florestas removeram mais carbono do que foi emitido na carbonização. A utilização do sistema fornos-fornalha reduz em 45,2% as emissões de GEE, quando comparado aos sistemas sem queima de gases. Esse resultado se deve à maior possibilidade de controle do processo, ocasionando a maior eficiência da produção e maior rendimento gravimétrico, além da queima dos gases da carbonização. O sistema fornos-fornalha é uma alternativa econômica, social e ambientalmente viável para a produção de carvão vegetal. A utilização desse sistema reduz as emissões de GEE, convergindo para o ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima. O uso desse sistema de produção pode ser uma das estratégias para a descarbonização do segmento de carvão vegetal e de outros que utilizam esse insumo, como as siderurgias do Brasil.

## 1. Introdução

O carvão vegetal é uma matéria-prima relevante, que possui participação em outras cadeias produtivas e diversos usos – doméstico, químico, agrícola e industrial. Como combustível doméstico em residências e estabelecimentos comerciais, o carvão vegetal é utilizado para aquecer e cozinhar (Zulu e Richardson, 2013). Esse insumo também é utilizado para purificação de água e tratamento de efluentes (Raj et al., 2021), tem capacidade de aumentar a matéria orgânica e fertilidade do solo (Schneider et al., 2022), possui ampla utilização na indústria, entre outras aplicações.

Em diversas partes do mundo o carvão vegetal tem uso majoritariamente doméstico e contribui para a geração de empregos e redução da pobreza (Brobbey et al., 2019, Billig et al., 2022). No Brasil, principal país produtor (11,5% - FAO, 2021), o carvão vegetal é utilizado principalmente na substituição de combustíveis de origem fóssil em indústrias de ferro-gusa e aço (EPE, 2022). Por ser um combustível de origem renovável, o carvão vegetal reduz as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) desses processos (Pinto et al., 2018, Souza e Pacca, 2021).

A produção de carvão vegetal no país é realizada, majoritariamente (94%), com madeira de plantios florestais (IBÁ, 2023). Isso contribui para a sustentabilidade do processo produtivo e ocasiona um resultado negativo de emissões líquidas de GEE (remoções de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) superiores às emissões de GEE). Esta situação é diferente do que acontece quando a matéria-prima é originada de florestas nativas (Pelletier et al., 2021).

Além da contribuição dos plantios florestais, entende-se que as florestas nativas também participam da sustentabilidade das atividades rurais, como é o caso da produção de carvão vegetal. Todo imóvel rural deve atender às exigências do Código Florestal, no que diz respeito à área de Reserva Legal (RL) e, quando aplicável, à Área de Preservação Permanente (APP) (Brasil, 2012). Dessa forma, qualquer atividade rural está relacionada à preservação ou conservação de florestas nativas, que contribuem, entre outros benefícios, para a minimização das mudanças climáticas (Keith et al., 2019, Cardoso, 2021).

Por outro lado, na produção de carvão vegetal também há emissão de GEE (Rodrigues e Braghini Junior, 2019). Desta forma, o uso de novas tecnologias para a produção de carvão vegetal, que sejam menos intensivas em emissões de GEE, também deve ser considerado na busca pela descarbonização da indústria siderúrgica.

A promoção da redução das emissões de GEE na siderurgia brasileira é o objetivo do Projeto Siderurgia Sustentável, implementado pelo Programa das Nações Unidas para o

Desenvolvimento (PNUD), e que visa mitigar estas emissões a partir do aumento da eficiência na produção de carvão vegetal (UN, 2018). O projeto incentiva a implementação de tecnologias, processos e arranjos produtivos mais eficientes para a produção de carvão vegetal originado de florestas plantadas e para o seu uso na siderurgia (UN, 2018).

Uma das boas práticas para a produção de carvão vegetal abordadas no projeto foi a implementação do sistema fornos-fornalha, tecnologia desenvolvida em 2010 (Cardoso, 2010) e que, desde então, passa por contínuas melhorias. Os sistemas fornos-fornalha são compostos por fornos de superfície ligados, por ductos, a uma fornalha, onde ocorre a queima dos gases liberados na combustão da madeira, diminuindo as emissões de GEE na produção de carvão vegetal (Oliveira, 2012). A adoção do sistema fornos-fornalha também permite o controle da temperatura de carbonização por pirometria (Ribeiro et al., 2020), o que auxilia no aumento do rendimento gravimétrico.

O desenvolvimento e adoção de tecnologias é cada vez mais necessário nos diversos setores econômicos e de produção, para atender as metas estabelecidas no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015). Especificamente o setor de energia, que possui a maior contribuição para as emissões mundiais de GEE (WRI, 2023), deve buscar alternativas para acelerar a transição para uma economia de baixa emissão de carbono (UNFCCC, 2021). Neste sentido, o objetivo foi verificar como a adoção do sistema fornos-fornalha na produção de carvão vegetal pode contribuir para a descarbonização da indústria siderúrgica.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Seleção das propriedades rurais**

O balanço de carbono do processo de carbonização foi quantificado para onze (11) propriedades rurais, contempladas pelo Projeto Siderurgia Sustentável, por meio do Edital JOF 2516/2020, financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) e operacionalizado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), cujo objeto foi “Incentivo à produção sustentável de carvão vegetal de florestas plantadas por pequenos e médios produtores rurais, preferencialmente com a adoção do sistema fornos-fornalha”. A execução do projeto foi realizada majoritariamente entre julho e novembro de 2021.

A seleção dos produtores de carvão vegetal se deu por meio de visitas e verificação do cumprimento das exigências do edital. Os produtores de carvão vegetal deveriam ser

caracterizados, em relação ao porte, como pequenos ou médios, e estarem localizados no estado de Minas Gerais, Brasil<sup>1</sup>, entre outros critérios.

## 2.2. Cálculos

Os cálculos foram realizados no sistema web *Charcoal System* (<https://charcoalsystem.com.br/>). O *Charcoal System* é um sistema de cálculo do balanço de carbono, entre outros indicadores, na produção de carvão vegetal, que atende, especialmente, os produtores brasileiros. O sistema considera as emissões de GEE pela carbonização da madeira, o carbono estocado na madeira a ser carbonizada e o incremento médio anual de carbono das florestas nativas presentes na propriedade para o cálculo do balanço de carbono. Todas as emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub> são pertencentes ao Escopo 1, que abrange as fontes controladas pela instituição inventariada, definidas como “emissões diretas” (WRI, 2004).

As emissões de GEE geradas para implantação e manutenção da floresta e, conseqüentemente, pela produção da madeira e pelo transporte até a Unidade de produção de carvão vegetal (UPC) não foram incluídas no cálculo. Isto permite que os produtores de carvão vegetal estimem apenas as emissões da carbonização, o que auxilia na tomada de decisão quanto às formas de produção mais limpas e eficientes. Ademais, os produtores de carvão vegetal que não possuem plantios próprios e que compram a madeira não são responsáveis diretos pelas emissões do manejo dos plantios. Nestes casos, a inclusão das fontes associadas ao manejo florestal ocasionaria uma superestimação das emissões de GEE. Os produtores de carvão vegetal que produzem sua própria madeira podem realizar a análise do balanço de carbono dos plantios separadamente.

O balanço de carbono da carbonização foi calculado pela equação:  $BC = Em_{carb} - (EC_{mad} + IC_{nat})$ , em que: BC = balanço de carbono, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>,  $Em_{carb}$  = emissão anual de GEE da carbonização, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>,  $EC_{mad}$  = estoque total de carbono na madeira carbonizada anualmente, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>,  $IC_{nat}$  = incremento médio anual de carbono nas florestas nativas, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>. Desta forma, o balanço de carbono negativo indica maior sustentabilidade ambiental do processo produtivo de carvão vegetal.

O estoque total de carbono na madeira carbonizada só pôde ser incluído no cálculo do balanço de carbono, pois a madeira utilizada para a produção de carvão vegetal em todas as propriedades era oriunda de florestas plantadas. Esta informação foi base para todos os cálculos.

<sup>1</sup>As informações geográficas completas das propriedades rurais e os dados pessoais dos produtores foram mantidas em sigilo, por motivos de confidencialidade.

As onze propriedades rurais foram cadastradas no *Charcoal System* e, por meio dos dados específicos de cada uma (Apêndice D), o balanço de carbono foi calculado para dois cenários: 1) sistema de produção atual adotado nas propriedades avaliadas (linha de base); e 2) simulação da implementação do sistema fornos-fornalha nas propriedades avaliadas.

A estimativa do balanço de carbono no Cenário 1 (sem queima de gases) adotou dados de entrada que representavam a realidade praticada em cada propriedade rural (Quadro 1). Os sistemas atuais de produção são compostos por fornos circulares de superfície, fornos de encosta e tipo “rabo-quente”, de diferentes tamanhos e capacidades produtivas (Apêndice D).

Os dados de entrada do Cenário 2 (com queima de gases) foram definidos de tal forma que a quantidade de madeira enfiada, anualmente, fosse a mesma nos dois cenários. Essa padronização da quantidade de madeira e, conseqüentemente, do total de CO<sub>2</sub> permitiu uma avaliação mais apropriada da contribuição da adoção do sistema fornos-fornalha para o balanço de carbono.

O Cenário 2 considerou a implementação da fornalha para a queima dos gases da carbonização acoplada a fornos circulares de superfície com as seguintes características: i) 3,00 m de diâmetro; ii) 1,60 m de altura; iii) capacidade de enchimento de 13,96 metros estéreos (st) de madeira; iv) rendimento gravimétrico de 33,5%; e v) produtividade de 7,44 metros de carvão vegetal (mdc) (Quadro 1). A definição de um valor padrão para a quantidade de madeira enfiada nos dois cenários foi possível devido à adoção de valores não inteiros para a quantidade de fornos no Cenário 2. O número de fornos para o Cenário 2 de cada propriedade foi definido a partir da equação:  $F_i = TM_{enf_i} / M_{enf-forno_i}$ , em que:  $F_i$  = quantidade de fornos para o Cenário 2 da propriedade  $i$ ,  $TM_{enf_i}$  = quantidade total de madeira enfiada anualmente na propriedade  $i$  no Cenário 1, em m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>,  $M_{enf-forno_i}$  = quantidade de madeira enfiada por forno anualmente na propriedade  $i$  no Cenário 2, em m<sup>3</sup> forno<sup>-1</sup>,  $i$  = propriedades 1, 2, ..., 11.

**Quadro 1** – Como os dados de entrada foram obtidos para o cálculo do balanço de carbono sem a queima de gases (Cenário 1) e com a queima de gases (Cenário 2)

Variável	Unidade	Cenário 1	Cenário 2*
<i>Registro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Real	Default
Quantidade de fornos	-	Real	Estimativa
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Real	Default
Tipo de ferramenta	-	Real	Default
Queimador de gases	-	Real	Default
Tipo de queimador	-	Real	Default
% de queima dos gases	%	Real	Valor default sugerido pelo Charcoal System
Diâmetro dos fornos	m	Real	Default
Altura dos fornos	m	Real	Default
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Real	Real
Teor de umidade base seca	%	Default	Default
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	Default	Default
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	Default	Default
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	Estimativa	Estimativa default
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	44% da densidade básica da madeira (Oliveira, 2012)	44% da densidade básica da madeira (Oliveira, 2012)
Teor de carbono fixo	%	Valor default sugerido pelo Charcoal System	Valor default sugerido pelo Charcoal System
Duração média do ciclo de carbonização	dias	Real	Default
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	Default	Default
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	Default	Default
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	Estimativa	Estimativa default
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	Default	Default
Rendimento volumétrico	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	Valor estimado pelo Charcoal System	Valor estimado pelo Charcoal System
Rendimento gravimétrico	%	Real	Real default
Geração de atíços	%	Valor default sugerido pelo Charcoal System	Valor default sugerido pelo Charcoal System
Geração de finos (UPC)	%	Valor default sugerido pelo Charcoal System	Valor default sugerido pelo Charcoal System
Geração de finos (carregamento e transporte)	%	Valor default sugerido pelo Charcoal System	Valor default sugerido pelo Charcoal System
Geração de finos (peneiramento)	%	Valor default sugerido pelo Charcoal System	Valor default sugerido pelo Charcoal System
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Real	Real
Localização	-	Real	Real
Bioma	-	Real	Real
Idade	anos	Real	Real
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	Real	Real

\*Os valores *defaults* foram definidos de acordo com recomendações e experimentos realizados em etapas anteriores, no âmbito do Edital JOF 2516/2020

### 3. Resultados

Em ambos os cenários (sem e com queima de gases), todas as propriedades obtiveram um balanço de carbono negativo para emissões. Isso significa que a demanda anual de madeira para carbonização e a área de floresta nativa presente em cada propriedade (Tabela 1) compensaram as emissões de GEE do processo de carbonização.

No Cenário 1 (sem queima de gases), a partir da emissão total (1.592,24 MgCO<sub>2e</sub>) e do estoque de carbono na madeira carbonizada anualmente (4.672,08 MgCO<sub>2e</sub>), percebe-se que 65,9% do total de carbono ficou estocado no carvão vegetal (Tabela 2). Já no Cenário 2 (com queima de gases), 79,5% do estoque de carbono na madeira permaneceu no carvão vegetal.

O balanço de carbono por unidade produzida no Cenário 1 (sem queima de gases), considerando as 11 propriedades, foi -3,89 MgCO<sub>2e</sub> por megagrama de carvão vegetal (MgCV) (Tabela 2). No Cenário 2 (com queima de gases) o balanço de carbono médio para emissões foi -4,13 MgCO<sub>2e</sub> MgCV<sup>-1</sup>.

A produção de carvão vegetal no sistema fornos-fornalha aumentou em relação aos outros sistemas de produção, utilizando a mesma quantidade de madeira (Tabela 2).

**Tabela 1** – Demanda anual de madeira para carbonização, em Mg ano<sup>-1</sup>, e área de floresta nativa, incluindo área de Reserva Legal (RL) e de Preservação Permanente (APP), em ha

Propriedade rural	Demanda de madeira (Mg ano <sup>-1</sup> )	Área de floresta nativa (ha)
1	6.264,63	21,19
2	3.734,39	8,25
3	1.076,10	2,85
4	2.026,22	5,29
5	3.691,76	8,30
6	2.781,76	6,02
7	893,40	3,12
8	2.077,71	6,95
9	845,86	1,40
10	5.271,50	17,26
11	1.158,48	3,42



**Tabela 2** – Tipo de forno; produção, em MgCV ano<sup>-1</sup>; emissão de gases de efeito estufa (Emissão), estoque total de carbono na madeira carbonizada anualmente (EC<sub>mad</sub>), incremento de carbono anual nas florestas nativas (IC<sub>nat</sub>) e balanço de carbono (BC) totais, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, e por unidade produzida, em MgCO<sub>2</sub>e MgCV<sup>-1</sup>, por propriedade rural e média, para os Cenários 1 (sem queima de gases) e 2 (com queima de gases)

Propriedade rural	Tipo de forno	Produção (MgCV ano <sup>-1</sup> )	Total (MgCO <sub>2</sub> e ano <sup>-1</sup> )				Por unidade produzida (MgCO <sub>2</sub> e MgCV <sup>-1</sup> )			
			Emissão	EC <sub>mad</sub>	IC <sub>nat</sub>	BC	Emissão	EC <sub>mad</sub>	IC <sub>nat</sub>	BC
<i>Cenário 1 – Sem queima de gases</i>										
1	Circular	1.853,33	3.683,88	10.796,05	135,30	-7.247,47	1,99	5,83	0,07	-3,91
2	Circular	988,77	2.435,15	6.435,60	52,71	-4.053,16	2,46	6,51	0,05	-4,10
3	Circular	309,43	652,77	1.854,48	10,79	-1.212,51	2,11	5,99	0,03	-3,92
4	Forno de encosta	633,16	1.105,68	3.491,86	33,79	-2.419,97	1,75	5,51	0,05	-3,82
5	Rabo-quente	992,79	2.383,12	6.362,13	31,43	-4.010,45	2,40	6,41	0,03	-4,04
6	Forno de encosta	885,32	1.467,13	4.793,90	38,45	-3.365,22	1,66	5,41	0,04	-3,80
7	Circular	272,55	504,70	1.539,63	19,92	-1.054,86	1,85	5,65	0,07	-3,87
8	Forno de encosta	658,42	1.101,28	3.580,58	44,39	-2.523,69	1,67	5,44	0,07	-3,83
9	Forno de encosta	267,25	450,96	1.457,70	8,95	-1.015,69	1,69	5,45	0,03	-3,80
10	Circular	1.549,57	3.126,68	9.084,56	65,41	-6.023,29	2,02	5,86	0,04	-3,89
11	Forno de encosta	370,55	603,27	1.996,45	21,87	-1.415,04	1,63	5,39	0,06	-3,82
<b>Média</b>		<b>798,29</b>	<b>1.592,24</b>	<b>4.672,08</b>	<b>42,09</b>	<b>-3.121,94</b>	<b>1,93</b>	<b>5,77</b>	<b>0,05</b>	<b>-3,89</b>
<i>Cenário 2 – Com queima de gases</i>										
1	Circular	2.098,64	2.218,11	10.796,05	135,30	-8.713,24	1,06	5,14	0,06	-4,15
2	Circular	1.251,01	1.322,23	6.435,60	52,71	-5.166,07	1,06	5,14	0,04	-4,13
3	Circular	360,49	381,01	1.854,48	10,79	-1.484,26	1,06	5,14	0,03	-4,12
4	Circular	678,78	717,42	3.491,86	33,79	-2.808,22	1,06	5,14	0,05	-4,14
5	Circular	1.236,73	1.307,14	6.362,13	31,43	-5.086,43	1,06	5,14	0,03	-4,11
6	Circular	931,88	984,93	4.793,90	38,45	-3.847,42	1,06	5,14	0,04	-4,13
7	Circular	299,29	316,33	1.539,63	19,92	-1.243,23	1,06	5,14	0,07	-4,15
8	Circular	696,03	735,65	3.580,58	44,39	-2.889,32	1,06	5,14	0,06	-4,15
9	Circular	283,36	299,49	1.457,70	8,95	-1.167,15	1,06	5,14	0,03	-4,12
10	Circular	1.765,94	1.866,47	9.084,56	65,41	-7.283,49	1,06	5,14	0,04	-4,12
11	Circular	388,09	410,18	1.996,45	21,87	-1.608,13	1,06	5,14	0,06	-4,14
<b>Média</b>		<b>908,20</b>	<b>959,91</b>	<b>4.672,08</b>	<b>42,09</b>	<b>-3.754,27</b>	<b>1,06</b>	<b>5,14</b>	<b>0,05</b>	<b>-4,13</b>
<b>Variação absoluta (%) Cenário 2 em relação ao Cenário 1</b>		<b>+13,8</b>	<b>-39,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>+20,3</b>	<b>-45,2</b>	<b>-10,8</b>	<b>-10,0</b>	<b>+6,2</b>
<b>Variação absoluta (%) Cenário 1 em relação ao Cenário 2</b>		<b>-12,1</b>	<b>+65,9</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>-16,8</b>	<b>+82,5</b>	<b>+12,1</b>	<b>+11,1</b>	<b>-5,9</b>

#### 4. Discussão

O Brasil é o principal país produtor de carvão vegetal do mundo (FAO, 2021) e mais de 65% do consumo interno total é destinado à utilização nas indústrias de ferro-gusa e aço (EPE, 2023). O setor siderúrgico é responsável por 7% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> do setor de energia (IEA, 2020) e é considerado “*hard-to-abate*” – possui desafios tecnológicos, logísticos e econômicos para a descarbonização (IRENA, 2020). A substituição do coque de carvão mineral pelo carvão vegetal já é uma das alternativas para promover a descarbonização da indústria siderúrgica (Souza e Pacca, 2021, Hebeda et al., 2023). Por isso, investimentos em tecnologias menos intensivas em emissões de GEE para a produção de carvão vegetal também são necessários.

A tecnologia de conversão, especialmente o tipo de forno, as características da madeira, o controle da temperatura do processo e a mão de obra são alguns dos fatores que influenciam o rendimento e a qualidade da produção de carvão vegetal (Oliveira et al., 2017). Tradicionalmente o carvão vegetal é produzido com baixa tecnologia, especialmente por pequenos e médios produtores (Rodrigues e Braghini Junior, 2019, Bekele e Kemal, 2022). No Brasil, ainda é comum a utilização de fornos rudimentares de alvenaria e a realização de controle empírico da carbonização (Oliveira et al., 2017). Esses fatores resultam em um baixo rendimento gravimétrico, causam impactos negativos no âmbito econômico, social e ambiental, inclusive em termos de emissões de GEE (Rodrigues e Braghini Junior, 2019).

Existem muitas barreiras para a adoção de novas tecnologias, técnicas e métodos pelos produtores rurais, que devem ser superadas para a consolidação de processos mais sustentáveis. Aspectos culturais, crenças e resistência à mudança são uma dessas barreiras (File e Nhamo, 2023, Christian et al., 2024). Práticas agrícolas tradicionais muitas vezes são valorizadas e mantidas, mesmo que existam novas alternativas mais eficientes e economicamente viáveis. Um exemplo concreto na produção de carvão vegetal é a baixa adesão ao pirômetro para o controle de temperatura da carbonização.

O desconhecimento das tecnologias disponíveis e a falta de compreensão sobre os potenciais benefícios do seu uso também limitam a adoção de boas práticas pelos produtores rurais (Long et al., 2016, Christian et al., 2024). A extensão rural possui um papel essencial na superação dessas barreiras, por meio da sensibilização, prestação de apoio e eficaz transferência de conhecimentos relacionados ao uso das novas tecnologias (Senyolo et al., 2018, Teklu et al., 2023).

Ainda que as novas tecnologias promovam diversos benefícios ambientais, sociais e econômicos, podem possuir alto custo de implementação. Isto, associado à falta de financiamento, também constituem outra barreira importante (Senyolo et al., 2018, Diaz et al., 2022, Teklu et al., 2023). Portanto, a superação desses desafios requer uma abordagem integrada, que inclua programas educacionais, acesso a financiamentos, demonstrações práticas e esforços para sensibilizar os produtores rurais sobre os benefícios da adoção de boas práticas e inovações tecnológicas.

A adoção de boas práticas na produção de carvão vegetal – em específico, a utilização do sistema fornos-fornalha – resulta na redução das emissões de GEE e na melhoria do balanço de carbono por unidade produzida. Estes e outros benefícios são ocasionados quando, por exemplo, há a utilização de tecnologias mais avançadas de carbonização, que permitem um maior controle do processo produtivo (Schettini et al., 2022), como são os casos da utilização de pirômetro e sistema supervisório para monitoramento da temperatura de carbonização.

O balanço de carbono em ambos sistemas produtivos (sem e com a queima de gases) e para todas as propriedades foi negativo para emissões de GEE, indicando sustentabilidade no processo (Tabela 2). Além disso, em média, 65,9% e 79,5% do total de carbono na madeira carbonizada permaneceu no carvão vegetal produzido sem (Cenário 1) e com a queima de gases (Cenário 2), respectivamente. Estes resultados estão relacionados à origem da madeira utilizada como matéria-prima para a carbonização, que foram as florestas plantadas.

A absorção de CO<sub>2</sub> da atmosfera durante o crescimento das árvores utilizadas para a produção de carvão vegetal contribui para a mitigação das emissões de GEE da carbonização. Dessa forma, o uso de florestas plantadas para a produção de carvão vegetal e a posterior utilização deste insumo podem melhorar o balanço de carbono de toda a cadeia produtiva das siderurgias, em comparação com o uso do coque de carvão mineral (Pinto et al., 2018, Souza e Pacca, 2021). Esses resultados reforçam a importância da produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas e do uso do sistema fornos-fornalha, com controle da temperatura da carbonização, para a minimização das mudanças climáticas.

A origem da matéria-prima é um grande diferencial positivo da produção de carvão vegetal no Brasil. Em outros países produtores, a madeira é, em grande parte, oriunda do desmatamento de florestas nativas, causando a degradação desses ambientes (Sedano et al., 2020, Pelletier et al., 2021). Nestes casos, todo carbono estocado na vegetação nativa é permanentemente perdido para a atmosfera e essa emissão é associada à produção de carvão vegetal, descaracterizando esse processo como “sustentável” (Assad et al., 2020).

Apesar do resultado negativo do balanço de carbono por unidade produzida em todos os sistemas de produção, a utilização do sistema fornos-fornalha resultou em um valor absoluto desse indicador 6,2% superior. Isso ocorreu devido ao maior controle do processo, por meio do monitoramento da temperatura de carbonização por pirometria, quando comparado aos cenários de linha de base (sem queima de gases), ocasionando a maior eficiência da produção, além da queima dos gases da carbonização (Schettini et al., 2022).

A emissão de GEE por unidade produzida no sistema fornos-fornalha foi, em média, 45,2% inferior à emissão de GEE por megagrama de carvão vegetal produzido nos sistemas atuais analisados. Este é o principal ganho ambiental pela utilização de tecnologias mais avançadas para a carbonização, obtido por meio da queima dos gases da carbonização (Lana, 2014, Pereira et al., 2017).

Os benefícios ambientais, em termos de emissões de GEE, obtidos pela utilização do sistema fornos-fornalha podem ser parte de uma demanda crescente por rótulos climáticos (Birkenberg et al., 2021). Os setores e consumidores estão cada vez mais assumindo atitudes conscientes frente às mudanças climáticas e, uma delas, é a disposição a pagar por serviços e produtos com menor pegada de carbono ou neutros em carbono (Feucht e Zander, 2018, Birkenberg et al., 2021, Xu e Lin, 2021, Asioli et al., 2023).

Uma das estratégias que as empresas podem adotar para alcançar o objetivo de neutralidade carbônica é utilizar tecnologias que promovam a redução de suas emissões de GEE (André e Valenciano-Salazar, 2022). O sistema fornos-fornalha é uma dessas tecnologias, que produz um carvão vegetal com menor pegada de carbono. Desta forma, sua utilização pode ser um dos instrumentos para a siderurgia brasileira obter um diferencial e ofertar o “aço verde”, cuja demanda já é uma realidade (Muslemani et al., 2021, Wang et al., 2023).

Além da diminuição da pegada de carbono do carvão vegetal, o sistema fornos-fornalha também promove ganhos sociais, principalmente relacionados à questão de saúde e segurança no trabalho (UN, 2018). Existe uma lacuna em relação a trabalhos que analisem as condições de segurança no trabalho no segmento de carvão vegetal (Santos, 2022). Ainda assim, entende-se que as diferenças estruturais no sistema fornos-fornalha, em comparação a outros tipos de fornos (de encosta e rabo-quente), permitem um maior controle do processo de carbonização, promovendo melhorias nas condições de trabalho, especialmente com uma menor exposição dos trabalhadores à fumaça e elevadas temperaturas.

Estas melhores condições de trabalho são uma exigência das indústrias siderúrgicas que não conseguem produzir toda sua demanda por carvão vegetal e compram este insumo de

produtores rurais (Schettini et al., 2022). Portanto, a adoção do sistema fornos-fornalha pode ser um facilitador para a venda do carvão vegetal produzido por pequenos e médios produtores.

Benefícios econômicos também são obtidos pela utilização do sistema fornos-fornalha, em relação às despesas e suscetibilidade às oscilações de mercado (Oliveira et al., 2017, Ribeiro et al., 2020). A adoção deste sistema acarretou em uma maior produção de carvão vegetal (13,8%) ao utilizar a mesma quantidade de madeira que os sistemas convencionais. Isto está relacionado ao maior controle da temperatura de carbonização, a partir do uso de pirômetro, que ocasionou um maior rendimento gravimétrico nesse sistema (Oliveira et al., 2013, Ribeiro et al., 2020, Schettini et al., 2022). Consequentemente, o custo com matéria-prima será menor, quando comparado a sistemas tradicionais de produção (Ribeiro et al., 2020).

Outros estudos já identificaram a viabilidade econômica da utilização do sistema fornos-fornalha (Ribeiro et al., 2020, Schettini et al., 2021). Quando comparado aos fornos de encosta, de superfície e rabo-quente (sistemas tradicionais de produção), o sistema fornos-fornalha promove um aumento do Valor Presente Líquido (VPL) de 22,3%, 46,1% e 3.085,5%, respectivamente (Ribeiro et al., 2020).

Esses resultados são explicados pela maior despesa operacional que os sistemas tradicionais de produção de carvão vegetal possuem, em relação ao sistema fornos-fornalha (Ribeiro et al., 2020). Além disso, no caso dos fornos tipo rabo-quente, a despesa de capital também é significativamente superior, devido à menor vida útil dos fornos, quando comparado ao sistema fornos-fornalha (Ribeiro et al., 2020).

Diante disso, percebe-se que a utilização do sistema fornos-fornalha é uma alternativa econômica, social e ambientalmente viável para a produção de carvão vegetal. Especificamente do ponto de vista das emissões de GEE, a utilização desse sistema é capaz de contribuir não só para a descarbonização do segmento de carvão vegetal, mas de outros que utilizam esse insumo, como as siderurgias do Brasil.

## **5. Conclusões**

A utilização do sistema forno-fornalha reduz quase 50,0% das emissões de GEE por unidade produzida, considerando o processo de carbonização, quando comparado aos sistemas convencionais de produção de carvão vegetal sem queima de gases. Por outro lado, o uso dos sistemas convencionais aumenta as emissões de GEE por unidade produzida em mais de 80,0%.

A maior eficiência do sistema fornos-fornalha acarreta em uma produção 13,8% superior ao utilizar a mesma quantidade de madeira que os sistemas convencionais.

A utilização do sistema forno-fornalha contribui para a mitigação das mudanças climáticas, convergindo para o objetivo 13 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU – Ação contra a mudança global do clima.

A utilização do sistema forno-fornalha pode contribuir para a descarbonização do segmento de carvão vegetal das siderurgias que utilizam esse insumo. Especificamente no Brasil, onde a siderurgia já substituiu, em parte de sua produção, o coque de carvão mineral pelo carvão vegetal, a utilização do carvão vegetal produzido no sistema fornos-fornalha pode ser um diferencial ainda maior para a oferta de “aço verde”.

## Referências

- ANDRÉ, F.J.; VALENCIANO-SALAZAR, J.A. Voluntary carbon neutral programs. Adoption and firms’ strategies. *Journal of Cleaner Production*, v. 381/1, p. 135191, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135191>
- ASSAD, E.D.; MARTINS, S.C.; PAVÃO, E.D.; GUSSON, E.; SILVA, J.P.; PRADO, A.; PONTES, C.; BIDERMAN, R.; ESTURBA, T.; ROMEIRO, V. *Greenhouse gas protocol calculation tool for forestry in Brazil*. WRI Brasil: Technical Note. 2020. Disponível em: [https://wribrasil.org.br/sites/default/files/ghg\\_protocolo-florestas-technicalnote.pdf](https://wribrasil.org.br/sites/default/files/ghg_protocolo-florestas-technicalnote.pdf). Acesso em: 14 jun 2023.
- ASIOLI, D.; ZHOU, X.; HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU, A.; VANHATALO, A.; GIVENS, D.I.; RONDONI, A.; TURPEINEN, A.M. Consumers’ valuation for low - carbon emission and low – saturated fat butter. *Food Quality and Preference*, v. 108, p. 104859, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.104859>
- BEKELE, B.; KEMAL, A.W. Determents of sustainable charcoal production in AWI zone; the case of Fagita Lekoma district, Ethiopia. *Heliyon*, v. 8, p. e11963, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11963>
- BILLIG, M.; BADWAN, A.; ANKONA, E.; ANKER, Y. Charcoal Production in Palestinian villages - The Paradox of resistance to innovation driving rural development. *Journal of Rural Studies*, v. 89, p. 25-34, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.11.009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123621>
- BRASIL. *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e

7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. [2012]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em: 14 out. 2023.

BROBBEY, L.K.; HANSEN, C.P.; KYEREH, B.; POULIOT, M. The economic importance of charcoal to rural livelihoods: Evidence from a key charcoal-producing area in Ghana. *Forest Policy and Economics*, v. 101, p. 19-31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.013>

CANAL, W.D.; CARVALHO, A.M.M.L.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; PEREIRA, B.L.C.; DONATO, D.B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. *Scientia Forestalis*, v. 44, p. 831-840, 2016. <dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n112.05>

CARDOSO, E.J.B.N. (org.). *A sustentabilidade ambiental da agricultura e de florestas tropicais: Uma visão científica, ecológica, política e social*. 1 ed. Curitiba, PR: Appris, 2021.

CARDOSO, M.T. *Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira*. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2010.

CHRISTIAN, K.T.R.; PHILIPPE, C.A.B.; ABRAHAM, A.G.; CAMEL, L.; FÉLICIEN, A.; GAUTHIER, B.I.A.O.U.; SOHOUNHLOUE, C.K.D. Recent climate-smart innovations in agrifood to enhance producer incomes through sustainable solutions. *Journal of Agriculture and Food Research*, In Press, Journal Pre-proof, p. 100985, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100985>

DAMÁSIO, R.A.P.; OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; BARCELOS, D.C.; PAREIRA, B.L.C.; MAGALHÃES, M.A.; SILVA, C.M.S. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circulas por meio da temperatura interna. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 6, p. 11-22, 2015. [10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p11-22](https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p11-22)

DIAZ, R.T.; OSORIO, D.P.; HERNÁNDEZ, E.M.; PALLARES, M.M.; CANALES, F.A.; PATENINA, A.C.; ECHEVERRÍA-GONZÁLEZ, A. Socioeconomic determinants that influence the agricultural practices of small farm families in northern Colombia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 21, p. 440-451, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.12.001>

[EPE] Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2023: Matriz Energética Nacional 2023: Ano base 2022*. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 17 jan. 2024.

[FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAOSTAT: Forestry Production and Trade*. 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 23 mai. 2023.

FAVERO, A.; DAIGNEAULT, A.; SOHNGEN, B. Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?. *Science Advances*, v. 6, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay6792>

FEUCHT, Y.; ZANDER, K. Consumers' preferences for carbon labels and the underlying reasoning. A mixed methods approach in 6 European countries. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, p. 740-748, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.236>

FILE, D.J.M.; NHAMO, G. Farmers' choice for indigenous practices and implications for climate-smart agriculture in northern Ghana. *Heliyon*, v. 9, p. e22162, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22162>

HEBEDA, O.; GUIMARÃES, B.S.; CRETTON-SOUZA, G.; ROVERE, E.L.L.; PEREIRA, A.O. Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 401, p. 136672, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136675>

[IBÁ] Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório anual 2022*. 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2023.

[IEA] International Energy Agency. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking*. 2020. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron\\_and\\_Steel\\_Technology\\_Roadmap.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf). Acesso em: 02 jul. 2023.

[IRENA] International Renewable Energy Agency. *Reaching zero with renewables: Eliminating CO<sub>2</sub> emissions from industry and transport in line with the 1.5 °C climate goal*. 2020. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA\\_Reaching\\_zero\\_2020.pdf?rev=571584c7539a4b7791088df3a1df78ce](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_Reaching_zero_2020.pdf?rev=571584c7539a4b7791088df3a1df78ce). Acesso em: 02 jul. 2023.

KEITH, H.; VARDON, M.; STEIN, J.A.; LINDENMAYER, D. Contribution of native forests to climate change mitigation – A common approach to carbon accounting that aligns results from environmental-economic accounting with rules for emissions reduction. *Environmental Science & Policy*, v. 93, p. 189-199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.001>

LANA, A.Q. *Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2014.

LONG, T.B.; BLOK, V.; CONINX, I. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *Journal of Cleaner Production*, v. 112/1, p. 9-21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044>

MUSLEMANI, H.; LIANG, X.; KAESEHAGE, K.; ASCUI, F.; WILSON, J. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. *Journal of Cleaner Production*, v. 315, p. 128127, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128127>



OLIVEIRA, A.C. *Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal*. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

OLIVEIRA, A.C., CARNEIRO, A.C.O., PEREIRA, B.L.C., VITAL, B.R., CARVALHO, A.M.M.L., TRUGILHO, P.F., DAMÁSIO, R.A.P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. *Revista Árvore*, v. 37, p. 557-566, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>

OLIVEIRA, A.C., PEREIRA, B.L.C., SALLES, T.T., CARNEIRO, A.C.O., LANA, A.Q. Análise de Risco Econômico de Dois Sistemas Produtivos de Carvão Vegetal. *Floresta e Ambiente*, v. 24, p. e20160265, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.026516>

PELLETIER, J.; HAMALAMBO, B.; TRAINOR, A.; BARRETT, C.B. How land tenure and labor relations mediate charcoal's environmental footprint in Zambia: Implications for sustainable energy transitions. *World Development*, v. 146, p. 105600, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105600>

PEREIRA, E.G.; MARTINS, M.A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A.C.O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, p. 592-600, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.028>

PINTO, R.G.D.; SZKLO, A.S.; RATHMANN, R. CO<sub>2</sub> emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. *Energy Policy*, v. 114, p. 380-393, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.040>

RAJ, D.S.; NAGARAJAN, S.V.; RAMAN, T.; VENKATACHALAM, P.; PARTHASARATHY, M. Remediation of textile effluents for water reuse: Decolorization and desalination using *Escherichia fergusonii* followed by detoxification with activated charcoal. *Journal of Environmental Management*, v. 277, p. 111406, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111406>

RIBEIRO, G.B.D.; CARNEIRO, A.C.O.; LANA, A.Q.; VALVERDE, S.R. Economic viability of four charcoal productive systems from Minas Gerais state. *Revista Árvore*, v. 44, p. e4401, 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-908820200000001>

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 143, p. 104670, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>

SANTOS, J.P. A sentinela sob a sombra das árvores: uma revisão integrativa da segurança do trabalho no setor florestal brasileiro. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 39, p. e27076, 2022. <http://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2022.v39.27076>

SCHETTINI, B.L.S.; JACOVINE, L.A.G.; TORRES, C.M.M.E.; CARNEIRO, A.C.O.; VILLANOVA, P.H.; ROCHA, S.J.S.S.; RUFINO, M.P.M.X.; SILVA, L.B.; CASTRO, R.V.O. Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance?. *Industrial Crops and Products*, v. 187/A, p. 115330, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115330>

SCHETTINI, B.L.S.; JACOVINE, L.A.G.; TORRES, C.M.M.E.; CARNEIRO, A.C.O.; VILLANOVA, P.H.; ROCHA, S.J.S.S.; RUFINO, M.P.M.X.; CASTRO, R.V.O. Wood and charcoal production in the kiln-furnace system: How do the costs and revenues variation affect economic feasibility?. *Revista Árvore*, v. 45, p. e4539, 2021.  
<https://doi.org/10.1590/1806-908820210000039>

SCHNEIDER, A.; BONHAGE, A.; HIRSCH, F.; RAAB, A.; RAAB, T. Hot spots and hot zones of soil organic matter in forests as a legacy of historical charcoal production. *Forest Ecology and Management*, v. 504, p. 119846, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119846>

SEDANO, F.; LISBOA, S.; DUNCANSON, L.; RIBEIRO, N.; SITO, A.; SAHAJPAL, R.; HURTT, G.; TUCKER, C. Monitoring intra and inter annual dynamics of forest degradation from charcoal production in Southern Africa with Sentinel – 2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 92, p. 102184, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102184>

SENYOLO, M.P.; LONG, T.B.; BLOK, V.; OMTA, O. How the characteristics of innovations impact their adoption: An exploration of climate-smart agricultural innovations in South Africa. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 3825-3840, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.019>

SOUZA, J.F.T.; PACCA, S.A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105517, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>

TEKLU, A.; SIMANE, B.; BEZABIH, M. Multiple adoption of climate-smart agriculture innovation for agricultural sustainability: Empirical evidence from the Upper Blue Nile Highlands of Ethiopia. *Climate Risk Management*, v. 39, p. 100477, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100477>

[UN] United Nations. *Siderurgia Sustentável desenvolve cadeia de produção com baixa emissão de poluentes*. 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/81394-siderurgia-sustentavel-desenvolve-cadeia-de-producao-com-baixa-emissao-de-poluente>. Acesso em: 23 mai. 2023.

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change. *Glasgow Climate Pact: Decision -/CMA.3 (advance unedited version)*. 2021. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3\\_auv\\_2\\_cover%20decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf). Acesso em: 23 mai. 2023.

WANG, C.; WALSH, S.D.C.; WENG, Z.; HAYNES, M.W.; SUMMERFIELD, D.; FEITZ, A. Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, Corrected Proof, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.041>

[WRI] World Resources Institute. *Climate Watch platform*. 2023. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/>. Acesso em: 23 mai. 2023.

[WRI] World Resources Institute. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard: Revised Edition*. 2004. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

XU, M.; LIN, B. Leveraging carbon label to achieve low-carbon economy: Evidence from a survey in Chinese first-tier cities. *Journal of Environmental Management*, v. 286, p. 112201, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112201>

ZULU, L.C.; RICHARDSON, R.B. Charcoal, livelihoods, and poverty reduction: Evidence from sub-Saharan Africa. *Energy for Sustainable Development*, v. 17, p. 127-137, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.007>

## CAPÍTULO III

### Ferramenta para cálculo do balanço de carbono em Sistemas Agroflorestais (SAFs)

#### Resumo

Os setores “Agropecuária” e “Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas” contribuem significativamente para as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), especialmente em nível nacional. Esses setores também atuam na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, por meio de seus sumidouros de carbono (solos e florestas) e pela adoção de práticas climaticamente inteligentes, como os Sistemas Agroflorestais (SAFs). A quantificação das remoções de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e das emissões de GEE é a base para a gestão estratégica e elaboração de planos de descarbonização. Diante disso, o objetivo foi desenvolver uma ferramenta para calcular as remoções de CO<sub>2</sub>, as emissões de GEE e o balanço de carbono nos SAFs. A ferramenta foi desenvolvida empregando o *software* Microsoft Excel. O limite organizacional definido foi o SAF e as fontes de emissão e remoção consideradas foram aquelas relacionadas à implantação e manutenção do SAF. Os GEE considerados foram dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). A ferramenta é composta por: i) uma página inicial, com orientações sobre o preenchimento das informações necessárias; ii) nove etapas de coleta de dados, nas quais o produtor deve inserir os dados para a realização dos cálculos; iii) um relatório, contendo os resultados de emissões de GEE, remoções de CO<sub>2</sub>, balanço de carbono e pegada de carbono dos produtos; e iv) cinco modelos de fichas para coleta de dados em campo. A ferramenta desenvolvida é uma tecnologia que auxilia na adaptação e mitigação climática do setor agrícola. O seu objetivo fundamental é auxiliar os produtores rurais na coleta de dados, cálculos, monitoramento e comunicação dos resultados gerados. A partir da utilização da ferramenta e da análise dos resultados o produtor pode traçar estratégias para aumentar as remoções de CO<sub>2</sub> e mitigar as emissões de GEE do seu sistema produtivo. Dentre as possíveis aplicações da ferramenta estão: i) a minimização de riscos de investimentos para a descarbonização do setor agrícola; ii) a sensibilização dos produtores quanto as questões climáticas; iii) o auxílio na tomada de decisão dos produtores; iv) o auxílio para a criação de estratégias para uma recompensa financeira justa aos produtores que adotam práticas agrícolas climaticamente inteligentes; e v) o auxílio na adequação às exigências do mercado em relação à pegada de carbono dos produtos. Os resultados obtidos são a base de uma gestão estratégica para descarbonização do setor agrícola. Espera-se que a utilização da ferramenta contribua para o alcance das metas estabelecidas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil e também dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

## 1. Introdução

O uso insustentável de energia, do solo e as alterações no uso do solo pelo homem causaram alterações climáticas e danos substanciais nos ecossistemas terrestres, que são cada vez mais irreversíveis (IPCC, 2023). Em 2019, 22% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (GEE) foram oriundas da agricultura, silvicultura e de outros usos do solo (IPCC, 2023). Nesse mesmo período, no Brasil, os setores “Agropecuária” e “Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas” contribuíram com 72% das emissões nacionais de GEE (SEEG, 2022).

Por outro lado, estes setores também atuam na mitigação das mudanças climáticas. As florestas e os solos são sumidouros de carbono, capazes de remover dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera (Schmidt et al., 2011, Yu et al., 2022), e estão relacionados especialmente com esses sistemas produtivos. Além disso, existem diferentes possibilidades para a redução das emissões de GEE nesses setores (Zahed et al., 2022). A adoção de práticas sustentáveis dentro do conceito de agricultura regenerativa ou agricultura de conservação contribuem, entre outros aspectos, para a adaptação e mitigação climática (Brown et al., 2022, Jat et al., 2023, Kolapo e Kolapo, 2023).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são práticas climaticamente inteligente que cumpre esse papel (Getnet et al., 2023). Sistema agroflorestal é o nome coletivo dado a sistemas e tecnologias de uso da terra que incluem, sequencial ou simultaneamente, plantas lenhosas perenes nas mesmas unidades de manejo de culturas agrícolas e/ou pecuária, visando aumentar benefícios sociais, econômicos e ambientais (FAO, 2015, Leakey, 2017).

A adoção de SAFs é uma das estratégias do Brasil para alcançar as metas estabelecidas na sua Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC (MAPA, 2021, Brazil, 2022). O país se comprometeu em reduzir suas emissões de GEE em 48% e 53% abaixo dos níveis de 2005, em 2025 e 2030, respectivamente, além de alcançar a neutralidade climática até 2050 (Talanoa, 2023). E qual o real potencial dos SAFs para contribuir com o alcance da ambiciosa meta brasileira?

A estocagem de carbono nos SAFs está fortemente relacionada a fatores como o tipo e a estrutura do sistema, a idade das árvores, a precipitação local e o uso da terra antes da sua implementação, sendo, portanto, muito variável (Getnet et al., 2023, Kumara T.M et al., 2023, Sharma et al., 2023). Neste sentido, o potencial e a real contribuição para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas de cada SAF são fatores de difícil mensuração.

A quantificação precisa das remoções de CO<sub>2</sub> e também das emissões de GEE resultantes da adoção de práticas agrícolas climaticamente inteligentes é a base para programas

de inserção e compensação de carbono desse setor (Guan et al., 2023). No cenário atual, a inclusão dessas estimativas na decisão do arranjo e manejo do SAF a ser implementado é fundamental. Além disso, o monitoramento das remoções de CO<sub>2</sub> e das emissões de GEE pode servir de referência para que o mercado recompense, de forma justa, os atores que contribuem para a mitigação dos impactos climáticos (Benício et al., 2023, Guan et al., 2023).

Verifica-se então a relevância do desenvolvimento de ferramentas robustas e escaláveis para a quantificação das remoções de CO<sub>2</sub> e das emissões de GEE dentro do setor agrícola e florestal. É urgente a criação dessas tecnologias, frente à preocupação global com as questões climáticas (Guan et al., 2023). Diante disso, o objetivo foi desenvolver uma ferramenta para calcular as remoções de CO<sub>2</sub>, as emissões de GEE e o balanço de carbono nos SAFs.

## 2. Material e métodos

A ferramenta de cálculo do balanço de carbono em Sistemas Agroflorestais (SAFs) foi desenvolvida empregando o *software* Microsoft Excel. O escopo da ferramenta foi estruturado pela definição dos limites organizacionais, limites de relatório, *tiers* e metodologias de cálculo das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub>.

O limite organizacional definido foi o próprio SAF e a consolidação das emissões e remoções de GEE seguiu a abordagem de controle operacional. Desta forma, as fontes de emissões e remoções de GEE consideradas na ferramenta foram aquelas às quais o proprietário do SAF possui controle operacional. Os limites de relatório estabelecidos incluem as emissões e remoções diretas de GEE, que são aquelas de propriedade ou controladas pela organização inventariante (ABNT, 2022) e que são definidas como Escopo 1 (WRI, 2004). Além disso, considerou-se também o consumo de energia elétrica da rede como fonte de emissões indiretas, definidas como emissões do Escopo 2 (WRI, 2015).

As fontes de emissão de GEE definidas foram: consumo de combustíveis fósseis e biocombustíveis; uso de corretivos do solo e fertilizantes nitrogenados; consumo de energia para irrigação e outros processos mecanizados e a presença de animais no SAF. Os diversos componentes vegetais do SAF e o solo, que são reservatórios de GEE e podem atuar como fontes de remoção de CO<sub>2</sub> ou emissão de GEE, também foram incluídos no escopo da ferramenta.

O cálculo das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub> pode ser realizado por três níveis de complexidades metodológicas – *Tiers*. O *Tier 1* é o mais básico, o *Tier 2* intermediário e o

*Tier 3* é o mais complexo (IPCC, 2019a). A ferramenta foi construída com metodologias fundamentadas nos *Tiers 2* e *3*, que geralmente fornecem resultados mais precisos (IPCC, 2019a).

Os GEE incluídos no escopo da ferramenta foram o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), devido às suas importâncias nos setores “Agropecuária” e “Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas” (MCTI, 2020d). De forma geral, as emissões dos GEE foram calculadas pelo produto dos dados de atividades e os fatores de emissão (IPCC, 2006a). O dado de atividade é uma medida quantitativa que expressa a magnitude de uma atividade humana que causa emissões de GEE durante um período de tempo e o fator de emissão é o coeficiente que quantifica a emissão de um GEE por unidade do dado de atividade (IPCC, 2019b). A emissão de cada GEE foi convertida à unidade padrão CO<sub>2</sub>e (dióxido de carbono equivalente), por meio da multiplicação pelo seu respectivo Potencial de Aquecimento Global (PAG) (Tabela 1).

**Tabela 1** – Potencial de Aquecimento Global (PAG) de cada gás de efeito estufa (GEE) incluído no escopo da ferramenta

GEE	PAG
CO <sub>2</sub>	1,0
CH <sub>4</sub> – fóssil	29,8
CH <sub>4</sub> – não fóssil	27,0
N <sub>2</sub> O	273,0

Fonte: IPCC, 2021

Além das emissões diretas e indiretas de GEE – entendidas como aquelas incluídas no cálculo do balanço de carbono – adotou-se o conceito de carbono biogênico, ou seja, oriundo de biomassa e não de origem fóssil (IPCC, 2019b, ABNT, 2022). As emissões de GEE biogênico antropogênico foram calculadas e reportadas separadamente. Estas emissões não foram incluídas no balanço de carbono do SAF, pois, uma vez oriundas de um ciclo biológico, são consideradas neutras.

As remoções de CO<sub>2</sub> foram calculadas por meio da biomassa dos componentes vegetais. A partir desse parâmetro, obtido por equações e fatores de incremento (coeficiente que expressa a quantidade de biomassa por unidades de área e tempo), estimou-se a quantidade total de CO<sub>2</sub> removido pelo SAF no período de um ano. As equações a nível de árvore individual por espécie e os fatores de incremento foram obtidos por meio de amplo levantamento bibliográfico. Diferentes equações foram selecionadas para cada bioma brasileiro, quando existentes na literatura.

O balanço de carbono é calculado pela expressão:  $B_{SAF} = \sum E_i + \sum R_j$ , em que:  $B_{SAF}$  = Balanço de carbono do SAF, em  $MgCO_2e \text{ ano}^{-1}$ ,  $E_i$  = Emissão total de GEE da fonte  $i$ , em  $MgCO_2e \text{ ano}^{-1}$ ,  $R_j$  = Remoção total de  $CO_2$  da fonte  $j$ , em  $MgCO_2e \text{ ano}^{-1}$ ,  $i$  = fontes de emissão de GEE, sendo combustão móvel, correção e fertilização do solo, irrigação e outros processos, solo e componentes vegetais do SAF,  $j$  = fontes de remoção de  $CO_2$ , sendo solo e componentes vegetais do SAF. As remoções de  $CO_2$  são apresentadas com valores menores que zero, ou seja, negativos. Desta forma, o balanço de carbono negativo indica que as remoções de  $CO_2$  superam as emissões de GEE e o balanço de carbono positivo é quando as emissões de GEE superam as remoções de  $CO_2$ .

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. A ferramenta

A ferramenta desenvolvida é composta por uma página inicial (Introdução), nove etapas de coleta de dados (Cadastrados, Combustão móvel, Correção e fertilização do solo, Energia para irrigação e outros processos, Pecuária, Solo, SAF (ano t-1), SAF (ano t) e Produção do SAF), um relatório e cinco modelos de fichas para coleta de dados em campo (Figura 1 e Apêndice E). Os resultados gerados e apresentados no relatório são as emissões de GEE, as remoções de  $CO_2$ , o balanço de carbono e a pegada de carbono dos produtos.

A estrutura e as etapas que compõem a ferramenta permitem que esta seja utilizada: i) durante o planejamento para implantação do SAF, onde o produtor pode realizar simulações que podem ser a base para as tomadas de decisão; ii) no momento de implantação do SAF, gerando resultados que serão base para o acompanhamento do desenvolvimento do SAF ao longo do tempo; e, também, iii) nos casos em que o SAF já está implementado.

O uso de cada etapa de coleta de dados é independente. Isso permite que o usuário tenha maior liberdade para utilização da ferramenta, podendo preencher apenas as etapas de seu interesse. Essa não dependência entre todas as etapas também possibilita a obtenção de resultados específicos e suas análises de forma individual.

As etapas que compõem a ferramenta são descritas a seguir.





**Figura 8** – Etapas, fontes de emissão de GEE e fontes de remoção de CO<sub>2</sub> que compõem a ferramenta para cálculo das remoções de CO<sub>2</sub>, das emissões de GEE, do balanço e da pegada de carbono nos Sistemas Agroflorestais (SAFs).

### 3.1.1. Introdução

A página inicial contém um menu, permitindo que o usuário da ferramenta acesse facilmente as abas de seu interesse, e algumas orientações para o preenchimento das etapas de coleta de dados.

### 3.1.2. Cadastros

Os cadastros são realizados a nível de produtor e propriedade rural. Além de informações básicas (como nome do produtor e da propriedade, endereço residencial, localização e tamanho da propriedade), o usuário deve selecionar qual o período de referência do inventário de GEE e fornecer dados sobre a precipitação e irrigação.

O período de referência é o período para o qual as emissões de GEE e as remoções de CO<sub>2</sub> serão quantificadas. Portanto, os dados de atividade devem corresponder ao período selecionado. Na utilização da ferramenta, indica-se que o período de referência tenha a duração de um ano (12 meses), podendo ou não ser de 1º de janeiro à 31 de dezembro. Desta forma, os resultados gerados serão em termos de emissões e remoções anuais de GEE.

Os dados de precipitação média anual, em milímetros (mm), e, caso haja, o tipo de irrigação (aspersão, gotejamento, superficial ou outro) e a quantidade média de água utilizada, em mm ano<sup>-1</sup>, definem o tipo de clima ao qual o SAF está submetido. O clima úmido corresponde à situação em que a soma da precipitação e da quantidade de água da irrigação é igual ou superior a 1.000,0 mm ano<sup>-1</sup>. Se a quantidade total de água é inferior a esse valor, o clima é considerado seco (IPCC, 2019c).

A definição do clima ao qual o SAF está submetido influencia o cálculo das emissões de GEE pela utilização de corretivos do solo e fertilizantes nitrogenados. Por isso, o fornecimento dessas informações é obrigatório.

### 3.1.3. Combustão móvel

A fonte de emissão “Combustão móvel” está relacionada ao consumo de combustíveis fósseis e biocombustíveis para a realização das atividades de implantação e manutenção do SAF. Os combustíveis incluídos nessa etapa foram o diesel, o etanol, a gasolina e o gás natural veicular (GNV) que, quando utilizados, geram emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O.

As misturas comerciais do diesel e da gasolina possuem determinadas quantidades de biocombustíveis (Apêndice F), que foram descontadas, para que a emissão de cada combustível e biocombustível fosse calculada com seus respectivos fatores de emissão (Tabela 2). As

emissões de CO<sub>2</sub> pela queima dos biocombustíveis são biogênicas e, por isso, foram reportadas separadamente.

**Tabela 2** – Unidade dos dados de atividade (Unidade) e fatores de emissão para cada gás de efeito estufa (FE), em kgGEE unidade<sup>-1</sup>, relacionados à combustão móvel dos combustíveis fósseis e biocombustíveis

Combustível Biocombustível	Unidade	FE (kgGEE unidade <sup>-1</sup> )		
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Diesel	Litros	2,60	0,00014	0,00014
Etanol	Litros	1,46 <sup>c</sup>	0,00038	0,00001
Gasolina	Litros	2,21	0,00081	0,00026
Gás Natural Veicular (GNV)	m <sup>3</sup>	2,00	0,00339	0,00011
Biodiesel (B100) <sup>a</sup>	Litros	2,43 <sup>c</sup>	0,00033	0,00002
Etanol Anidro <sup>b</sup>	Litros	1,53 <sup>c</sup>	0,00022	0,00001

<sup>a</sup>Biocombustível presente na mistura comercial do diesel

<sup>b</sup>Biocombustível presente na mistura comercial da gasolina

<sup>c</sup>Emissão biogênica: oriunda de um ciclo biológico e não incluída no balanço de carbono do SAF

Fonte: IPCC, 2006b, IPCC, 2006c, MMA, 2014, EPE, 2022

### 3.1.4. Correção e fertilização do solo

O uso de insumos para correção e fertilização do solo contribuem para as emissões de GEE agrícolas (Alam et al., 2023). As emissões diretas estão relacionadas a todos os insumos utilizados e as emissões indiretas (‘volatilização e deposição atmosférica’ e ‘lixiviação ou escoamento superficial’) se associam à utilização dos fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos. As emissões diretas e indiretas pela utilização de calcário e fertilizantes nitrogenados (sintéticos e orgânicos) foram calculadas de acordo com metodologias específicas (IPCC, 2019c).

O dado de atividade para essa fonte de emissão é a quantidade de insumo utilizada durante o período de referência, em quilos (kg). O tipo e a quantidade do GEE emitido dependerá da composição do insumo (Tabela 3) e do clima da região onde foi aplicado (Tabela 4). A utilização de calcário (calcítico e dolomítico) gera emissões de CO<sub>2</sub> e os fertilizantes nitrogenados podem emitir N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>.

**Tabela 3** – Gases de efeito estufa (GEE) emitidos por tipo de insumo, quantidade de nitrogênio (%N), em %, e base do fertilizante (Base) por tipo de fertilizante nitrogenado

<b>Insumo</b>	<b>GEE</b>	<b>%N</b>	<b>Base</b>
<i>Fertilizantes nitrogenados sintéticos<sup>a</sup></i>			
Ureia	CO <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> O	44,0	Ureia
Ureia Formaldeído	CO <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> O	35,0	Ureia
Ureia Sulfato de Amônio	CO <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> O	40,0	Ureia
Água Amoniacal	N <sub>2</sub> O	10,0	À base de amônio
Amônia Anidra	N <sub>2</sub> O	82,0	À base de amônio
Cianamida de Cálcio	N <sub>2</sub> O	18,0	À base de amônio
Cloreto de Amônio	N <sub>2</sub> O	25,0	À base de amônio
Fosfato Diamônico (DAP)	N <sub>2</sub> O	16,0	À base de amônio
Fosfato Monoamônico (MAP)	N <sub>2</sub> O	9,0	À base de amônio
Fosfossulfato de Amônio	N <sub>2</sub> O	13,0	À base de amônio
Nitrato de Amônio	N <sub>2</sub> O	32,0	À base de amônio e nitrato
Nitrato de Amônio e Cálcio	N <sub>2</sub> O	20,0	À base de amônio e nitrato
Nitrato de Cálcio	N <sub>2</sub> O	14,0	À base de nitrato
Nitrato de Potássio	N <sub>2</sub> O	13,0	À base de nitrato
Nitrato de Sódio	N <sub>2</sub> O	15,0	À base de nitrato
Nitrato Duplo de Sódio e Potássio	N <sub>2</sub> O	15,0	À base de nitrato
Nitrofosfato	N <sub>2</sub> O	14,0	À base de nitrato
Nitrossulfocálcio	N <sub>2</sub> O	25,0	À base de amônio e nitrato
Solução Nitrogenada	N <sub>2</sub> O	21,0	À base de amônio e nitrato
Sulfato de Amônio	N <sub>2</sub> O	20,0	À base de amônio
Sulfonitrato de Amônio	N <sub>2</sub> O	25,0	À base de amônio e nitrato
Sulfonitrato de Amônio e Magnésio	N <sub>2</sub> O	19,0	À base de amônio e nitrato
Superfosfato Simples Amoniado	N <sub>2</sub> O	1,0	À base de amônio
Superfosfato Triplo Amoniado	N <sub>2</sub> O	1,0	À base de amônio
<i>Fertilizantes nitrogenados orgânicos<sup>b</sup></i>			
Composto orgânico	N <sub>2</sub> O	0,8	-
Esterco bovino	N <sub>2</sub> O	3,1	-
Esterco de aves	N <sub>2</sub> O	4,0	-
Esterco de equinos	N <sub>2</sub> O	1,8	-
Esterco de ovinos	N <sub>2</sub> O	2,8	-
Esterco de suínos	N <sub>2</sub> O	3,2	-
Palha de café	N <sub>2</sub> O	1,5 <sup>c</sup>	-

<sup>a</sup>Fonte: Alcarde et al., 1998

<sup>b</sup>Fonte: Ribeiro et al., 1999

<sup>c</sup>Fonte: Matiello et al., 2010

**Tabela 4** – Tipo de emissão (Emissão), unidades, especificações e valores dos parâmetros utilizados para a estimativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE) por tipo de insumo

Insumo	Emissão	Parâmetro	Unidade	Especificação	Valor	Fonte
Calcário calcítico	Direta	Fator de emissão	Mg C (Mg insumo) <sup>-1</sup>	-	0,120	IPCC, 2006d
Calcário dolomítico	Direta	Fator de emissão	Mg C (Mg insumo) <sup>-1</sup>	-	0,130	IPCC, 2006d
Ureia	Direta	Fator de emissão	Mg C (Mg insumo) <sup>-1</sup>	-	0,200	IPCC, 2006d
Fertilizantes sintéticos	Direta	Fator de emissão	kg N <sub>2</sub> O-N (kg N) <sup>-1</sup>	Clima úmido	0,016	IPCC, 2019c
				Clima seco	0,005	IPCC, 2019c
Fertilizantes orgânicos	Direta	Fator de emissão	kg N <sub>2</sub> O-N (kg N) <sup>-1</sup>	Clima úmido	0,006	IPCC, 2019c
				Clima seco	0,005	IPCC, 2019c
Fertilizantes sintéticos e orgânicos	Indireta - Volatilização e deposição atmosférica	Fator de emissão	kg N <sub>2</sub> O-N (kg NH <sub>3</sub> -N+NO <sub>x</sub> -N volatilizado) <sup>-1</sup>	Clima úmido	0,014	IPCC, 2019c
				Clima seco	0,005	IPCC, 2019c
Fertilizantes sintéticos	Indireta - Volatilização e deposição atmosférica	Fração de fertilizante sintético que volatiliza como NH <sub>3</sub> e NO <sub>x</sub>	kg NH <sub>3</sub> -N+NO <sub>x</sub> -N (kg N aplicado) <sup>-1</sup>	Ureia	0,150	IPCC, 2019c
				À base de amônio	0,080	IPCC, 2019c
				À base de nitrato	0,010	IPCC, 2019c
				À base de amônio e nitrato	0,050	IPCC, 2019c
Fertilizantes orgânicos	Indireta - Volatilização e deposição atmosférica	Fração de fertilizante orgânico que volatiliza como NH <sub>3</sub> e NO <sub>x</sub>	kg NH <sub>3</sub> -N+NO <sub>x</sub> -N (kg N aplicado) <sup>-1</sup>	-	0,210	IPCC, 2019c
Fertilizantes sintéticos e orgânicos	Indireta - Lixiviação ou escoamento superficial	Fator de emissão	kg N <sub>2</sub> O-N (kg N lixiviado/escoado) <sup>-1</sup>	-	0,011	IPCC, 2019c
Fertilizantes sintéticos e orgânicos	Indireta - Lixiviação ou escoamento superficial	Perdas de N por lixiviação/escoamento	kg N lixiviado/escoado (kg N aplicado) <sup>-1</sup>	Clima úmido	0,240	IPCC, 2019c
				Clima seco	0,000	IPCC, 2019c

### 3.1.5. Energia para irrigação e outros processos

A geração e consumo de energia estacionária para irrigação e qualquer outra atividade relacionada ao SAF também geram emissões de GEE. As fontes de energia consideradas na ferramenta são a energia elétrica da rede (Sistema Interligado Nacional - SIN), o carvão vegetal, o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), a lenha e os resíduos vegetais (fontes primárias de energia geradas na agricultura, como casca de arroz, palha de café e lã morta de algodão) (Tabela 5).

As emissões pela compra e consumo de energia elétrica da rede são calculadas considerando fatores de emissão mensais (Apêndice F). O cálculo das emissões do carvão vegetal, da lenha e dos resíduos vegetais foi realizado adotando-se o conceito de carbono biogênico.

**Tabela 5** – Unidade dos dados de atividade (Unidade) e fatores de emissão para cada gás de efeito estufa (FE), em kgGEE unidade<sup>-1</sup>, relacionados à geração e consumo de energia estacionária para irrigação e outros processos

Fonte de energia	Unidade	FE (kgGEE unidade <sup>-1</sup> )		
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Energia elétrica da rede	MWh	Apêndice F	-	-
Diesel	Litros	2,63	0,0004	0,00002
Biodiesel (B100) <sup>a</sup>	Litros	2,46 <sup>b</sup>	0,0003	0,00002
Carvão vegetal	Mg	2.885,89 <sup>b</sup>	5,4093	0,02705
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	Mg	2.930,93	0,2324	0,00465
Lenha	Mg	1.451,49 <sup>b</sup>	3,8937	0,05192
Resíduos vegetais	Mg	1.161,16 <sup>b</sup>	3,4800	0,04640

<sup>a</sup>Biocombustível presente na mistura comercial do diesel

<sup>b</sup>Emissão biogênica: oriunda de um ciclo biológico e não incluída no balanço de carbono do SAF

Fonte: IPCC, 2006c, MCTI, 2020a, EPE, 2022

### 3.1.6. Pecuária

A pecuária é uma importante fonte de emissão de GEE (Hemingway et al., 2023). A presença de animais no SAF contribui para a emissão de GEE por meio da fermentação entérica dos animais ruminantes e do tratamento de dejetos. A fermentação entérica é uma importante fonte de emissões de CH<sub>4</sub>, enquanto no tratamento de dejetos ocorrem emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, dependendo do sistema de manejo adotado. As emissões de N<sub>2</sub>O pelo manejo de dejetos também ocorrem de forma direta e indireta. As emissões indiretas ocorrem pela perda de nitrogênio por volatilização, como NH<sub>3</sub> e NO<sub>x</sub>, ou por lixiviação e escoamento (IPCC, 2019d).

Os dados de atividade para o cálculo das emissões são a quantidade de animais de cada categoria que permaneceu no SAF ao longo do período de referência e o sistema de manejo de

dejetos adotado. Além dessas informações, as emissões de GEE são calculadas por fatores específicos de cada estado brasileiro.

Os fatores de emissão e demais parâmetros para o cálculo das emissões foram obtidos em diferentes fontes (Tabelas 6 e 7). Quando necessário, a classificação climática dos estados brasileiros assumida foi a mesma adotada na Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima (MCTI, 2020c).

**Tabela 6** – Fatores de emissão direta (FE), em kg N<sub>2</sub>O-N (kg N excretado)<sup>-1</sup>, por sistema de manejo de dejetos dos animais

Sistema de manejo	FE <sup>b</sup>
Deposição em pastagem <sup>a</sup>	0,004 <sup>c</sup> e 0,003 <sup>c</sup>
Difusão diária	0,000 <sup>d</sup>
Armazenamento sólido	0,010
Armazenamento sólido (coberto/compactado)	0,010
Armazenamento sólido (adição de agente de volume)	0,005
Armazenamento sólido (aditivos)	0,005
Lote seco	0,020
Líquido/Chorume (com cobertura de crosta natural)	0,005
Líquido/Chorume (sem cobertura de crosta natural)	0,000 <sup>d</sup>
Líquido/Chorume (coberto)	0,005
Lagoa anaeróbica descoberta	0,000 <sup>d</sup>
Armazenamento em poços abaixo dos confinamentos de animais	0,002
Digestor anaeróbico	0,001
“Cama profunda” de bovinos e suínos, sem mistura	0,010
“Cama profunda” de bovinos e suínos, mistura ativa	0,070
Compostagem em vaso	0,006
Compostagem em pilha estática	0,010
Compostagem em leiras intensivas	0,005
Compostagem em leiras passivas	0,005
Estrume de frango com litter	0,001
Estrume de frango sem litter	0,001
Tratamento aeróbico, com sistemas de aeração natural	0,010
Tratamento aeróbico, com sistemas de aeração forçada	0,005

<sup>a</sup>O cálculo das emissões indiretas de N<sub>2</sub>O pela deposição dos dejetos em pastagem utiliza os fatores de emissão de fertilização orgânica (Tabela 4)

<sup>b</sup>Fonte: IPCC, 2019d

<sup>c</sup>O fator de emissão a ser adotado dependerá da categoria do animal. Fonte: IPCC, 2019c

<sup>d</sup>As emissões de N<sub>2</sub>O durante o armazenamento e tratamento dos dejetos são consideradas insignificantes (IPCC, 2019d)

**Tabela 7** – Fonte dos fatores de emissão e demais parâmetros para cálculo das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pela fermentação entérica e pelo manejo de dejetos dos animais

Categoria	Sub-categoria	Fermentação entérica		Manejo de dejetos	
		CH <sub>4</sub>		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Aves	Galinhas e poedeiras	-			
	Pintos, frangos e galos	-	IPCC, 2006e: Table 10.15		MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Codornas	-			
Caprinos	Sistemas de alta produtividade (50 kg)		IPCC, 2019d: Table 10.10	IPCC, 2006e: Table 10.15	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Sistemas de baixa produtividade (28 kg)				
Gado de corte	Bovinos < 1 ano		MCTI, 2020b: Tabela 29	MCTI, 2020c: Tabela 45	
	Bovinos > 1 ano < 2 anos		MCTI, 2020b: Tabela 30	MCTI, 2020c: Tabela 46	
	Touros > 2 anos		MCTI, 2020b: Tabela 25	MCTI, 2020c: Tabela 41	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Machos de corte > 2 anos (não confinados)		MCTI, 2020b: Tabela 26	MCTI, 2020c: Tabela 42	
	Fêmeas de corte > 2 anos (não confinados)		MCTI, 2020b: Tabela 27	MCTI, 2020c: Tabela 43	
	Outros animais > 2 anos (confinados)		MCTI, 2020b: Tabela 28	MCTI, 2020c: Tabela 44	
Gado de leite	Alta produção (> 5,48 litros leite dia <sup>-1</sup> )		MCTI, 2020b: Tabela 31	MCTI, 2020c: Tabela 47	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Baixa produção (< 5,48 litros leite dia <sup>-1</sup> )		MCTI, 2020b: Tabela 32	MCTI, 2020c: Tabela 48	
Ovinos	Sistemas de alta produtividade (40 kg)		IPCC, 2019d: Table 10.10	IPCC, 2006e: Table 10.15	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Sistemas de baixa produtividade (31 kg)				
Suínos	Reprodutor	Industrial	IPCC, 2019d: Table 10.10	MCTI, 2020c: Tabela 49	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
		Subsistência		MCTI, 2020c: Tabela 50	
	Aleitamento/creche	Industrial	IPCC, 2019d: Table 10.10	MCTI, 2020c: Tabela 51	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
Terminação	Subsistência		MCTI, 2020c: Tabela 52		
	Industrial	IPCC, 2019d: Table 10.10	MCTI, 2020c: Tabela 53	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22	
		Subsistência	IPCC, 2019d: Table 10.10	MCTI, 2020c: Tabela 54	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
Outros animais	Asininos		IPCC, 2019d: Table 10.10	IPCC, 2006e: Table 10.15	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Avestruz		IPCC, 2019d: Table 10.10	-	-
	Bubalinos		IPCC, 2019d: Table 10.11	IPCC, 2006e: Table 10.14	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Camelo		IPCC, 2019d: Table 10.10	-	-
	Equinos		IPCC, 2019d: Table 10.10	IPCC, 2006e: Table 10.15	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Lhamas e alpacas		IPCC, 2019d: Table 10.10	-	-
	Muares		IPCC, 2019d: Table 10.10	IPCC, 2006e: Table 10.15	MCTI, 2020c: Tabela 30 e IPCC, 2019d: Table 10.22
	Veado		IPCC, 2019d: Table 10.10	-	-



### 3.1.7. Solo

O solo é um importante reservatório de carbono e as atividades antrópicas favorecem que esse componente atue como fonte de emissão ou remoção de GEE (Zhang, et al., 2021, Naorem et al., 2023). O monitoramento da resposta do solo às atividades de manejo adotadas é realizado pelas análises de solo. Estas análises devem ser realizadas no início – Ano (t-1) – e no final – Ano (t) – do período de referência do inventário de GEE. Dessa forma, as emissões ou remoções por esse componente serão corretamente alocadas dentro do período temporal do inventário.

A emissão ou remoção de CO<sub>2</sub> é estimada por meio do Carbono Orgânico Total (COT) e da densidade do solo pela equação:  $E|R = -\{[(COT_t * D_t * E_t)/10] - [(COT_{t-1} * D_{t-1} * E_{t-1})/10]\} * A * (44/12)$ , em que: E|R = Emissão ou remoção total, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> (resultados negativos indicam remoção e resultados positivos indicam emissão), COT<sub>t</sub> = Carbono Orgânico Total no final do período de referência, em g kg<sup>-1</sup>, D<sub>t</sub> = Densidade do solo no final do período de referência, em kg dm<sup>-3</sup>, E<sub>t</sub> = Espessura da camada de solo das análises realizadas no final do período de referência, em cm, COT<sub>t-1</sub> = Carbono Orgânico Total no início do período de referência, em g kg<sup>-1</sup>, D<sub>t-1</sub> = Densidade do solo no início do período de referência, em kg dm<sup>-3</sup>, E<sub>t-1</sub> = Espessura da camada de solo das análises realizadas no início do período de referência, em cm, A = área englobada pela análise de solo, em ha, 44/12 = fator de conversão de C para CO<sub>2</sub>.

Caso as análises de solo não contenham os valores de COT e apenas os valores de Matéria Orgânica do Solo (MO), a conversão de MO para COT deve ser realizada pela equação:  $COT = MO / 1,724$ , em que: COT = Carbono Orgânico Total, em g kg<sup>-1</sup>, MO = Matéria Orgânica do Solo, em g kg<sup>-1</sup> (Bettiol et al., 2023).

### 3.1.8. Sistema Agroflorestal (SAF)

Os componentes vegetais do SAF, assim como os solos, são reservatórios de carbono e podem atuar como fontes de emissão ou remoção de GEE. O escopo da ferramenta inclui como componentes vegetais do SAF o dossel e árvores emergentes, o sub-bosque, as plantas herbáceas e regenerantes, as cactáceas cultivadas e a necromassa.

As culturas agrícolas anuais e a pastagem não foram incluídas no escopo da ferramenta, pois a biomassa incorporada nesses componentes vegetais também será perdida (pela colheita ou pastoreio dos animais) dentro do período do inventário de GEE. Ou seja, no

período de um ano, o balanço de carbono desses componentes vegetais será neutro (as remoções são equivalentes às emissões).

A contribuição de longo prazo desses cultivos para a remoção de CO<sub>2</sub> está relacionada às práticas de manejos adotadas, que influenciam na quantidade de carbono estocado no solo (Egan et al., 2018, Anantha et al., 2022, Zhang et al., 2022) e também na serapilheira. Desta forma, no escopo da ferramenta, a contribuição das práticas agrícolas para o balanço de carbono do SAF será refletida nos componentes “Solo” e “Serapilheira”.

A estimativa da remoção ou emissão anual de GEE pelos componentes vegetais do SAF deve ser feita, preferencialmente, pela diferença do estoque total de carbono no início e no final do período de referência. A estimativa do estoque total de carbono é feita a partir do inventário florestal. Para isso, a ferramenta contém duas abas: “SAF (ano t-1)” e “SAF (ano t)”.

Estas abas contemplam a possibilidade de um inventário florestal tipo censo ou por amostragem (máximo 20 parcelas). Neste último caso, o usuário deve informar o número e o tamanho das parcelas lançadas. No caso do inventário tipo censo, o usuário também deve preencher os campos de tamanho da parcela com o tamanho total da área do SAF, em m<sup>2</sup>.

O primeiro resultado apresentado na ferramenta é a biomassa seca – média por parcela, em kg parcela<sup>-1</sup>, por hectare, em Mg ha<sup>-1</sup>, e total, em Mg. A transformação de biomassa seca para carbono é feita pela multiplicação do teor de carbono (0,46 para serapilheira (Ometto et al., 2006) e 0,47 para os demais componentes vegetais do SAF (IPCC, 2006f)) e a transformação para CO<sub>2</sub>e é feita pela multiplicação do fator de conversão de C para CO<sub>2</sub> (44/12).

A etapa “SAF (ano t-1)” deve ser utilizada para a realização do primeiro inventário de GEE do SAF. Neste caso, a remoção anual será calculada pela equação:  $R_{SAF(t-1)} = -(C_{SAF(t-1)} / Idade_{SAF}) * (44/12)$ , em que:  $R_{SAF(t-1)}$  = Remoção total do SAF no período ‘t-1’, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>,  $C_{SAF(t-1)}$  = Estoque total de carbono nos diversos componentes vegetais do SAF no período ‘t-1’, em MgC,  $Idade_{SAF}$  = Idade do SAF, em anos, 44/12 = fator de conversão de C para CO<sub>2</sub>. Desta forma, o resultado obtido será quanto em média o SAF contribuiu anualmente para acumular todo o estoque de carbono que possui no período ‘t-1’ (tempo atual de realização do primeiro inventário de GEE). Essa adaptação é necessária, pois, sendo o primeiro inventário florestal realizado, não se tem o estoque total de carbono no ano anterior.

O segundo inventário e os posteriores devem ser realizados na aba “SAF (ano t)”. Nesta, o usuário da ferramenta conseguirá reportar os dados de estoque de carbono do ano anterior e também calcular o estoque de carbono do tempo atual. Desta forma, a remoção ou a emissão anual de CO<sub>2</sub> dos diferentes componentes do SAF será estimada pela equação:

$E|R_{SAF(t)i} = -(C_{SAF(t)i} - C_{SAF(t-1)i}) * (44/12)$ , em que:  $E|R_{SAF(t)i}$  = Emissão ou remoção do componente vegetal  $i$  no período ‘t’, em  $MgCO_2e\text{ ano}^{-1}$  (resultados negativos indicam remoção e resultados positivos indicam emissão),  $C_{SAF(t)i}$  = Estoque total de carbono no componente vegetal  $i$  no período ‘t’, em MgC,  $C_{SAF(t-1)i}$  = Estoque total de carbono no componente vegetal  $i$  no período ‘t-1’, em MgC,  $44/12$  = fator de conversão de C para  $CO_2$ ,  $i$  = componentes vegetais do SAF, sendo dossel e árvores emergentes, sub-bosque, plantas herbáceas e regenerantes, cactáceas e necromassa,  $t$  = tempo, em anos. A remoção ou emissão total será a soma dos resultados obtidos para cada componente.

### 3.1.8.1. Dossel e árvores emergentes

O estrato “Dossel e árvores emergentes” corresponde aos indivíduos arbóreos com altura superior a 1,3 metros e as palmeiras presentes no SAF. A biomassa seca é estimada por equações a nível de árvore individual por espécie (Apêndice G). A ferramenta também inclui equações gerais por bioma, caso não haja equação específica para a espécie cultivada no SAF.

A biomassa seca total é calculada incluindo a biomassa acima e abaixo do solo. Algumas equações geram resultados em termos de biomassa seca acima do solo (tronco, galhos e folhas). Nestes casos, os resultados gerados foram acrescidos de uma estimativa de biomassa abaixo do solo, a partir do fator 0,37 que corresponde à relação de biomassa abaixo do solo e biomassa acima do solo (IPCC, 2006f).

A estimativa de biomassa a partir de equações alométricas é um diferencial da ferramenta desenvolvida. Outras ferramentas de cálculo (Bernal et al., 2018, Assad et al., 2020) consideram fatores de incremento para estimar as remoções de  $CO_2$  em SAFs.

Existem diferentes técnicas para estimar biomassa florestal, entre métodos destrutivos e não destrutivos (Soares et al., 2017, Pati et al., 2022, Fernandes et al., 2023). O uso de equações alométricas e fatores de incremento são duas abordagens não destrutivas. Porém, ao incluir variáveis dendrométricas das árvores das quais se deseja estimar a biomassa, espera-se que as equações alométricas forneçam resultados com maior acurácia.

### 3.1.8.2. Sub-bosque

No escopo da ferramenta, o sub-bosque foi definido como os indivíduos arbóreos com altura entre 0,3 e 1,3 metros. Nestes casos, considerou-se apenas a biomassa do fuste e das raízes. A expressão utilizada para cálculo da biomassa seca considerou o volume de um cilindro e um fator de forma:  $B_{sub} = \{[(\pi * (d^2)) / 4] * h\} * f * D * (1 + R)$ , em que:  $B_{sub}$  = biomassa seca dos

indivíduos arbóreos do sub-bosque,  $d$  = diâmetro à altura do solo, em m,  $h$  = altura total, em m,  $f$  = fator de forma,  $D$  = densidade básica da madeira, em  $\text{kg m}^{-3}$ ,  $R$  = relação biomassa abaixo/acima do solo.

A estimativa do volume foi feita considerando um fator de forma de 0,74 (Apêndice H). A média de densidade básica da madeira utilizada foi  $613,10 \text{ kg m}^{-3}$ , calculada considerando espécies de clima tropical e extratropical (adaptado de Zanne et al., 2009). A relação de biomassa abaixo do solo e biomassa acima do solo considerada foi 0,37 (IPCC, 2006f).

### 3.1.8.3. Herbáceas e regenerantes

O componente herbáceo e de plantas menores, oriundas da regeneração natural, também são reservatórios de carbono (Chamizo et al., 2017, Marañón-Jiménez et al., 2022). Em determinadas situações esse estrato pode representar uma parcela importante do estoque total de carbono de uma área (Zelarayán et al., 2015, Landuyt et al., 2019). No escopo da ferramenta, as plantas herbáceas e regenerantes foram definidas como aquelas de caule não lenhoso e indivíduos arbóreos com altura inferior a 30 centímetros.

A quantificação da biomassa seca dessas plantas deve ser realizada por meio do método destrutivo, seguindo as etapas: i) lançamento de subparcelas com o auxílio de um gabarito (geralmente de  $1,0 \text{ m}^2$ ); ii) coleta de todos os indivíduos de caule não lenhoso e indivíduos arbóreos com altura inferior a 30 cm; iii) pesagem de todo o material coletado; iv) retirada de uma amostra de cada subparcela; v) secagem das amostras.

A partir da massa úmida do material coletado na subparcela, da massa úmida das amostras e da massa seca das amostras, aplica-se o método da proporcionalidade para estimar a biomassa seca (Torres et al., 2013). Posteriormente, as estimativas são extrapoladas para hectares.

### 3.1.8.4. Cactáceas

As cactáceas foram subdivididas nas classes “Palma forrageira” e “Outras cactáceas”. Para ambas classes, a biomassa seca total na parcela é calculada considerando-se o incremento médio anual de biomassa verde por planta, a biomassa verde colhida no período de referência do inventário de GEE e o teor de matéria seca (Tabela 8). No caso da palma forrageira, para o cálculo da biomassa colhida, é necessário informar o número de cladódios por planta por ano (qtde planta<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Para as outras cactáceas, a biomassa colhida deve ser informada em quilos de biomassa verde por planta por ano ( $\text{kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

**Tabela 8** – Nome popular, incremento médio anual de massa verde, em kg planta<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e em kg cladódio<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, e teor de matéria seca (MS), em %, por espécie de cactácea cultivada

Espécie	Nome popular	Incremento massa verde		MS (%)	Fonte
		kg planta <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	kg cladódio <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>		
<i>Palma forrageira</i>					
<i>Opuntia ficus-indica</i> L. Mill	Gigante	7,91	0,91	7,47*	Oliveira et al., 2011 e Silva et al., 2014
<i>Opuntia</i> sp.	Redonda	8,53	0,69	8,06*	Oliveira et al., 2011 e Silva et al., 2014
<i>Nopalea cochenillifera</i> Salm-Dyck	Miúda	9,34	0,18	10,09*	Oliveira et al., 2011 e Silva et al., 2014
<i>Outras cactáceas</i>					
<i>Cereus jamacaru</i> DC.	Mandacaru; jamacaru; cardeiro	0,67	-	12,20	Cavalcanti e Resende, 2007
<i>Pilosocereus pachycladus</i> F.Ritter	Facheiro; facheiro-azul; mandacaru-de-facho	0,41	-	7,42	Cavalcanti e Resende, 2007
<i>Xiquexique gounellei</i> (F.A.C.Weber) Lavor & Calvente	Xique-xique	0,50	-	7,06	Cavalcanti e Resende, 2007
<i>Melocactus bahiensis</i> (Britton & Rose) Luetzelb.	Coroa-de-frade	0,22	-	7,34	Cavalcanti e Resende, 2007

\*Adaptado (média aritmética simples dos valores encontrados)

### 3.1.8.5. Necromassa

Os resíduos lenhosos grosseiros (*Coarse Woody Debris – CWDs*), a serapilheira e as árvores mortas em pé (*snags*) também são reservatórios de carbono (Martin et al., 2021).

#### 3.1.8.5.1. Resíduos lenhosos grosseiros (CWDs)

Os CDWs com diâmetro  $\geq 5$  cm devem ser medidos e incluídos nesta categoria do inventário de GEE. Esses componentes podem ser classificados segundo o seu grau de decomposição em: i) Materiais recém caídos no solo com folhas e casca intactas, ii) Materiais semelhantes aos da classe 1, porém com a casca apresentando podridão ou descamação, iii) Materiais com elevado estágio de decomposição e apresentando alguma resistência ao serem quebrados, e iv) Materiais podres, friáveis e sem resistência ao serem quebrados (Villanova, 2021).

A necromassa dos CWDs é quantificada pelo produto entre o volume, em  $m^3$ , e a densidade aparente, em  $kg\ m^{-3}$  (Tabela 9). O volume dos CWDs é estimado pelo método de *Smalian*, pela expressão:  $V = [(AS_1 + AS_2)/2] * L$ , em que:  $V$  = volume total do CWD, em  $m^3$ ,  $AS_1$  = área seccional obtida em uma extremidade do CWD, em  $m^2$ ,  $AS_2$  = área seccional obtida na outra extremidade do CWD, em  $m^2$ ,  $L$  = comprimento do CWD, em m.

**Tabela 9** – Densidade aparente ( $\rho$ ), em  $kg\ m^{-3}$ , de cada classe de decomposição dos resíduos lenhosos grosseiros (CWDs)

Classe de decomposição	$\rho$
Materiais recém caídos no solo com folhas e casca intactas	620,00
Materiais semelhantes aos da classe 1, porém com a casca apresentando podridão ou descamação	500,00
Materiais com elevado estágio de decomposição e apresentando alguma resistência ao serem quebrados	390,00
Materiais podres, friáveis e sem resistência ao serem quebrados	370,00

Fonte: Villanova, 2021 (valores para Floresta Estacional Semidecidual)

#### 3.1.8.5.2. Serapilheira

A quantificação da necromassa seca da serapilheira deve ser realizada por meio do método direto, de forma semelhante às etapas propostas para o componente “Herbáceas e regenerantes”: i) lançamento de subparcelas com o auxílio de um gabarito (geralmente de  $1,0\ m^2$ ); ii) coleta de todo o material vegetal acima do solo dentro da subparcela, incluindo folhas, raízes, frutos e resíduos lenhosos com diâmetro inferior a 5 cm; iii) pesagem de todo o material coletado; iv) retirada de uma amostra de cada subparcela; v) secagem das amostras.

A partir da massa úmida do material coletado na subparcela, da massa úmida das amostras e da massa seca das amostras, aplica-se o método da proporcionalidade para estimar a necromassa seca (Torres et al., 2013). Posteriormente, as estimativas são extrapoladas para hectares.

### 3.1.8.5.3. Snags

A estimativa de necromassa das árvores mortas em pé inclui o fuste e as raízes e é feita considerando que: i) o fator de forma é 0,74 (Apêndice H), ii) a densidade aparente desse componente é 455,0 kg m<sup>-3</sup> (Villanova, 2017), iii) a relação de biomassa abaixo do solo e biomassa acima do solo é 0,37 (IPCC, 2006f). A expressão geral para o cálculo é  $N_{snags} = \{[(\pi \cdot (d^2)/4) \cdot h] \cdot f\} \cdot \rho \cdot (1+R)$ , em que:  $N_{snags}$  = necromassa seca das árvores mortas em pé,  $d$  = diâmetro à altura do solo, em m,  $h$  = altura total da árvore, em m,  $f$  = fator de forma,  $\rho$  = densidade aparente, em kg m<sup>-3</sup>,  $R$  = relação biomassa abaixo/acima do solo.

### 3.1.9. Produção do SAF

Além das emissões de GEE e das remoções de CO<sub>2</sub>, a ferramenta permite o registro e monitoramento da quantidade produzida de todos os produtos oriundos do SAF. O balanço de carbono associado à quantidade produzida gera um importante indicador da sustentabilidade ambiental do sistema em relação aos impactos climáticos: a pegada de carbono.

Os SAFs podem ser economicamente viáveis e são práticas climaticamente inteligentes, que possuem uma menor pegada de carbono quando comparada aos sistemas convencionais de produção (Figueiredo et al, 2017, Freitas et al., 2020, Reyes-Palomo et al., 2022, Patel et al., 2023). Na ferramenta, a pegada de carbono dos produtos do SAF é calculada considerando apenas as emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub> associadas ao processo produtivo, ou seja, aquelas incluídas dentro dos limites organizacionais da ferramenta. O cálculo é realizado pela equação:  $PC = B_{SAF} / Prod_i$ , em que:  $PC$  = Pegada de carbono dos produtos do SAF, em MgCO<sub>2</sub>e unidade<sup>-1</sup>,  $B_{SAF}$  = Balanço de carbono do SAF, em MgCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>,  $Prod_i$  = quantidade produzida do produto  $i$ , em unidades ano<sup>-1</sup>.

O termo pegada de carbono está, muitas vezes, associado ao ciclo de vida de um produto ou serviço, ou seja, é uma análise que envolve desde a obtenção da matéria-prima até o descarte do produto final (Shabir et al., 2023). Porém, uma análise pontual de cada parte da cadeia produtiva permite a aplicação do conceito de “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”.

A adoção das práticas da agricultura de conservação já é uma realidade crescente e deve ser cada vez mais comum (Kassam et al., 2019). Com isso, as emissões de GEE da produção agrícola diminuem, mas sem impactos no processamento, transporte e demais etapas do setor agroalimentar. Portanto, a estimativa isolada do balanço de carbono em cada etapa da cadeia produtiva pode ser mais assertiva para beneficiar quem contribui positivamente para a mitigação climática – princípio do protetor-recebedor, e responsabilizar os principais emissores – princípio do poluidor-pagador.

A diferenciação de produtos e compensação financeira aos produtores que estão dispostos a alterar os seus sistemas de produção por práticas mais sustentáveis também é uma forma de incentivar a adoção dessas práticas. Isso só é possível a partir da quantificação precisa e monitoramento das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub> (Guan et al., 2023).

Estas estimativas também auxiliam na identificação dos impactos ambientais negativos causados pela produção agrícola. Ao compreender estes impactos, os produtores podem priorizar estratégias de melhoria, traçar metas de redução e compensar suas emissões de carbono (Shabir et al., 2023).

### **3.1.10. Relatório**

O relatório contém o resumo dos resultados gerados nas etapas anteriores. Os principais resultados apresentados são as emissões diretas e indiretas de GEE, as remoções de CO<sub>2</sub> e as emissões biogênicas por fonte, o total anual de produtos oriundos do SAF (produção anual), o balanço e a pegada de carbono. Além disso, o relatório também inclui breves explicações sobre os possíveis resultados, para auxiliar na interpretação dos valores pelos usuários da ferramenta.

### **3.1.11. Fichas de campo**

As fichas de campo visam facilitar o registro das informações em campo para posterior transferência para a ferramenta de cálculo. Todas elas contêm espaços para o preenchimento de todas as informações que devem ser coletadas em campo. Há cinco fichas disponíveis na ferramenta: “Dossel e árvores emergentes”, “Sub-bosque / *Snags*”, “Herbáceas e regenerantes / Serapilheira”, “Cactáceas” e “Necromassa (CWDs)”.



### 3.2. Aplicações

A inovação no setor agrícola – desenvolvimento e implementação de novos itens, ideias, processos, bens e serviços sustentáveis – é essencial para o desenvolvimento sustentável e a adaptação e mitigação climática desse setor (Zahed et al., 2022, Ren et al., 2023). A ferramenta desenvolvida para quantificação do balanço de carbono em SAFs é uma dessas novas tecnologias. Dentre as possíveis aplicações da ferramenta estão: i) a minimização de riscos de investimentos para a descarbonização do setor agrícola; ii) a sensibilização dos produtores quanto as questões climáticas; iii) o auxílio na tomada de decisão dos produtores; iv) o auxílio para a criação de estratégias para uma recompensa financeira justa aos produtores que adotam práticas agrícolas climaticamente inteligentes; e v) o auxílio na adequação às exigências do mercado em relação à pegada de carbono dos produtos.

Existem diversas iniciativas públicas e privadas com o objetivo de alcançar maior sustentabilidade no setor agrícola (Konefal et al., 2023). O Plano ABC+ do Brasil é o plano setorial nacional para a adaptação à mudança do clima e incentivo à baixa emissão de carbono na agropecuária (MAPA, 2021). Os SAFs são práticas incentivadas. No primeiro período de implantação (Plano ABC), entre 2010 e 2019, houve o desembolso de mais de R\$ 17 bilhões em incentivos (MAPA, 2023).

O retorno, em termos de benefícios climáticos, desses subsídios dados pelo Estado poderia ser comprovado pela eficaz quantificação do saldo líquido de emissões de GEE – balanço de carbono – das práticas conservacionistas incentivadas. A ferramenta desenvolvida pode ser utilizada para este fim, pois quantifica e auxilia no monitoramento das remoções de CO<sub>2</sub> e das emissões de GEE associadas aos SAFs.

Os resultados gerados pela ferramenta também podem auxiliar na sensibilização dos produtores rurais em relação às alterações climáticas. Os produtores rurais já percebem as mudanças no clima e buscam alternativas para adaptar suas atividades ao novo cenário (Chen et al., 2023, Usman et al., 2023, Dou et al., 2023). Porém, um investimento adicional na sensibilização dos produtores rurais ainda é necessário para aumentar suas capacidades de adaptação e para que suas tomadas de decisão sejam cada vez mais conscientes (Ali et al., 2021, Asare-Nuamah et al., 2022).

Existem muitos fatores que influenciam os produtores rurais na decisão de quais técnicas agrícolas adotar: acesso a incentivos financeiros, fatores sociodemográficos, econômicos, institucionais e ambientais (Ren et al., 2023, Teklu et al., 2023). O conhecimento sobre os impactos dos processos produtivos nas alterações climáticas, e vice-versa, aumentam a probabilidade de adoção de práticas agrícolas climaticamente inteligentes (Teklu et al., 2023).

Nesse sentido, a ferramenta pode mostrar o potencial de mitigação climática de cada tipo de SAFs e ser peça chave para que os produtores incluam as estimativas de remoções de CO<sub>2</sub> e emissões de GEE na decisão do arranjo e manejo do SAF a ser implementado.

Posteriormente, o monitoramento dessas estimativas pode auxiliar que o mercado recompense, de forma justa, os atores que contribuem para a mitigação dos impactos climáticos (Benício et al., 2023, Guan et al., 2023). Existe uma demanda crescente por rótulos climáticos (Birkenberg et al., 2021). Consumidores já estão dispostos a pagar mais por serviços e produtos com menor pegada de carbono ou neutros em carbono (Feucht e Zander, 2018, Birkenberg et al., 2021, Xu e Lin, 2021, Asioli et al., 2023). A ferramenta desenvolvida é uma forma de auxiliar que os produtores que adotam práticas agrícolas climaticamente inteligentes sejam compensados financeiramente por isso.

O uso da ferramenta também pode fazer parte do atendimento às regulamentações em relação à pegada de carbono dos produtos. O Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (*Carbon Border Adjustment Mechanism* - CBAM) é uma das estratégias adotadas pela União Europeia (UE) para alcançar sua neutralidade climática (European Commission, 2021a). O Mecanismo visa impor um preço ao carbono emitido na produção de bens com alta intensidade carbônica que são importados pela UE. Recentemente, o Mecanismo entrou em vigor e está em fase transitória. Por ora, os importadores devem apenas relatar as emissões de GEE de suas importações. A taxa de fronteira deverá ser implementada em 2026 (European Commission, 2023).

Os produtos agropecuários e florestais ainda não estão diretamente contemplados na lista de bens a serem taxados. Porém, o regulamento para garantir que apenas produtos não associados ao desmatamento sejam autorizados no mercado da UE (European Commission, 2021b) já indica a preocupação dos países europeus em relação às formas de produção destes setores. Desta forma, é possível que estes produtos brasileiros sejam incorporados ao CBAM.

Entende-se que a implementação de iniciativas como estas são cada vez mais previsíveis (White House, 2021, BCA, 2023, Rossetto, 2023). No âmbito das regulamentações nacionais, tem-se a aprovação do Projeto de Lei 412 de 2022 (Brasil, 2022), que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE).

Neste sentido, o uso da ferramenta desenvolvida pode auxiliar os produtores a atenderem essas exigências do mercado, pelo cálculo da pegada de carbono dos produtos e a comunicação desses resultados. A pegada de carbono calculada pela ferramenta será um direcionamento para os produtores. Caso o valor esteja acima dos padrões estabelecidos, os produtores poderão fazer as adequações dos processos produtivos rumo à descarbonização.

Apesar de todos os benefícios que podem ser alcançados pela utilização da ferramenta desenvolvida, existem muitas barreiras que devem ser superadas, para que os produtores rurais adotem novas tecnologias e técnicas de produção. Uma delas são os aspectos culturais, crenças e resistência à mudança (File e Nhamo, 2023, Christian et al., 2024). Muitas vezes, ainda que existam novas alternativas mais eficientes e economicamente viáveis, as práticas agrícolas tradicionais são valorizadas e mantidas.

A adoção de boas práticas e novas tecnologias pelos produtores rurais também é limitada pela falta de conhecimento sobre estas novas tecnologias disponíveis e os possíveis benefícios de seu uso (Long et al., 2016, Christian et al., 2024). Neste sentido, a assistência técnica rural, que ainda pode ser escassa em muitas regiões, é um “agente de apoio” fundamental (Kumar et al., 2018, Moreira-Dantas et al., 2023).

Equipes técnicas de extensão rural podem gerar impactos positivos por meio da sensibilização, prestação de apoio e eficaz transferência de conhecimentos (Senyolo et al., 2018, Teklu et al., 2023). Estas equipes podem ser os agentes responsáveis pelo conhecimento e acesso dos produtores às inovações disponíveis e, também, auxiliá-los na utilização das novas tecnologias, processos e métodos.

Além disso, o acesso a serviços de extensão favorece a adoção de boas práticas pelos produtores rurais (File e Nhamo, 2023). Neste sentido, a atuação de equipes de extensão rural na disseminação da ferramenta desenvolvida pode favorecer a adoção de SAFs pelos produtores rurais, contribuindo para a mitigação e adaptação climática.

Outro importante desafio para a adoção de determinadas inovações e boas práticas nos setores florestal e agropecuário é o alto custo de implementação, associado à falta de financiamentos (Senyolo et al., 2018, Diaz et al., 2022, Teklu et al., 2023). Apesar de limitações em sua operacionalização, o Brasil possui, dentro do Plano ABC+, o Programa de Acesso à Crédito e Financiamentos, como forma de incentivo à adoção de práticas com baixa emissão de carbono na agropecuária (MAPA, 2023). Diante disso, destaca-se novamente a importância da assistência técnica rural, para auxiliar os produtores na obtenção dos incentivos fornecidos pelo Estado.

A superação destes desafios exige uma abordagem holística, envolvendo os esforços colaborativos de todas as partes interessadas. Programas educacionais, acesso às tecnologias, sensibilização ambiental, financiamentos e assistência técnica são alguns dos aspectos a serem considerados. A partir disso, a adoção de inovações e práticas agrícolas climaticamente inteligentes será cada vez mais comum entre os produtores rurais, promovendo a transformação para uma economia de baixo carbono.

### 3.3. Limitações e trabalhos futuros

O próximo passo do *road map* da ferramenta desenvolvida deve ser a sua aplicação em diferentes realidades. A partir disso, espera-se validar a forma com que a ferramenta foi construída, sua usabilidade e, além disso, será possível identificar pontos de melhorias.

Após a validação desta primeira versão da ferramenta, sugere-se a construção de um manual de utilização. Isso possibilitará que os usuários utilizem a ferramenta de forma independente e diminuirá as chances de equívocos, que podem influenciar nos resultados gerados.

Sugere-se para as posteriores versões da ferramenta:

- Inclusão de informações de forma automatizada: dados como a precipitação local e o bioma em que a propriedade está inserida podem ser fornecidos automaticamente pela ferramenta, a partir do preenchimento do campo “Cidade” (que deve se tornar de relato obrigatório).

- Inclusão de gráficos e indicadores: além do relatório com o resumo das emissões de GEE, remoções de CO<sub>2</sub>, balanço e pegada de carbono, a inclusão de gráficos e indicadores tornaria a análise dos resultados mais visual e intuitiva. Além disso, podem ser criados campos para o monitoramento das estimativas ao longo do tempo, que também poderia ser apresentado dessa forma.

- Inclusão de novas fontes de emissão de GEE e remoção de CO<sub>2</sub>: deve-se atentar para a criação novas metodologias e conceitos, para que a ferramenta continue gerando os resultados mais precisos possíveis e abrangendo diferentes realidades. Alguns itens que podem ser analisados para inclusão na ferramenta são: i) pastagens: estoque de carbono nas raízes, diferença de incremento do carbono acima do solo em diferentes sistemas de manejo do gado (sistema de pousio e pastoreio contínuo); ii) culturas agrícolas anuais: estoque de carbono nas raízes e contribuição dos resíduos das colheitas; iii) biochar: contribuição do biochar para o aumento do estoque de carbono no solo.

Além dessas sugestões, destaca-se a necessidade de estudos para a geração de equações para quantificação de biomassa e carbono em culturas perenes. Na primeira versão da ferramenta não foi possível incluir espécies que comumente são cultivadas em SAFs, como *Citrus* sp., café, abacaxi, mamão e erva-mate. Para contornar a falta de equações para a quantificação de biomassa ou carbono nessas espécies, sugere-se analisar a viabilidade de incluir outras formas para o cálculo das remoções de CO<sub>2</sub> por essas espécies, como a utilização de fatores de incremento.

Ferramentas de gestão, como a desenvolvida no presente trabalho, necessitam de periódicas atualizações. A revisão e, quando necessário, a alteração das metodologias garantirá a eficácia e eficiência da ferramenta.

#### **4. Considerações finais**

A ferramenta desenvolvida calcula e auxilia no monitoramento das remoções de CO<sub>2</sub>, das emissões de GEE, do balanço de carbono e da pegada de carbono dos produtos dos Sistemas Agroflorestais (SAFs). O seu objetivo fundamental é auxiliar os produtores rurais na coleta de dados, cálculos, monitoramento e comunicação dos resultados gerados.

Os resultados alcançados pelo uso da ferramenta podem ser a base para uma gestão estratégica para descarbonização do setor agrícola. O monitoramento dos resultados ao longo do tempo pode fomentar a utilização de práticas agrícolas climaticamente inteligentes, reduzindo a pegada de carbono dos produtos agropecuários e florestais. A comunicação desses resultados pode ser a base para: i) a criação de estratégias para que os produtores sejam compensados financeiramente pela adoção de medidas de mitigação e adaptação climática; e ii) o atendimento às exigências do mercado em relação à pegada de carbono de seus produtos.

Essa melhor gestão das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub> contribui para o alcance: i) das metas estabelecidas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil; e também ii) dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). A consolidação do uso da ferramenta desenvolvida também pode contribuir para a capacitação dos produtores rurais (ODS 4 – Educação de qualidade) quanto às questões climáticas e fomentar uma produção mais sustentável (ODS 12 – Consumo e produção responsáveis).

#### **Referências**

[ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR ISO 14064-1: Gases de efeito estufa: Parte 1: Especificação com orientação no nível da organização para quantificação e notificação de emissões e remoções de gases de efeito estufa*. 53 p. 2022.

ALAM, M.A.; HUANG, J.; KHAN, M.N.; DABA, N.A.; ZHANG, L.; SHEN, Z.; LI, J.; LIU, L.; HAN, T.; HAYATU, N.G.; RAHAMAN, M.A.; ZHANG, H. Effects of long-term organic and inorganic fertilization on greenhouse gas emissions and soil nutrient stoichiometry in a

rice–rice–fallow cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 357, p. 108695, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108695>

ALCARDE, J.C.; GUIDOLIN, J.A.; LOPES, A.S. *Os adubos e a eficiência das adubações*. 3 ed. São Paulo, SP: ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos, 1998. Disponível em: [https://anda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/boletim\\_03.pdf](https://anda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/boletim_03.pdf). Acesso em: 25 ago. 2023.

ALEIXO, V.; MALAVASI, U.C.; CALEGÁRIO, N.; MALAVASI, M.M.; MACEDO JÚNIOR, E.K. Relações alométricas para *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *Ciência Florestal*, v. 18, p. 329-338, 2008. <https://doi.org/10.5902/19805098444>

ALI, S.; YING, L.; NAZIR, A.; ABDULLAH; ISHAQ, M.; SHAH, T.; YE, X.; ILYAS, A.; TARIQ, A. Rural farmers perception and coping strategies towards climate change and their determinants: Evidence from Khyber Pakhtunkhwa province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, v. 291, p. 125250, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125250>

ANANTHA, K.C.; MANDAL, B.; BADOLE, S.; MAJUMDER, S.P.; DATTA, A.; PADHAN, D.; BABU, M.V.S. Distribution of sequestered carbon in different pools in Alfisols under long-term groundnut system of hot arid region of India. *European Journal of Agronomy*, v. 135, p. 126467, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126467>

ASARE-NUAMAH, P.; ANTWI-AGYEI, P.; DICK-SAGOE, C.; ADEOSUN, O.T. Climate change perception and the adoption of innovation among mango plantation farmers in the Yilo Krobo municipality, Ghana. *Environmental Development*, v. 44, p. 100761, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100761>

ASIOLI, D.; ZHOU, X.; HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU, A.; VANHATALO, A.; GIVENS, D.I.; RONDONI, A.; TURPEINEN, A.M. Consumers' valuation for low - carbon emission and low – saturated fat butter. *Food Quality and Preference*, v. 108, p. 104859, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.104859>

ASSAD, E.D.; MARTINS, S.C.; PAVÃO, E.D.; GUSSON, E.; SILVA, J.P.; PRADO, A.; PONTES, C.; BIDERMAN, R.; ESTURBA, T.; ROMEIRO, V. *Greenhouse gas protocol calculation tool for forestry in Brazil*. WRI Brasil: Technical Note. 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/ferramenta-de-calculo-para-balanco-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-em-florestas-e>. Acesso em: 21 set. 2023.

BARBEIRO, L.S.S.; VIEIRA, G.; SANQUETTA, C.R. Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness (canela-amarela). *Floresta*, v. 39, p. 833-843, 2009. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v39i4.16318>

[BCA] Business Council of Australia. *Safeguard Mechanism Reforms: Position Paper*. 2023. Disponível em: [https://assets.nationbuilder.com/bca/pages/7179/attachments/original/1678319958/BCA\\_submission\\_Safeguard\\_Mechanism\\_Reforms\\_Position\\_Paper\\_February\\_2023.pdf?1678319958](https://assets.nationbuilder.com/bca/pages/7179/attachments/original/1678319958/BCA_submission_Safeguard_Mechanism_Reforms_Position_Paper_February_2023.pdf?1678319958). Acesso em: 11 out. 2023.

BENÍCIO, R.M.A.; LINHARES, K.V.; LISBOA, M.A.N.; CRUZ, G.V.; SILVA, L.V.A.; NASCIMENTO, A.S.; SILVA, M.A.P.; ROCHA, L.S.G.; DRUMOND, M.A.; TONUCCI,

R.G.; CALIXTO JÚNIOR, J.T. Carbon stock and sequestration as a form of payment for environmental services in a sedimentary basin humid forest refuge in Brazilian semiarid. *Environmental Development*, v. 45, p. 100796, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100796>

BERNAL, B.; MURRAY, L.T.; PEARSON, T.R.H. Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance Manage*, v. 13, p. 1-13, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>

BETTIOL, W.; SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C.A. (Ed.). 1 ed. *Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical*. Brasília, DF: Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1153147/entendendo-a-materia-organica-do-solo-em-ambientes-tropical-e-subtropical>. Acesso em: 14 out. 2023.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123621>

BORSOI, G.A. *Subsídios para o manejo de uma Floresta Ombrófila Mista em estágio avançado de regeneração natural*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004.

BRASIL. *Projeto de Lei nº 412, de 2022*. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e dá outras providências. [2022]. Disponível em: [https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9476399&ts=1697517852422&disposition=inline&\\_gl=1\\*\\_1cdlfib\\*\\_ga\\*\\_MTM3NjE4MDY3LjE2OTc1Njc2NjA.\\*\\_ga\\_CW3ZH25XMK\\*\\_MTY5NzU2NzY2MC4xLjEuMTY5NzU2NzY4Ni4wLjAuMA](https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9476399&ts=1697517852422&disposition=inline&_gl=1*_1cdlfib*_ga*_MTM3NjE4MDY3LjE2OTc1Njc2NjA.*_ga_CW3ZH25XMK*_MTY5NzU2NzY2MC4xLjEuMTY5NzU2NzY4Ni4wLjAuMA). Acesso em: 15 jan. 2024.

[Brazil] Federative Republic of Brazil. *Nationally Determined Contribution (NDC)*. 2022. 3 ed. Disponível em: <https://unfccc.int/NDCREG>. Acesso em: 08 set. 2023.

BROWN, K.; SCHIRMER, J.; UPTON, P. Can regenerative agriculture support successful adaptation to climate change and improved landscape health through building farmer self-efficacy and wellbeing?. *Current Research in Environmental Sustainability*, v. 4, p. 100170, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100170>

CALDEIRA, M.V.W.; SAIDELLES, F.L.F.; SCHUMACHER, M.V.; GODINHO, T.O. Biomassa de povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild., Rio Grande do Sul, Brasil. *Scientia Forestalis*, v. 39, p. 133-141, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100079>

CAVALCANTI, N.B.; RESENDE, G.M. Efeito de diferentes substratos no desenvolvimento de mandacaru (*Cereus jamacaru* P. DC.), facheiro (*Pilosocereus pachycladus* Ritter), Xiquexique (*Pilosocereus gounellei* (A. Webw. Ex K. Schum.) Bly. Ex Rowl.) e coroa-de-frade (*Melocactus bahiensis* Britton & Rose). *Revista Caatinga*, v. 20, p. 28-35, 2007.

CHAMIZO, S.; SERRANO-ORTIZ, P.; LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; SÁNCHEZ-CAÑETE, E.P.; VICENTE-VICENTE, J.L.; KOWALSKI, A.S. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange

in an irrigated olive orchard of SE Spain: Influence of weed cover. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 239, p. 51-64, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.016>

CHEN, Y.; YANG, J.; WANG, Y.; QI, J.; LUAN, Q. The impact on climate change perception and adaptation of smallholder concepts: Evidence from a sugarcane community, China. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 102, p. 107213, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107213>

CIPRIANI, H.N.; VIEIRA, A.H.; GODINHO, V.P.C. Fatores de forma para eucaliptos em Vilhena, Rondônia. *Circular Técnica 143*: Embrapa. 1 ed. 2015.

[CNPE] Conselho Nacional de Política Energética. *Resolução nº 3 de 20 de março de 2023*: Altera a Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018, que dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional, e dá outras providências. [2023]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-473383252>. Acesso em: 23 ago. 2023.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D.P.; SOARES, T.S.; SILVA, V.S.M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. *Acta Amazonica*, v. 39, p. 97-104, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100010>

CORREIA, J.; FANTINI, A.; PIAZZA, G. Equações Volumétricas e Fator de Forma e de Casca para Florestas Secundárias do Litoral de Santa Catarina. *Floresta e Ambiente*, v. 24, p. e20150237, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.023715>

COUTINHO, V.M.; SANQUETTA, C.R.; SANQUETTA, M.N.I.; RODRIGUES, A.L.; CORTE, A.P.D. Equações tradicionais e simultâneas para biomassa de compartimentos aéreos de *Cryptomeria japonica* (L.F.) D. DON. *Brazilian Journal of Biometrics*, v. 35, p. 58-75, 2017.

CHRISTIAN, K.T.R.; PHILIPPE, C.A.B.; ABRAHAM, A.G.; CAMEL, L.; FÉLICIEN, A.; GAUTHIER, B.I.A.O.U.; SOHOUNHLOUE, C.K.D. Recent climate-smart innovations in agrifood to enhance producer incomes through sustainable solutions. *Journal of Agriculture and Food Research*, In Press, Journal Pre-proof, p. 100985, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100985>

DALLA LANA, M.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, J.A.A.; DUDA, G.P.; BRANDÃO, C.F.L.S.; SILVA, A.F. Biomass equations for caatinga species. *Nativa*, v. 6, p. 517-525, 2018. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5361>

DIAZ, R.T.; OSORIO, D.P.; HERNÁNDEZ, E.M.; PALLARES, M.M.; CANALES, F.A.; PATENINA, A.C.; ECHEVERRÍA-GONZÁLEZ, A. Socioeconomic determinants that influence the agricultural practices of small farm families in northern Colombia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 21, p. 440-451, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.12.001>



DOU, Y.; SILVA, R.F.B.; BATISTELLA, M.; TORRES, S.; MORAN, E.; LIU, J. Mapping crop producer perceptions: The role of global drivers on local agricultural land use in Brazil. *Land Use Policy*, v. 133, p. 106862, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106862>

DURLO, M.A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal*, v. 8, p. 55-66, 1998. <https://doi.org/10.5902/19805098351>

EGAN, G.; CRAWLEY, M.J.; FORNARA, D.A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions. *Science of The Total Environment*, v. 613-614, p. 810-819, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.165>

[EPE] Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021. 2022*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2023.

ESTRADA, G.C.D.; SOARES, M.L.G.; SANTOS, D.M.C.; FERNANDEZ, V.; ALMEIDA, P.M.M.; ESTEVAM, M.R.M.; MACHADO, M.R.O. Allometric models for aboveground biomass estimation of the mangrove *Avicennia schaueriana*. *Hydrobiologia*, v. 734, p. 171-185, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1878-5>

[EUROPEAN COMMISSION] European Commission. *Carbon Border Adjustment Mechanism*. 2023. Disponível em: [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en). Acesso em: 11 out. 2023.

[EUROPEAN COMMISSION] European Commission. *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism*. 2021a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0564>. Acesso em: 11 out. 2023.

[EUROPEAN COMMISSION] European Commission. *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on the making available on the Union market as well as export from the Union of certain commodities and products associated with deforestation and forest degradation and repealing Regulation (EU) No 995/2010*. 2021b. Disponível em: [https://environment.ec.europa.eu/system/files/2021-11/COM\\_2021\\_706\\_1\\_EN\\_ACT\\_part1\\_v6.pdf](https://environment.ec.europa.eu/system/files/2021-11/COM_2021_706_1_EN_ACT_part1_v6.pdf). Acesso em: 11 out. 2023.

[FAO] Food and Agriculture Organization. *Agroforestry: Definition*. 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/forestry/agroforestry/80338/en/>. Acesso em: 08 set. 2023.

FERNANDES, M.R.M.; SILVA, G.F.; ALMEIDA, A.Q.; FERNANDES, M.M.; MENDONÇA, A.R.; GONÇALVES, F.G.; BINOTI, D.H.B.; SILVA, J.P.M. Aboveground biomass estimation in dry forest in northeastern Brazil using metrics extracted from sentinel-2 data: Comparing parametric and non-parametric estimation methods. *Advances in Space Research*, v. 72, p. 361-377, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.03.010>

FEUCHT, Y.; ZANDER, K. Consumers' preferences for carbon labels and the underlying reasoning. A mixed methods approach in 6 European countries. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, p. 740-748, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.236>

FIGUEIREDO, E.B.; JAYASUNDARA, S.; BORDONAL, R.O.; BERCHIELLI, T.T.; REIS, R.A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LA SCALA JR., N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 142/1, p. 420-431, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>

FIGUEIREDO, E.O.; SCHROEDER, R.; PAPA, D.A. Fatores de Forma para 20 Espécies Florestais Comerciais da Amazônia. *Comunicado Técnico 173*: Embrapa. 1 ed. 2009.

FIGUEIREDO, E.O.; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D. Estimativa do Percentual de Casca e do Fator de Forma em Povoamentos Jovens de Teca (*Tectona grandis* L.f.). *Comunicado Técnico 165*: Embrapa. 1 ed. 2005.

FILE, D.J.M.; NHAMO, G. Farmers' choice for indigenous practices and implications for climate-smart agriculture in northern Ghana. *Heliyon*, v. 9, p. e22162, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22162>

FONTOURA, M.R.; CARON, B.O.; ELOY, E.; TREVISAN, R.; TRAUTENMÜLLER, J.W.; BEHLING, A. Modelos alométricos para estimativa de biomassa em área de regeneração natural de *Ateleia glazioviana* Baill. *Floresta*, v. 47, p. 469-478, 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i4.53988>

FRANCO, E.J. *Estudo dos métodos estimativos de volume, biomassa e níveis de produtividade para Eucalyptus camaldulensis*. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 1996.

FREITAS, I.C.; RIBEIRO, J.M.; ARAÚJO, N.C.A.; SANTOS, M.V.; SAMPAIO, R.A.; FERNANDES, L.A.; AZEVEDO, A.M.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.E.P.; FRAZÃO, L.A. Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangeland Ecology & Management*, v. 73, p. 776-785, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>

GETNET, D.; MEKONNEN, Z.; ANJULO, A. The potential of traditional agroforestry practices as nature-based carbon sinks in Ethiopia. *Nature-Based Solutions*, v. 4, p. 100079, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100079>

[GHG PROTOCOL] Programa Brasileiro GHG Protocol. *Ferramenta GHG Protocol*: versão 2023.0.3. 2023. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 23 ago. 2023.

GIMENEZ, B.O. *Equações volumétricas e o modelo que utiliza o fator de forma médio: Um estudo de caso na Amazônia Central*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 2014.

GIRARD, E.A. *Volume, biomassa e rendimento de óleos essenciais do craveiro (Pimenta pseudocaryophyllus (Gomes) Landrum) em floresta ombrófila mista*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2005.

GOMES, J.P. *Equações de volume e biomassa para plantios de Acacia mangium WILLD. em área de savana, em Roraima*. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, 2017.

GOMES, R. *Carbono e nutrientes na biomassa e no solo em povoamentos de Anadenanthera peregrina (L.) Speg. var. peregrina em diferentes espaçamentos*. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, 2022.

GOODMAN, R.C.; PHILLIPS, O.L.; TORRES, D.C.; FREITAS, L.; CORTESE, S.T.; MONTEAGUDO, A.; BAKER, T.R. Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, v. 310, p. 994-1004, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045>

GUAN, K.; JIN, Z.; PENG, B.; TANG, J.; DELUCIA, E.H.; WEST, P.C.; JIANG, C.; WANG, S.; KIM, T.; ZHOU, W.; GRIFFIS, T.; LIU, L.; YANG, W.H.; QIN, Z.; YANG, Q.; MARGENOT, A.; STUCHINER, E.R.; KUMAR, V.; BERNACCHI, C.; COPPESS, J.; NOVICK, K.A.; GERBER, J.; JAHN, M.; KHANNA, M.; LEE, D.; CHEN, Z.; YANG, S. A scalable framework for quantifying field-level agricultural carbon outcomes. *Earth-Science Reviews*, v. 243, p. 104462, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104462>

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A.M. Inventários florestais na Amazônia. *Boletim do Serviço Florestal*, n. 6, p. 1-100, 1963.

HEMINGWAY, C.; VIGNE, M.; AUBRON, C. Agricultural greenhouse gas emissions of an Indian village - Who's to blame: crops or livestock?. *Science of The Total Environment*, v. 856/2, p. 159145, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159145>

HOPPE, J.M.; WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M.V. Estimativa de biomassa em povoamento de *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. estabelecido no município de Dom Feliciano, RS. *Ciência Florestal*, v. 16, p. 463-471, 2006. <https://doi.org/10.5902/198050981928>

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: General Guidance and Reporting: Introduction*. 2006a. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1\\_Volume1/V1\\_1\\_Ch1\\_Introduction.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf). Acesso em: 22 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Energy: Mobile Combustion*. 2006b. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf). Acesso em: 01 nov. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Energy: Stationary Combustion*. 2006c. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf). Acesso em: 01 nov. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use: N<sub>2</sub>O Emissions from Managed Soils, and CO<sub>2</sub> Emissions from Lime and Urea Application*. 2006d. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_11\\_Ch11\\_N2O&CO2.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf). Acesso em: 25 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use: Emissions from Livestock and Manure Management*. 2006e. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_10\\_Ch10\\_Livestock.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf). Acesso em: 25 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use: Forest Land*. 2006f. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_04\\_Ch4\\_Forest\\_Land.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf). Acesso em: 30 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Overview*. 2019a. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0\\_Overview/19R\\_V0\\_01\\_Overview.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0_Overview/19R_V0_01_Overview.pdf). Acesso em: 22 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Glossary*. 2019b. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0\\_Overview/19R\\_V0\\_02\\_Glossary.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0_Overview/19R_V0_02_Glossary.pdf). Acesso em: 22 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use: N<sub>2</sub>O Emissions from Managed Soils, and CO<sub>2</sub> Emissions from Lime and Urea Application*. 2019c. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4\\_Volume4/19R\\_V4\\_Ch11\\_Soils\\_N2O\\_CO2.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch11_Soils_N2O_CO2.pdf). Acesso em: 23 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use: Emissions from Livestock and Manure Management*. 2019d. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4\\_Volume4/19R\\_V4\\_Ch10\\_Livestock.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch10_Livestock.pdf). Acesso em: 23 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity*. 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter07.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf). Acesso em: 22 ago. 2023.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2023: Synthesis Report: Summary for Policymakers*. 2023. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). Acesso em: 06 set. 2023.

JAT, M.L.; GATHALA, M.K.; CHOUDHARY, M.; SHARMA, S.; JAT, H.S.; GUPTA, N.; YADVINDER-SINGH. Chapter Three - Conservation agriculture for regenerating soil health and climate change mitigation in smallholder systems of South Asia. *Advances in Agronomy*, v. 181, p. 183-277, 2023. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.05.003>

KALIL FILHO, A.N.; WENDLING, I.; ROSOT, M.A.D.; LAZZAROTTO, M.; GUEDES, J.S. Determinação do fator de forma do cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem. var. *australis* (F. Muell.) Bahadur). *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 39, p. e201902043, 2019a.

KALIL FILHO, A.N.; WENDLING, I.; ROSOT, M.A.D.; LAZZAROTTO, M.; GUEDES, J.S. Determinação do fator de forma do guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess.). *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 39, p. e201902043, 2019b.

KUMAR, N.; SCOTT, S.; MENON, P.; KANNAN, S.; CUNNINGHAM, K.; TYAHI, P.; WABLE, G.; RAGHUNATHAN, K.; QUISUMBING, A. Pathways from women's group-based programs to nutrition change in South Asia: A conceptual framework and literature review. *Global Food Security*, v. 17, p. 172-185, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.11.002>

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, v. 76, p. 29-51, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>

KOLAPO, A.; KOLAPO, A.J. Implementation of conservation agricultural practices as an effective response to mitigate climate change impact and boost crop productivity in Nigeria. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 12, p. 100557, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100557>

KONEFAL, J.; OLDE, E.M.; HATANAKA, M.; OOSTERVEER, P.J.M. Signs of agricultural sustainability: A global assessment of sustainability governance initiatives and their indicators in crop farming. *Agricultural Systems*, v. 208, p. 103658, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103658>

KUMARA T.M., K.; PAL, S.; CHAND, P.; KANDPAL, A. Carbon sequestration potential of agroforestry systems in Indian agricultural landscape: A Meta-Analysis. *Ecosystem Services*, v. 62, p. 101537, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101537>

KRAINOVIC, P.; ALMEIDA, D.; SAMPAIO, P. New Allometric Equations to Support Sustainable Plantation Management of Rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) in the Central Amazon. *Forests*, v. 8, p. 327, 2017. <https://doi.org/10.3390/f8090327>

LANDUYT, D.; DE LOMBAERDE, E.; PERRING, M.P.; HERTZOG, L.R.; AMPOORTER, E.; MAES, S.L.; DE FRENNE, P.; MA, S.; PROESMANS, W.; BLONDEEL, H.; WANG, B.; WASOF, S.; VERHEYEN, K. The functional role of temperate forest understorey

vegetation in a changing world. *Global Change Biology*, v. 25, p. 3625-3641, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14756>

LEAKEY, R.R.B. Chapter 1 - Definition of Agroforestry Revisited: This chapter was previously published in Leakey, R.R.B., 1996. *Agroforestry Today*, 8 (1), 5–7, with permission of World Agroforestry Center. *Multifunctional Agriculture*, p. 5-6, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805356-0.00001-5>

LIMA, A.J.N.; SUWA, R.; RIBEIRO, G.H.P.M.; KAJIMOTO, T.; SANTOS, J.; SILVA, R.P.; SOUZA, C.A.S.; BARROS, P.C.; NOGUCHI, H.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 277, p. 163-172, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.028>

LIMA, M.C.D.; BARRETO-GARCIA, P.A.B.; SANQUETTA, C.R.; NOVAES, A.B.; MELO, L.C. Biomass e carbon stock from *Pinus caribaea* var. *hondurensis* under homogenous stands in southwest Bahia, Brazil. *Ciência Rural*, v. 46, p. 957-962, 2016. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150493>

LIMA, R.M.B. Estimativa da biomassa aérea de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Humb.e Bonpl.) em plantios homogêneos no estado do Amazonas. In: Seminário Produtividade Agropecuária e Benefícios Socioambientais das Pesquisas da Embrapa Amazônia Ocidental, 1., 2011, Manaus. *Anais*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2011. p. 57-61.

LOCATELLI, M.; MARTINS, E.P.; MARCANTE, P.H.; CIPRIANI, H.N.; MORAIS, J.P.S. Fator de forma para a castanheira-da-amazônia. *Circular Técnica 150*: Embrapa. 1 ed. 2017.

LONG, T.B.; BLOK, V.; CONINX, I. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *Journal of Cleaner Production*, v. 112/1, p. 9-21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044>

[MAPA] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano ABC em Números*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono/plano-abc-em-numeros>. Acesso em: 11 set. 2023.

[MAPA] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): Visão estratégica para um novo ciclo*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono/publicacoes/abc-portugues.pdf>. Acesso em: 08 set. 2023.

[MAPA] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Portaria nº 75 de 05 de março de 2015*: Fixa, o percentual obrigatório de adição de etanol anidro combustível à gasolina. [2015]. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=281775>. Acesso em: 23 ago. 2023.

[MAPA] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Programas e Estratégias*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/programas-e-estrategias>. Acesso em: 25 jan. 2024.

MARAÑÓN-JIMÉNEZ, S.; SERRANO-ORTÍZ, P.; PEÑUELAS, J.; MEIJIDE, A.; CHAMIZO, S.; LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; VICENTE-VICENTE, J.L.; FERNÁNDEZ-ONDOÑO, E. Effects of herbaceous covers and mineral fertilizers on the nutrient stocks and fluxes in a Mediterranean olive grove. *European Journal of Agronomy*, v. 140, p. 126597, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126597>

MARTIN, A.R.; DOMKE, G.M.; DORAISAMI, M.; THOMAS, S.C. Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications*, v. 12, p. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21149-9>

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D.R. *Cultura de café no Brasil: Manual e recomendações*. Rio de Janeiro, RJ; Varginha, MG: SARC/PROCAFÉ, 2010.

[MCTI] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Fator médio - Inventários corporativos*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/fator-medio-inventarios-corporativos>. Acesso em: 23 ago. 2023.

[MCTI] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima: Relatório de Referência: Setor Energia: Subsetor Queima de Combustíveis*. 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 01 nov. 2023.

[MCTI] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima: Relatório de Referência: Setor Agropecuária: Subsetor Fermentação Entérica*. 2020b. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 25 ago. 2023.

[MCTI] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima: Relatório de Referência: Setor Agropecuária: Subsetor Manejo de Dejetos*. 2020c. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 25 ago. 2023.

[MCTI] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima: Sumário Executivo*. 2020d. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/sumario\\_executivo\\_4cn\\_brasil\\_web.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/sumario_executivo_4cn_brasil_web.pdf). Acesso em: 09 jan. 2024.

MEDEIROS, T.C.C.; SAMPAIO, E.V. S.B. Allometry of aboveground biomasses in mangrove species in Itamaracá, Pernambuco, Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, v. 16, p. 323-330, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11273-007-9069-z>

MELLO, A.A.; NUTTO, L.; WEBER, K.S.; SANQUETTA, C.E.; MATOS, J.L.M.; BECKER, G. Individual Biomass e Carbon Equations for *Mimosa scabrella* Benth. (Bracatinga) in Southern Brazil. *Silva Fennica*, v. 46, p. 333-343, 2012. <https://doi.org/10.14214/sf.44>

MELO, L.C.; SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P.D.; HENTZ, A.M.K. Estimativa de biomassa e carbono total para árvores de caixeta no Paraná. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 34, p. 21-29, 2014. <http://dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.592>

[MMA] Ministério do Meio Ambiente. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012: Relatório Final*. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2013/01/2014-05-27inventario2013.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2023.

MOGNON, F.; CORTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R.; BARRETO, T.G.; WOJCIECHOWSKI, J. Estimativas de biomassa para plantas de bambu do gênero *Guadua*. *Revista Ceres*, v. 61, p. 900-906, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461060003>

MONASTIER, S.H.; CORTE, A.P.; SANQUETTA, C.R.; SANQUETTA, M.; RUZA, M.S. Modelagem da biomassa individual de *Phyllostachys aurea* Carr. ex A.& C. Rivi'ere. *Enciclopédia Biosfera*, v. 11, p. 1290-1297, 2015.

MOREIRA-DANTAS, I.R.; MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; HENNING, H.; SOUZA DOS SANTOS, M.A. Rural credit acquisition for family farming in Brazil: Evidence from the Legal Amazon. *Journal of Rural Studies*, v. 101, p. 103041, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103041>

NAOREM, A.; JAYARAMAN, S.; SINHA, N.K.; MOHANTY, M.; CHAUDHARY, R.S.; HATI, K.M.; MANDAL, A.; THAKUR, J.K.; PATRA, A.K.; SRINIVASARAO, CH.; CHAUDHARI, S.K.; DALAL, R.C.; LAL, R. Eight-year impacts of conservation agriculture on soil quality, carbon storage, and carbon emission footprint. *Soil and Tillage Research*, v. 232, p. 105748, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105748>

NELSON, B.W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J.L.G.; SOUZA, S.G.A.; BATISTA, G.T.; COUTO, L.B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 117, p. 149-167, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00475-7)

NICODEMO, M. L. F. et al. Allometric models for estimating aboveground biomass and biomass allocation of capixingui trees (*Croton floribundus* Spreng.) in an agrisilvicultural system. *Revista Árvore*, v. 40, p. 279-288, 2016. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200010>

NOGUEIRA, F.C.B.; DOBE, E.K.; SILVA FILHO, J.B.; RODRIGUES, L.S. Allometric equations to estimate aboveground biomass of *Dalbergia cearensis* species in the Brazilian



seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management*, v. 484, p. 118920, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118920>

OLIVEIRA, A.S.C.; CAVALCANTE FILHO, F.N.; RANGEL, A.H.N.; LOPES, K.B.P. A palma forrageira: alternativa para o semi-árido. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 6, p. 49-58, 2011.

OLIVEIRA, F. S. *Biomassa, carbono e nutrientes em povoamento de Schizolobium parahyba var. amazonicum em diferentes espaçamentos*. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, 2022.

OMETTO, J.P.H.B.; EHLERINGER, J.R.; DOMINGUES, T.F.; BERRY, J.A.; ISHIDA, F.Y.; MAZZI, E.; HIGUCHI, N.; FLANAGAN, L.B.; NARDOTO, G.B.; MARTINELLI, L.A. The stable carbon and nitrogen isotopic composition of vegetation in tropical forests of the Amazon Basin, Brazil. *Biogeochemistry*, v. 79, p. 251-274, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9008-8>

PADILHA, D.R.C. *Fitossociologia e estimativas da biomassa aérea e de carbono em chaco florestado no Brasil*. 2011. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2011.

PATEL, R.; PATEL, B.; M, J.; DASH, B.; MUKHERJEE, S. 10 - Impact of agroforestry ecosystem on carbon sequestration potential and climate change. *Agricultural Soil Sustainability and Carbon Management*, p. 269-297, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95911-7.00002-5>

PATI, P.K.; KAUSHIK, P.; KHAN, M.L.; KHARE, P.K. Allometric equations for biomass and carbon stock estimation of small diameter woody species from tropical dry deciduous forests: Support to REDD+. *Trees, Forests and People*, v. 9, p. 100289, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100289>

REN, X.; HE, J.; HUANG, Z. Innovation, natural resources abundance, climate change and green growth in agriculture. *Resources Policy*, v. 85/A, p. 103970, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103970>

REYES-PALOMO, C.; AGUILERA, E.; LLORENTE, M.; DÍAZ-GAONA, C.; MORENO, G.; RODRÍGUEZ-ESTÉVEZ, V. Carbon sequestration offsets a large share of GHG emissions in dehesa cattle production. *Journal of Cleaner Production*, v. 358, p. 131918, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131918>

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação*. Viçosa, MG: CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

RIBEIRO, S.C.; SOARES, C.P.B.; FEHRMANN, L.; JACOVINE, L.A.G.; VON GADOW, K. Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in southeast Brazil. *Revista Árvore*, v. 39, p. 353-363, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>

ROBORTELLA, H.S. *Equações de biomassa e estoques de carbono de seis espécies em plantios mistos no noroeste do Mato Grosso*. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 2010.

ROSSETTO, D. The long-term feasibility of border carbon mechanisms: An analysis of measures proposed in the European Union and the United States and the steel production sector. *Sustainable Horizons*, v. 6, p. 100053, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.horiz.2023.100053>

SALDARRIAGA, J.G.; WEST, D.C.; THARP, M.L.; UHL, C. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia e Venezuela. *Journal of Ecology*, v. 76, p. 938-958, 1988. <https://doi.org/10.2307/2260625>

SALIS, S.M.; ASSIS, M.A.; MATTOS, P.P.; PIÃO, A.C.S. Estimating the aboveground biomass e wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations. *Forest Ecology and Management*, v. 228, p. 61-68, 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.025>

SAMPAIO, E.V.S.B.; SILVA, G.C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. *Acta Botanica Brasilica*, v. 19, p. 935-943, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000400028>

SANQUETTA, C.R.; CÔRTE, A.P.D.; ROGLIN, A.; MOGNON, F. Biomassa individual de *Bambusa oldhamii* Munro e *Bambusa vulgaris* Schrad. Ex J.C. Wendl. *Cerne*, v. 21, p. 151-159, 2015. <https://doi.org/10.1590/01047760201521011483>

SANTOS, H.V.S.; HOLLANDA, F.S.R.; SANTOS, T.O.; ANDRADE, K.V.S.; SANTANA, M.B.S.; ESTRADA, G.C.D.; SOARES, M.L.G. Allometric models for estimating the aboveground biomass of the mangrove *Rhizophora mangle*. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 65, p. 44-53, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592017127006501>

SCHACHT, W.H.; LONG, J.N.; MALECHEK, J.C. Above-ground production in cleared e thinned stands of semiarid tropical woodland, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 23, p. 201-214, 1988. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(88\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0378-1127(88)90082-5)

SCHIKOWSKI, A.B.; CORTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de *Pinus*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 33, p. 269-278, 2013.  
<https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.75.503>

SCHMIDT, M.W.I.; TORN, M.S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I.A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D.A.C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D.P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, v. 478, p. 49-56, 2011.  
<https://doi.org/10.1038/nature10386>

SCHUCH, C.; SIMINSKI, A.; FANTINI, A.C. Usos e potencial madeireiro do jacatirão-açu (*Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin) no litoral de Santa Catarina. *Floresta*, v. 38, p. 735-741, 2008.

SCHUMACHER, M.V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F.N.; LOPES, V.G.; VIEIRA, M. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em quedas do Iguaçu, PR. *Ciência Florestal*, v. 21, p. 53-62, 2011. <https://doi.org/10.5902/198050982747>

SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.; ACERBI JÚNIOR, F.W. *Inventário Florestal de Minas Gerais: Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fisionomias da Flora Nativa*. Lavras, MG: Editora UFLA, 2008.

SCOLFORO, J.; MELLO, J.D.; LIMA, C.D.A. Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em Floresta Estacional Semidecídua Montana. *Revista Cerne*, v. 1, p. 123-134, 1994.

[SEEG] Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. *Base de Dados de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil 1970-2021: versão 10.0*. 2022. Disponível em: <https://seeg.eco.br/download/>. Acesso em: 06 set. 2023.

SENYOLO, M.P.; LONG, T.B.; BLOK, V.; OMTA, O. How the characteristics of innovations impact their adoption: An exploration of climate-smart agricultural innovations in South Africa. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 3825-3840, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.019>

[SFB] Serviço Florestal Brasileiro. *Boletim do IFN Cerrado: levantamento biofísico*. 1 ed. 2020. Disponível em: [https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/periodo\\_eleitoral/publicacoes\\_ifn/levantamento\\_biofísico\\_periodo\\_eleitoral.pdf](https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/periodo_eleitoral/publicacoes_ifn/levantamento_biofísico_periodo_eleitoral.pdf). Acesso em: 20 out. 2023.

SHABIR, I.; DASH, K.K.; DAR, A.H.; PANDEY, V.K.; FAYAZ, U.; SRIVASTAVA, S.; R, N. Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*, v. 7, p. 100215, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100215>

SHARMA, H.; PANT, K.S.; BISHIST, R.; GAUTAM, K.L.; LUDARMANI; DOGRA, R.; KUMAR, M.; KUMAR, A. Estimation of biomass and carbon storage potential in agroforestry systems of north western Himalayas, India. *CATENA*, v. 225, p. 107009, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107009>

SILVA, L.M.; FAGUNDES, J.L.; VIEGAS, P.A.A.; MUNIZ, E.N.; RANGEL, J.H.A.; MOREIRA, A.L.; BACKES, A.A. Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. *Ciência Rural*, v. 44, p. 2064-2071, 2014. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131305>

SOARES, C.P.B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L. *Dendrometria e Inventário Florestal*. Viçosa, MG, 2017. Disponível em: <http://www.mensuracaoflorestal.com.br/capitulo-6-biomassa-e-carbono>. Acesso em: 21 set. 2023.

SOUZA, A.; JESUS, R. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies da Mata Atlântica ocorrentes na reserva florestal da Companhia Vale do Rio Doce, Linhares, ES. *Revista Árvore*, v. 15, p. 257-273, 1991.

SOUZA, P.H. *Biomassa e estoque de carbono em povoamento de Anadenanthera peregrina (L.) Speg sob diferentes espaçamentos*. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, 2018.

[TALANOVA] Instituto Talanova. *NDC 2023: o Brasil aumentou a ambição?*. 2023. Disponível em: [https://institutotalanova.org/wp-content/uploads/2023/09/NDC-2023\\_-sera-que-o-Brasil-aumentou-a-ambicao\\_.pdf](https://institutotalanova.org/wp-content/uploads/2023/09/NDC-2023_-sera-que-o-Brasil-aumentou-a-ambicao_.pdf). Acesso em: 12 out. 2023.

TEKLU, A.; SIMANE, B.; BEZABIH, M. Multiple adoption of climate-smart agriculture innovation for agricultural sustainability: Empirical evidence from the Upper Blue Nile Highlands of Ethiopia. *Climate Risk Management*, v. 39, p. 100477, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100477>

TOREZAN, J.M.D.; SILVEIRA, M. The biomass of bamboo (*Guadua weberbaueri* Pilger) in open forest of the southwestern amazon. *Ecotropica*, v. 6, p. 71-76, 2000.

TORRES, C.M.M.E.; JACOVINE, L.A.G.; SOARES, C.P.B.; OLIVEIRA NETO, S.N.; SANTOS, R.D.; CASTRO NETO, F. Quantificação de biomassa e estocagem de carbono em uma floresta estacional semidecidual, no Parque Tecnológico de Viçosa, MG. *Revista Árvore*, v. 37, p. 647-655, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400008>

UHL, C.; BUSCHBACHER, R.; SERRÃO, E.A.S. Abandoned pastures in eastern Amazonia. I. Patterns of Plant Succession. *Journal of Ecology*, v. 76, p. 663-681, 1988. <https://doi.org/10.2307/2260566>

ULLER, H.F.; OLIVEIRA, L.Z.; KLITZKE, A.R.; FREITAS, J.V.; VIBRANS, A.C. Biomass models for three species with different growth forms and geographic distribution in the Brazilian Atlantic forest. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 51, p. 1419-1431, 2021. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0215>

USMAN, M.; ALI, A.; ROSAK-SZYROCKA, J.; PILAŘ, L.; BAIG, S.A.; AKRAM, R.; WUDIL, A.H. Climate change and livestock herders wellbeing in Pakistan: Does nexus of risk perception, adaptation and their drivers matter?. *Heliyon*, v. 9, p. e16983, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16983>

VAN NOORDWIJK, M.; RAHAYU, S.; HAIRIAH, K.; WULAN, Y.C.; FARIDA, A.; VERBIST, B. Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China: Series C.: Life Sciences*, v. 45, p. 75-86, 2002. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16983>

VILLANOVA, P.H. *Necromassa, dinâmica e prognose do estoque de carbono em uma floresta estacional semidecidual no município de Viçosa, Minas Gerais*. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

VILLANOVA, P.H. *Propriedades físico-químicas e dinâmica da necromassa em floresta estacional semidecidual*. 2021. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2021.

VOGEL, H.L.M.; SCHUMACHER, M.V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma floresta estacional decidual em Itaara, RS, Brasil. *Ciência Florestal*, v. 16, p. 419-425, 2006. <https://doi.org/10.5902/198050981923>

[WHITE HOUSE] The White House. *FACT SHEET: The United States and European Union To Negotiate World's First Carbon-Based Sectoral Arrangement on Steel and Aluminum Trade*. 2021. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/10/31/fact-sheet-the-united-states-and-european-union-to-negotiate-worlds-first-carbon-based-sectoral-arrangement-on-steel-and-aluminum-trade/>. Acesso em: 11 out. 2023.

WITSCHORECK, R. *Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de Pinus taeda L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul - RS*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

[WRI] World Resources Institute. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard: Revised Edition*. 2004. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

[WRI] World Resources Institute. *GHG Protocol: Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard*. 2015. Disponível em: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%20%20Guidance\\_Final\\_Sept26.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope%20%20Guidance_Final_Sept26.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

XU, M.; LIN, B. Leveraging carbon label to achieve low-carbon economy: Evidence from a survey in Chinese first-tier cities. *Journal of Environmental Management*, v. 286, p. 112201, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112201>

YU, Z.; CIAIS, P.; PIAO, S.; HOUGHTON, R.A.; LU, C.; TIAN, H.; AGATHOKLEOUS, E.; KATTEL, G.R.; SITCH, S.; GOLL, D.; YUE, X.; WALKER, A.; FRIEDLINGSTEIN, P.; JAIN, A.K.; LIU, S.; ZHOU, G. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, v. 13, p. 5374, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>

ZAHED, M.A.; HADIPOUR, M.; MASTALI, G.; ESMAEILZADEH, M.; MOJIRI, A. Simultaneous Ecosystem Benefit and Climate Change Control: A Future Study on Sustainable Development in Iran. *International Journal of Environmental Research*, v. 16, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00410-z>

ZANNE, A.E.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; COOMES, D.A.; ILIC, J.; JANSEN, S.; LEWIS, S.L.; MILLER, R.B.; SWENSON, N.G.; WIEMANN, M.C.; CHAVE, J. 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum [Dataset]. Dryad. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

ZELARAYÁN, M.L.C.; CELENTANO, D.; OLIVEIRA, E.C.; TRIANA, S.P.; SODRÉ, D.N.; MUCHAVISOY, K.H.M.; ROUSSEAU, G.X. Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. *Acta Amazonica*, v. 45, p. 271-282, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201500432>

ZHANG, K.; MALTAIS-LANDRY, G.; LIAO, H. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 156, p. 108219, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108219>

ZHANG, Q.; ZHANG, Y.; WANG, X.; LI, H.; LIU, P.; WANG, X.; WANG, R.; LI, J. Change of tillage system affects the soil carbon pools characters, reduces carbon emissions and improves maize yield in the Loess Plateau. *European Journal of Agronomy*, v. 141, p. 126614, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126614>

## Considerações finais

A pegada de carbono é um importante indicador da sustentabilidade ambiental em relação aos impactos climáticos. Os consumidores estão cada vez mais assumindo atitudes conscientes frente às mudanças climáticas e estão dispostos a pagar mais por produtos e serviços “amigos do clima” (Rondoni e Grasso, 2021). Dessa forma, a oferta de produtos e serviços com rótulos climáticos pode melhorar a imagem corporativa e ser uma vantagem competitiva (Pinto et al., 2018, Birkenberg et al., 2021). O cálculo da pegada de carbono também auxilia na identificação dos impactos ambientais negativos causados pelos processos produtivos. Ao compreender estes impactos, metas de redução e compensação de emissões de GEE podem ser traçadas (Shabir et al., 2023), na busca pela descarbonização das atividades antrópicas.

As ferramentas desenvolvidas cumprem seus objetivos fundamentais de auxiliar os produtores rurais na coleta de dados, cálculos, monitoramento e comunicação das remoções de CO<sub>2</sub>, das emissões de GEE e do balanço de carbono de suas atividades. Os resultados alcançados pelo uso das ferramentas são a base de uma gestão estratégica para descarbonização das atividades consideradas.

O uso das ferramentas pode:

- Minimizar os riscos de investimentos para a descarbonização de atividades rurais, ao comprovar que a adoção de práticas climaticamente inteligentes reduz a pegada de carbono dos produtos;
- Sensibilizar os produtores rurais quanto as questões climáticas, aumentando suas capacidades de adaptação e tornando suas tomadas de decisão mais conscientes;
- Auxiliar na tomada de decisão dos produtores, a partir do conhecimento sobre o impacto climático de suas atividades;
- Ser a base para a criação de estratégias para uma recompensa financeira justa aos produtores rurais que adotam práticas climaticamente inteligentes;
- Auxiliar na adequação às exigências do mercado em relação à pegada de carbono dos produtos.

A utilização do *Charcoal System*, uma das ferramentas desenvolvidas, comprovou que a adoção de boas práticas na produção de carvão vegetal reduz as emissões de GEE e aumenta a produtividade, quando comparado aos sistemas convencionais de produção. Dessa forma, espera-se que a utilização das ferramentas também fomente uma mudança de posicionamento dos produtores rurais, que podem preferir a adoção de práticas climaticamente inteligentes. Assim, além de uma menor pegada de carbono dos produtos, os produtores tornariam seus

processos mais sustentáveis, promovendo melhorias ambientais, ganhos financeiros e melhores condições de trabalho.

A melhor gestão das emissões de GEE e remoções de CO<sub>2</sub>, a partir do uso das ferramentas desenvolvidas, contribui para o alcance das metas estabelecidas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil. Além disso, as funcionalidades e resultados que podem ser gerados pelas ferramentas convergem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, entre eles o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 4 (Educação de qualidade) e ODS 12 (Consumo e produção responsáveis).

## Referências

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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123621>

PINTO, R.G.D.; SZKLO, A.S.; RATHMANN, R. CO<sub>2</sub> emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. *Energy Policy*, v. 114, p. 380-393, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.040>

RONDONI, A.; GRASSO, S. Consumers behaviour towards carbon footprint labels on food: A review of the literature and discussion of industry implications. *Journal of Cleaner Production*, v. 301, p. 127031, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127031>

SHABIR, I.; DASH, K.K.; DAR, A.H.; PANDEY, V.K.; FAYAZ, U.; SRIVASTAVA, S.; R, N. Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*, v. 7, p. 100215, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100215>



## Apêndices

**Apêndice A** – Relação entre densidade à granel do carvão vegetal, em  $\text{kg mdc}^{-1}$ , e densidade básica da madeira, em  $\text{kg m}^{-3}$

Densidade básica da madeira ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Densidade à granel do carvão ( $\text{kg mdc}^{-1}$ )	%	Fonte
570,0	218,1	38,3	Cardoso, 2010
570,0	218,1	38,3	Cardoso, 2010
570,0	220,8	38,7	Cardoso, 2010
570,0	220,8	38,7	Cardoso, 2010
420,0	179,0	42,6	Oliveira, 2012
420,0	178,0	42,4	Oliveira, 2012
420,0	181,0	43,1	Oliveira, 2012
420,0	184,0	43,8	Oliveira, 2012
420,0	179,0	42,6	Damásio et al., 2015
420,0	181,0	43,1	Damásio et al., 2015
460,0	156,4	34,0	Donato, 2017
470,0	156,4	33,3	Donato, 2017
<b>Média</b>		39,9	

**Apêndice B** – Teores de carbono fixo do carvão vegetal (TCF), em %

<b>TCF (%)</b>	<b>Fonte</b>
82,6	Cardoso, 2010
82,6	Cardoso, 2010
75,5	Cardoso, 2010
75,5	Cardoso, 2010
83,1	Oliveira, 2012
81,7	Oliveira, 2012
82,2	Oliveira, 2012
81,9	Oliveira, 2012
76,7	Arruda et al., 2011
76,7	Arruda et al., 2011
72,7	Costa, 2012
75,5	Costa, 2012
67,7	Costa, 2012
84,3	Costa, 2012
88,6	Costa, 2012
83,1	Damásio et al., 2015
81,9	Damásio et al., 2015
73,0	Reis et al., 2012a
71,8	Reis et al., 2012a
74,0	Reis et al., 2012a
74,4	Reis et al., 2012a
80,2	Neves et al., 2011
81,0	Neves et al., 2011
79,7	Neves et al., 2011
79,2	Neves et al., 2011
81,3	Neves et al., 2011
79,3	Neves et al., 2011
74,0	Reis et al., 2012b
73,0	Reis et al., 2012b
74,5	Reis et al., 2012b
79,9	Assis et al., 2012
79,2	Assis et al., 2012
79,2	Assis et al., 2012
78,9	Assis et al., 2012
79,5	Assis et al., 2012
77,4	Castro et al., 2013
77,6	Castro et al., 2013
75,8	Castro et al., 2013
76,5	Castro et al., 2013
76,6	Castro et al., 2013
75,1	Castro et al., 2013
74,3	Castro et al., 2013
76,4	Castro et al., 2013
75,5	Castro et al., 2013

<b>TCF (%)</b>	<b>Fonte</b>
74,7	Castro et al., 2013
75,8	Castro et al., 2013
72,9	Castro et al., 2013
74,9	Castro et al., 2013
73,9	Castro et al., 2013
73,9	Castro et al., 2013
73,6	Castro et al., 2013
74,4	Castro et al., 2013
76,0	Brito e Barrichelo, 1977
77,0	Brito e Barrichelo, 1977
74,3	Brito e Barrichelo, 1977
76,4	Brito e Barrichelo, 1977
77,8	Brito e Barrichelo, 1977
74,0	Brito e Barrichelo, 1977
78,2	Brito e Barrichelo, 1977
73,5	Brito e Barrichelo, 1977
74,0	Brito e Barrichelo, 1977
75,0	Brito e Barrichelo, 1977
69,3	Trugilho et al., 2005
70,3	Trugilho et al., 2005
64,8	Trugilho et al., 2005
69,5	Trugilho et al., 2005
70,1	Trugilho et al., 2005
72,5	Trugilho et al., 2005
71,6	Trugilho et al., 2005
70,4	Trugilho et al., 2005
67,0	Trugilho et al., 2005
70,0	Trugilho et al., 2005
67,8	Trugilho et al., 2005
66,2	Trugilho et al., 2005
71,3	Trugilho et al., 2005
68,4	Trugilho et al., 2005
69,7	Trugilho et al., 2005
66,7	Trugilho et al., 2005
71,2	Trugilho et al., 2005
66,1	Trugilho et al., 2005
77,6	Trugilho et al., 2001
79,9	Trugilho et al., 2001
80,5	Trugilho et al., 2001
81,6	Trugilho et al., 2001
78,2	Trugilho et al., 2001
80,7	Trugilho et al., 2001
78,7	Trugilho et al., 2001
79,7	Trugilho et al., 2001
76,2	Trugilho et al., 2001
78,5	Trugilho et al., 2001

<b>TCF (%)</b>	<b>Fonte</b>
74,8	Brito et al., 1983
74,3	Brito et al., 1983
71,2	Brito et al., 1983
72,6	Brito et al., 1983
73,3	Brito et al., 1983
74,0	Brito et al., 1983
72,2	Brito et al., 1983
71,2	Brito et al., 1983
72,2	Brito et al., 1983
71,7	Botrel et al., 2007
73,6	Botrel et al., 2007
74,1	Botrel et al., 2007
74,1	Botrel et al., 2007
73,4	Botrel et al., 2007
76,3	Botrel et al., 2007
76,9	Botrel et al., 2007
74,9	Botrel et al., 2007
73,2	Botrel et al., 2007
75,2	Vital et al., 1989
77,4	Vital et al., 1989
77,9	Vital et al., 1989
78,2	Vital et al., 1989
77,3	Vital et al., 1989
69,4	Barcellos, 2007
70,8	Barcellos, 2007
69,3	Barcellos, 2007
72,8	Barcellos, 2007
71,9	Barcellos, 2007
79,2	Donato, 2017
79,1	Donato, 2017
<b>75,3</b>	<b>Média</b>

## Apêndice C – Relatórios gerados no *Charcoal System*

### BALANÇO DE CARBONO

Nome Completo: Lauana Silva

Nome da propriedade: Simulação

Tamanho: 1 ha

Cidade: Viçosa

Estado: MG

Número do projeto: 1

Tipo de forno: Outro

Quantidade de fornos: 1

Queimador de gases: Sem Queimador

Tipo de Queimador: -

Monitoramento da temperatura de carbonização: Sem Ferramenta

Tipo de Ferramenta: -

### PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL E COPRODUTOS

#### Produção líquida de carvão

Anual 0,0 mdc/ano

Anual 0,0 t/ano

#### Coprodutos

Atiços 0,0 t/ano

Finos 0,0 t/ano

### EMISSÕES DE GEE DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

#### Emissões de metano (CH<sub>4</sub>)

Anual 0,000 tCH<sub>4</sub>

Por ciclo 0,000 tCH<sub>4</sub>

Por tonelada de carvão 0,000 kgCH<sub>4</sub>

Por MDC 0,000 kgCH<sub>4</sub>

-

0,000 tCO<sub>2e</sub>

0,000 tCO<sub>2e</sub>

0,000 kgCO<sub>2e</sub>

0,000 kgCO<sub>2e</sub>

#### Emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Anual 0,000 tCO<sub>2e</sub>

Por ciclo 0,000 tCO<sub>2e</sub>

Por tonelada de carvão 0,000 kgCO<sub>2e</sub>

Por MDC 0,000 kgCO<sub>2e</sub>

Emissão total	
Anual	0,000 tCO <sub>2</sub> e
Por ciclo	0,000 tCO <sub>2</sub> e
Por tonelada de carvão	0,000 tCO <sub>2</sub> e
Por MDC	0,000 tCO <sub>2</sub> e

REMOÇÃO DE CARBONO			
Áreas Plantadas		Florestas Nativas	
Estoque total	0,000 tCO <sub>2</sub> e	Anual	0,000 tCO <sub>2</sub> e
Remoção total			
Anual			0,000 tCO <sub>2</sub> e

BALANÇO DE CARBONO TOTAL	
Emissão Total	0,000 tCO <sub>2</sub> e/ano
Remoção Total	0,000 tCO <sub>2</sub> e/ano
Balanço de Carbono Total	0,000 tCO <sub>2</sub> e/ano
<b>Resultado:</b> O balanço de carbono da sua produção de carvão vegetal é negativo. Isso significa que sua atividade está contribuindo para a intensificação das mudanças climáticas.	

Figura 1C – Relatório “Balanço de carbono”.

## EMISSIONES DA SIDERURGIA PELA CARBONIZAÇÃO

**Nome Completo:** Lauana Silva

**Nome da propriedade:** Simulação

**Tamanho:** 1 ha

**Cidade:** Viçosa

**Estado:** MG

**Número do projeto:** 1

**Tipo de forno:** Outro

**Quantidade de fornos:** 1

**Queimador de gases:** Sem Queimador

**Tipo de Queimador:** -

**Monitoramento da temperatura de carbonização:** Sem Ferramenta

**Tipo de Ferramenta:** -

**Produção de carvão** 0,0 mdc/ano

0,0 t/ano

**Teor de carbono fixo** 0,0 %

**Total de carbono fixo** 0,0 t Carbono fixo

**Balanco de Carbono** 0,000 tCO<sub>2</sub>e/ano

0,0000 tCO<sub>2</sub>e/t Carbono fixo

**Demanda para produção de gusa**

0,00 t Carbono fixo/t Gusa

## RESULTADO

**Emissão da Siderurgia pela carbonização** 0,0000 tCO<sub>2</sub>e/t Gusa

**Resultado:** Cada tonelada de ferro gusa produzida com o seu carvão vegetal contribui para a emissão de 0,0000 tCO<sub>2</sub>e para a atmosfera.

Figura 2C – Relatório “Emissões da siderurgia pela carbonização”.

OBTENÇÃO DE MADEIRA	
Nome Completo: Lauana Silva	
Nome da propriedade: Simulação	Tamanho: 1 ha
Cidade: Viçosa	Estado: MG
Número do projeto: 1	
Tipo de forno: Outro	Quantidade de fornos: 1
Queimador de gases: Sem Queimador	Tipo de Queimador: -
Monitoramento da temperatura de carbonização: Sem Ferramenta	Tipo de Ferramenta: -
Forma de obtenção da madeira:	
Forma de obtenção dos dados:	
COMPRA	
Quantidade total de madeira	0,00 m <sup>3</sup>
Custo médio de compra da madeira	0,00/m <sup>3</sup>
PLANTIO PRÓPRIO	
Horizonte de planejamento (anos)	anos
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	%
Períodos de capitalização	anos
Área plantada	ha
<b>Total</b>	
VPL	R\$ 0,00 Inviável
VPE	R\$ 0,00 Inviável
TIR	0,0 % Inviável
B/C	0,00 Inviável
Quantidade total de madeira	0,00 m <sup>3</sup>
<b>Por Hectare</b>	
VPL	R\$ 0,00 Inviável
VPE	R\$ 0,00 Inviável
TIR	0,0 % Inviável
B/C	0,00 Inviável
Custo médio de produção da madeira	0,00/m <sup>3</sup>
TOTAL	
Quantidade total de madeira	0,00 m <sup>3</sup>
Custo médio de obtenção da madeira	0,00/m <sup>3</sup>

Figura 3C – Relatório “Obtenção de madeira”.



### PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

<b>Nome Completo:</b> Lauana Silva	
<b>Nome da propriedade:</b> Simulação	<b>Tamanho:</b> 1 ha
<b>Cidade:</b> Viçosa	<b>Estado:</b> MG

<b>Número do projeto:</b> 1	
<b>Tipo de forno:</b> Outro	<b>Quantidade de fornos:</b> 1
<b>Queimador de gases:</b> Sem Queimador	<b>Tipo de Queimador:</b> -
<b>Monitoramento da temperatura de carbonização:</b> Sem Ferramenta	<b>Tipo de Ferramenta:</b> -

**Forma de obtenção dos dados:** undefined (undefined)

<b>Horizonte de Planejamento (anos)</b>	anos
<b>Taxa Mínima de Atratividade (TMA)</b>	%
<b>Períodos de capitalização</b>	anos

### TOTAL

<b>VPL</b>	R\$ 0,00 Inviável
<b>VPE</b>	R\$ 0,00 Inviável
<b>TIR</b>	0,00 % Inviável
<b>B/C</b>	R\$ 0,00 Inviável

<b>Quantidade total de carvão vegetal</b> 0,00 mdc	<b>Custo médio de produção de carvão vegetal</b> R\$ 0,00/mdc
--	---

Figura 4C – Relatório “Produção de carvão vegetal”.

**Apêndice D** – Dados utilizados para cálculo do balanço de carbono das propriedades selecionadas

Quadro 1D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 1

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Circular	Circular
Quantidade de fornos	-	23	29,47
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	3,30	3,00
Altura dos fornos	m	2,40	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Clone GG 100 (E. grandis x E. urophylla)	Clone GG 100 (E. grandis x E. urophylla)
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enforcada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	17,89	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	8,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	8,42	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,5	1,3
Rendimento gravimétrico	%	29,6	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	154,0	154,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	16,38	16,38

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*

\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 2D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 2

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Circular	Circular
Quantidade de fornos	-	14	17,57
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	3,40	3,00
Altura dos fornos	m	2,30	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	E. urophylla x E. grandis	E. urophylla x E. grandis
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	17,52	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	8,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,00	1,00
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	7,38	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,7	1,3
Rendimento gravimétrico	%	26,5	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	269,78	269,78
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	1,94	1,94

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 3D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 3

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Circular	Circular
Quantidade de fornos	-	2	5,06
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	5,35	3,00
Altura dos fornos	m	2,30	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Outro	Outro
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	53,01	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	12,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	24,25	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,5	1,3
Rendimento gravimétrico	%	28,8	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	210,0	210,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Cerrado	Cerrado
Idade	anos	-	-
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	36,68	36,68

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 4D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 4

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Fornos de encosta	Circular
Quantidade de fornos	-	13	8,67
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	-	3,00
Altura dos fornos	m	-	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Outro	Outro
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	550,0	550,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	13,96	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	242,0	242,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	12,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	6,94	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,4	1,3
Rendimento gravimétrico	%	31,2	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	210,0	210,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	5,86	5,86

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 5D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 5

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Rabo-quente	Circular
Quantidade de fornos	-	14	17,37
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	-	3,00
Altura dos fornos	m	-	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Outro	Outro
Teor de umidade base seca	%	36 – 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	17,32	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	8,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	7,41	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,6	1,3
Rendimento gravimétrico	%	26,9	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	210,0	210,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Cerrado	Cerrado
Idade	anos	-	-
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	2,60	2,60

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 6D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 6

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Fornos de encosta	Circular
Quantidade de fornos	-	15	11,90
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	-	3,00
Altura dos fornos	m	-	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Outro	Outro
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	550,0	550,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	16,61	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	242,0	242,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	12,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	8,41	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,4	1,3
Rendimento gravimétrico	%	31,8	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	210,0	210,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)***	ha	2,87	2,87

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

\*\*\*Valor hipotético, estimado como 5% do tamanho total da propriedade

Quadro 7D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 7

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Circular	Circular
Quantidade de fornos	-	4	4,20
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Com ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	Pirometria	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	3,00	3,00
Altura dos fornos	m	2,30	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	E. urophylla x E. grandis	E. urophylla x E. grandis
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	14,67	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	8,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	7,12	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,4	1,3
Rendimento gravimétrico	%	30,5	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	175,0	175,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	21,29	21,29

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*



Quadro 8D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 8

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Fornos de encosta	Circular
Quantidade de fornos	-	10	9,78
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	-	3,00
Altura dos fornos	m	-	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	E. urophylla x E. grandis	E. urophylla x E. grandis
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	20,47	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	12,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	10,32	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,4	1,3
Rendimento gravimétrico	%	31,7	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	175,0	175,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	7,00	7,00

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 9D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 9

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Fornos de encosta	Circular
Quantidade de fornos	-	4	3,62
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	-	3,00
Altura dos fornos	m	-	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	E. urophylla	E. urophylla
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	550,0	550,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	18,94	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	242,0	242,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	12,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	9,52	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,4	1,3
Rendimento gravimétrico	%	31,6	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	231,0	231,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	0,19	0,19

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 10D– Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 10

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Circular	Circular
Quantidade de fornos	-	16	24,80
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	3,60	3,00
Altura dos fornos	m	2,50	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Clone GG 100 (E. grandis x E. urophylla)	Clone GG 100 (E. grandis x E. urophylla)
Teor de umidade base seca	%	36 - 40	36 - 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	500,0	500,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	21,64	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	220,0	220,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	8,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	10,12	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,5	1,3
Rendimento gravimétrico	%	29,4	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	210,0	210,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Cerrado	Cerrado
Idade	anos	-	-
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	105,36	105,36

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

Quadro 11D – Dados de entrada para o cálculo do balanço de carbono da propriedade 11

Variável	Unidade	Sistema atual	Sistema forno-fornalha
<i>Cadastro do projeto</i>			
Tipo de forno	-	Fornos de encosta	Circular
Quantidade de fornos	-	4	4,95
Monitoramento da temperatura de carbonização	-	Sem ferramenta	Com ferramenta
Tipo de ferramenta	-	-	Pirometria
Queimador de gases	-	Sem queimador	Com queimador
Tipo de queimador	-	-	Contínuo
% de queima dos gases*	%	-	80,0
Diâmetro dos fornos	m	-	3,00
Altura dos fornos	m	-	1,60
<i>Emissão de gases de efeito estufa</i>			
Material genético	-	Outro	Outro
Teor de umidade base seca	%	36 – 40	36 – 40
Densidade básica (madeira)	kg m <sup>-3</sup>	550,0	550,0
Fator de empilhamento	m <sup>3</sup> st <sup>-1</sup>	0,7	0,7
Madeira enfiada por ciclo	st forno <sup>-1</sup>	25,94	13,96
Densidade à granel (carvão vegetal)	kg mdc <sup>-1</sup>	242,0	242,0
Teor de carbono fixo*	%	75,3	75,3
Duração média do ciclo de carbonização	dias	12,0	8,0
Período de inatividade	dias mês <sup>-1</sup>	1,0	1,0
Período útil de utilização dos fornos (estação seca)	meses ano <sup>-1</sup>	12,0	12,0
Produção por ciclo (estação seca)	mdc forno <sup>-1</sup>	13,20	7,44
Período útil de utilização dos fornos (estação chuvosa)	meses ano <sup>-1</sup>	0,0	0,0
Rendimento volumétrico**	m <sup>3</sup> mdc <sup>-1</sup>	1,4	1,3
Rendimento gravimétrico	%	32,0	33,5
Geração de atijos*	%	4,0	4,0
Geração de finos (UPC)*	%	3,7	3,7
Geração de finos (carregamento e transporte)*	%	5,3	5,3
Geração de finos (peneiramento)*	%	9,7	9,7
<i>Remoção de CO<sub>2</sub></i>			
Volume total de madeira na idade de corte	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	210,0	210,0
Localização	-	Demais regiões do país	Demais regiões do país
Bioma	-	Mata Atlântica	Mata Atlântica
Idade	anos	> 30	> 30
Área de Preservação Permanente (APP)	ha	2,45	2,45

\*Valores *default* sugeridos pelo *Charcoal System*\*\*Valor estimado pelo *Charcoal System*

**Apêndice E** – Telas que compõem a ferramenta para cálculo das remoções de CO<sub>2</sub>, das emissões de GEE, do balanço e da pegada de carbono nos Sistemas Agroflorestais (SAFs)

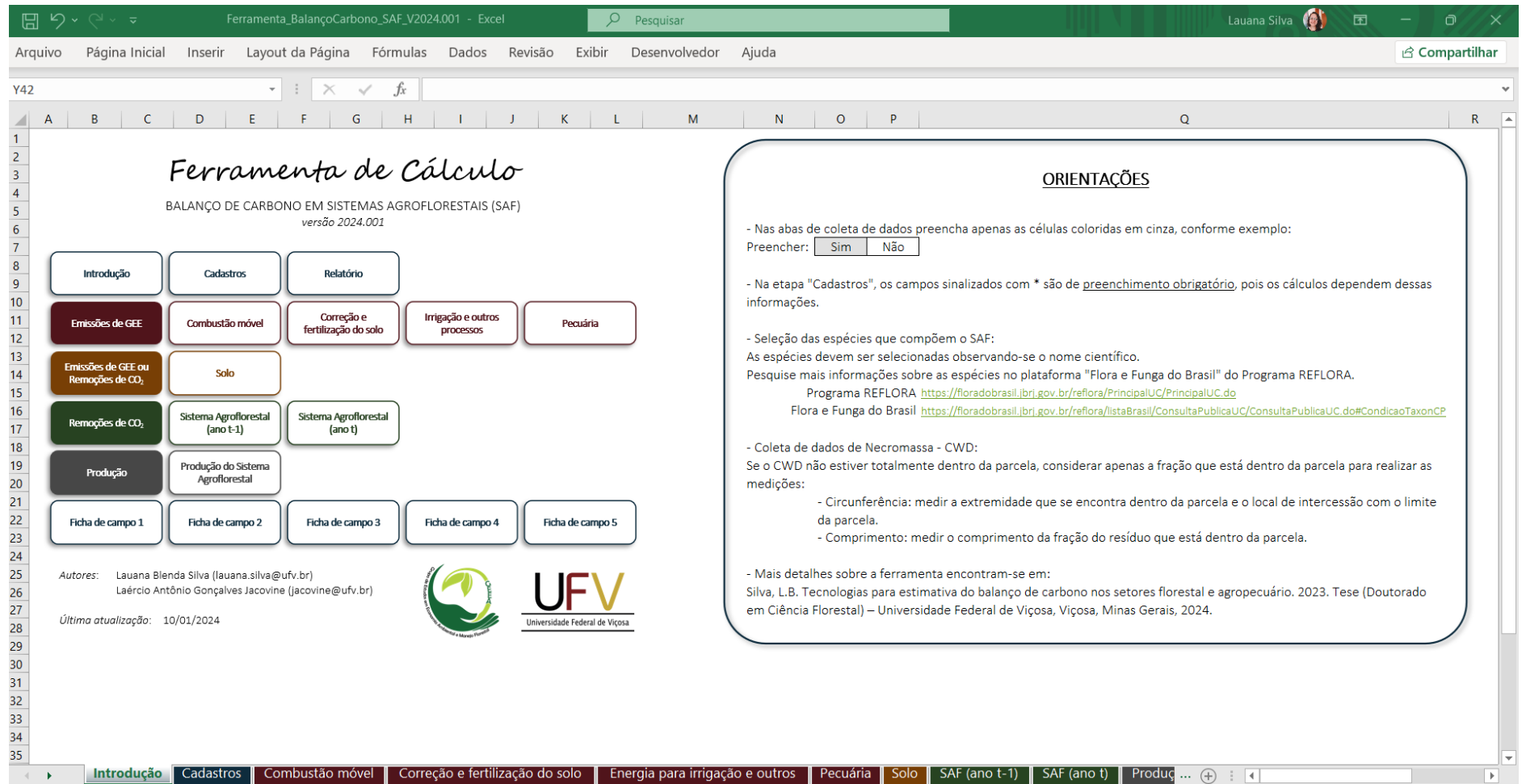


Figura 1E – Tela “Introdução”.

Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

T41

Introdução Cadastros Relatório Combustão móvel Correção e fertilização solo Irrigação e outros processos Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF

### CADASTROS

PRODUTOR		PROPRIEDADE RURAL	
Nome completo:		Nome da propriedade:	
CPF:		Tamanho (ha):	
Data de nascimento: dd/mm/aaaa		Cidade:	
E-mail:		Estado:	
Endereço:		Bioma*:	
Número:		Cadastro do CAR:	
Complemento:			
Bairro:		PRECIPITAÇÃO E IRRIGAÇÃO*	
Cidade:		Precipitação média anual (mm/ano)*:	
CEP:		Tipo de irrigação*:	
Estado:		Irrigação média anual (mm/ano)*:	
Celular:		Quantidade total de água (mm/ano):	0,00
		Clima:	

**PERÍODO DE REFERÊNCIA DO INVENTÁRIO DE GEE\***

*Período do qual serão quantificadas as emissões de GEE e as remoções de CO<sub>2</sub>. Deve corresponder a um ano (12 meses), podendo seguir o calendário – entre 1ª de janeiro a 31 de dezembro – ou não.*

Período de referência\*:  -

Introdução **Cadastros** Combustão móvel Correção e fertilização do solo Energia para irrigação e outros Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produç ...

Figura 2E – Tela “Cadastros”.

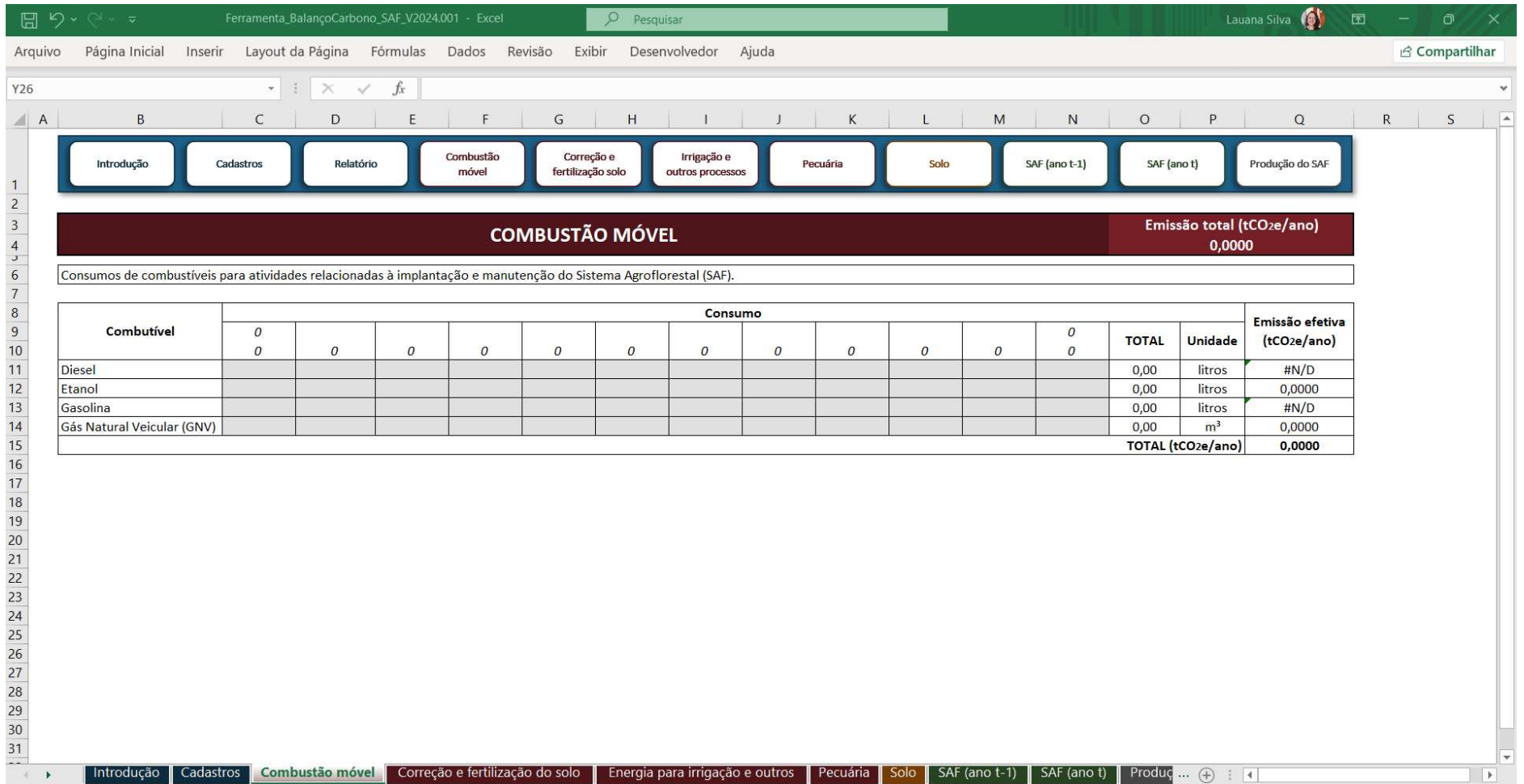


Figura 3E – Tela “Combustão móvel”.

Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

AA104

1 2 3 4 5 6 7 8 14 15 16 17 24 25 26 27 46 47 48 49 68 69 70 71 82 83 84 85 86 87 88 89

Introdução Cadastros Relatório Combustão móvel Correção e fertilização solo Irrigação e outros processos Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF

**CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO DO SOLO** Emissão total (tCO<sub>2</sub>e/ano)  
0,0000

Utilização de corretivos do solo e fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos no Sistema Agroflorestal (SAF).

**CORREÇÃO DO SOLO** TOTAL (tCO<sub>2</sub>e/ano) 0,0000

**FERTILIZAÇÃO SINTÉTICA - UREIA** TOTAL (tCO<sub>2</sub>e/ano) 0,0000

**FERTILIZAÇÃO SINTÉTICA - OUTROS FERTILIZANTES NITROGENADOS** TOTAL (tCO<sub>2</sub>e/ano) 0,0000

**FORMULAÇÕES NPK** TOTAL (tCO<sub>2</sub>e/ano) 0,0000

**FERTILIZAÇÃO ORGÂNICA** TOTAL (tCO<sub>2</sub>e/ano) 0,0000

Introdução Cadastros Combustão móvel **Correção e fertilização do solo** Energia para irrigação e outros Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produç ...

Figura 4E – Tela “Correção e fertilização do solo”.



Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

Z43

Introdução Cadastros Relatório Combustão móvel Correção e fertilização solo Irrigação e outros processos Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF

**ENERGIA PARA IRRIGAÇÃO E OUTROS PROCESSOS** Emissão total (tCO<sub>2</sub>e/ano)  
0,0000

Consumo de energia elétrica da rede e/ou outros combustíveis para a geração de energia. Essa energia deve ser utilizada nas atividades relacionadas ao Sistema Agroflorestal (SAF), como, por exemplo a irrigação.

Fonte de energia	Consumo											TOTAL	Unidade	Emissão efetiva (tCO <sub>2</sub> e/ano)	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0
Energia elétrica da rede													0,00	kWh	0,0000
Diesel													0,00	litros	#N/D
Carvão vegetal													0,00	kg	0,0000
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)													0,00	kg	0,0000
Lenha													0,00	kg	0,0000
Resíduos vegetais													0,00	kg	0,0000
													<b>TOTAL (tCO<sub>2</sub>e/ano)</b>		<b>0,0000</b>

Introdução Cadastros Combustão móvel Correção e fertilização do solo **Energia para irrigação e outros** Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produç ...

Figura 5E – Tela “Energia para irrigação e outros processos”.

Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

AI59

Introdução Cadastros Relatório Combustão móvel Correção e fertilização solo Irrigação e outros processos Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF

**PECUÁRIA** Emissão total (tCO<sub>2</sub>e/ano) 0,0000

Presença de animais no Sistema Agroflorestal (SAF).

Categoria	Sub-categoria	Sistema de manejo de dejetos ⓘ	Quantidade de animais												Emissão efetiva (tCO <sub>2</sub> e/ano)	
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
AVES	Galinhas e poedeiras															0,0000
	Pintos, frangos e galos															
	Codornas															
CAPRINOS	Sistemas de alta produtividade (50 kg)															0,0000
	Sistemas de baixa produtividade (28 kg)															
GADO DE CORTE	Bovinos < 1 ano															0,0000
	Bovinos > 1 ano < 2 anos															
	Touros > 2 anos															
	Machos de corte > 2 anos (não confinados)															
	Fêmeas de corte > 2 anos (não confinados)															
GADO DE LEITE	Outros animais > 2 anos (confinados)															0,0000
	Alta produção (mais que 5,48 litros de leite/dia)															
OVINOS	Baixa produção (até 5,48 litros de leite/dia)															0,0000
	Sistemas de alta produtividade (40 kg)															
SUÍNOS ⓘ	Sistemas de baixa produtividade (31 kg)															0,0000
	Reprodutor	Industrial														
		Subsistência														
	Aleitamento/creche	Industrial														
Subsistência																
Terminação	Industrial															
	Subsistência															
	Asininos															0,0000
	Ávestruz															0,0000
	Bubalinos															0,0000

Introdução Cadastros Combustão móvel Correção e fertilização do solo Energia para irrigação e outros Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produç ...

Figura 6E – Tela “Pecuária”.

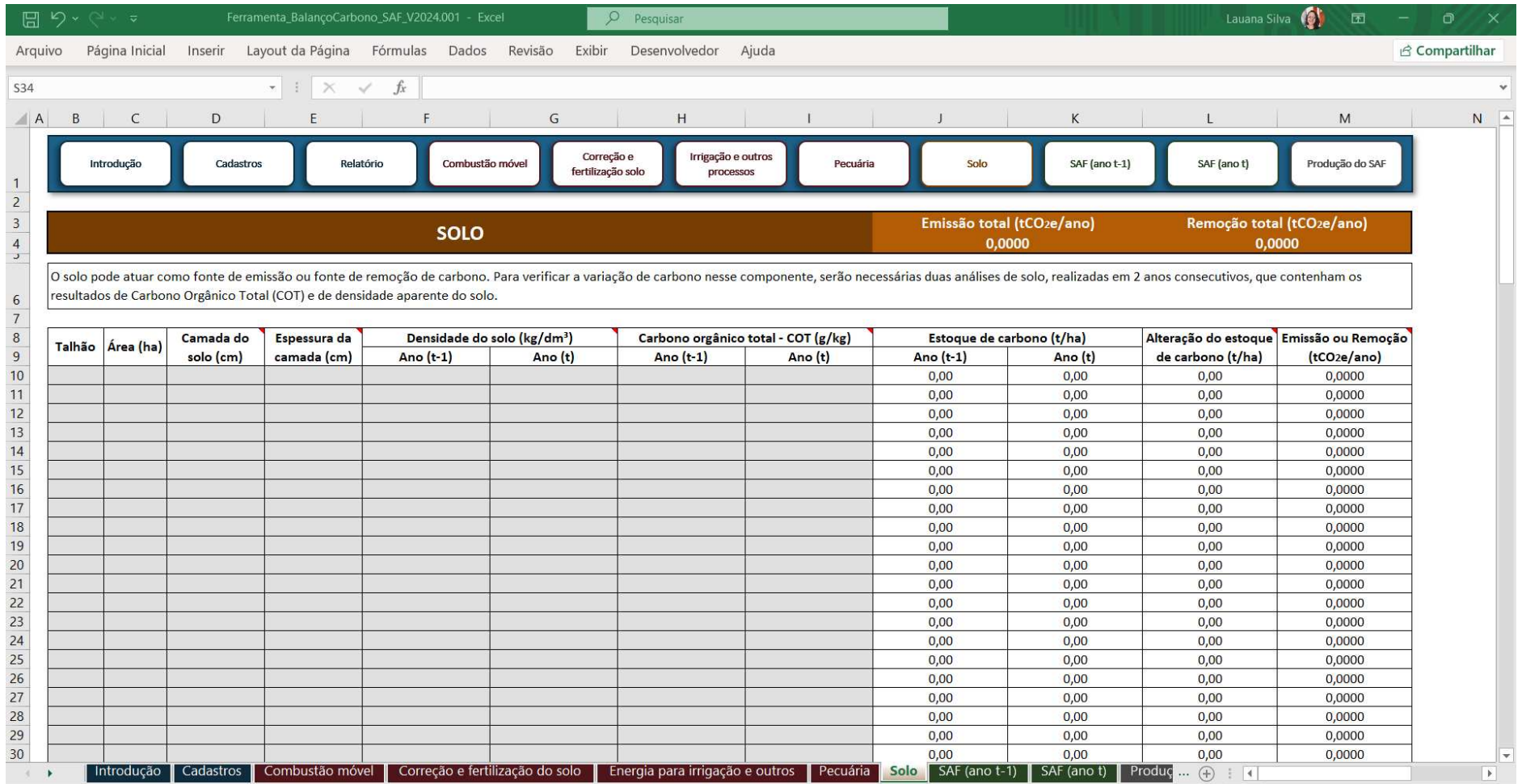


Figura 7E – Tela “Solo”.

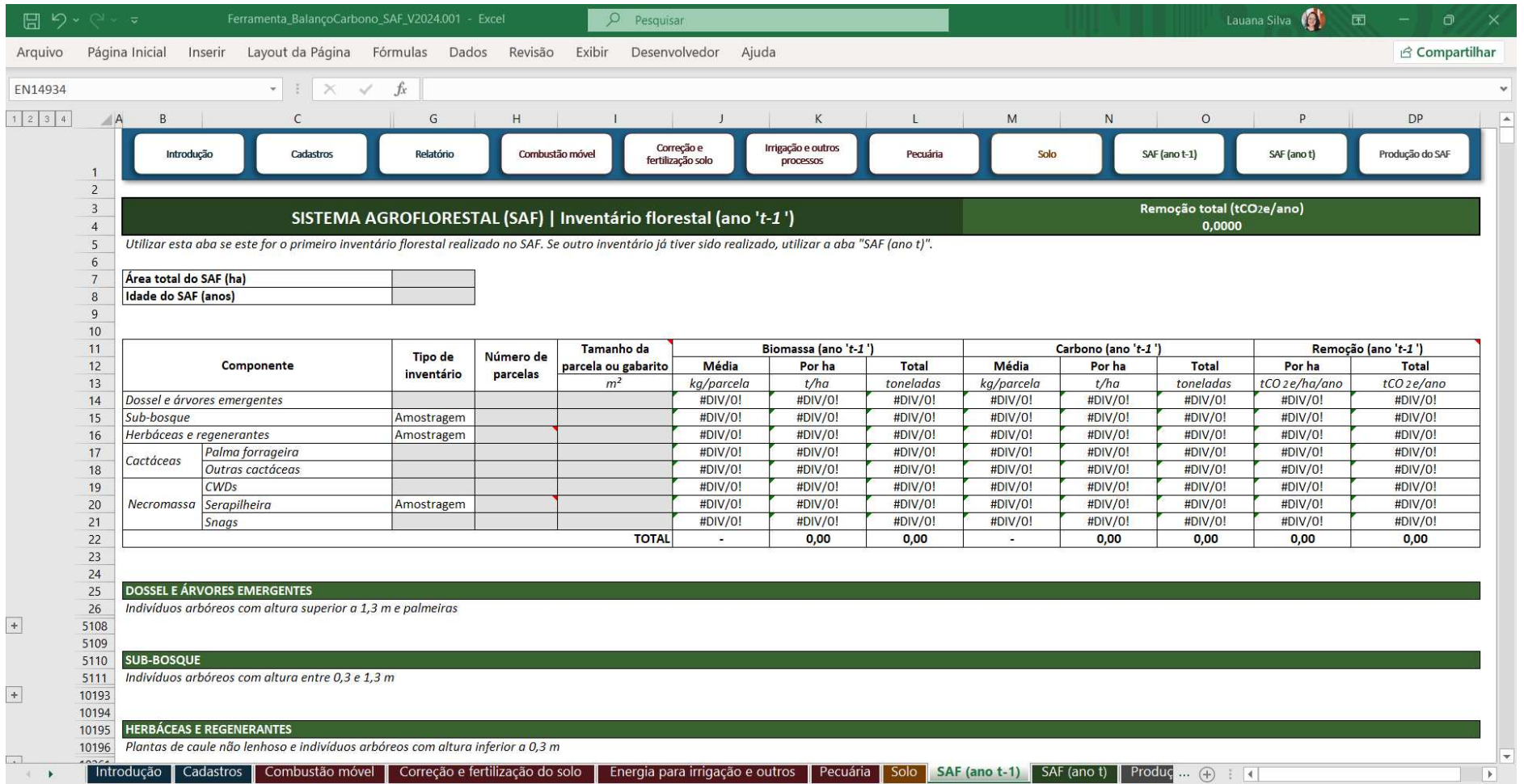


Figura 8E – Tela “SAF (ano t-1)”.

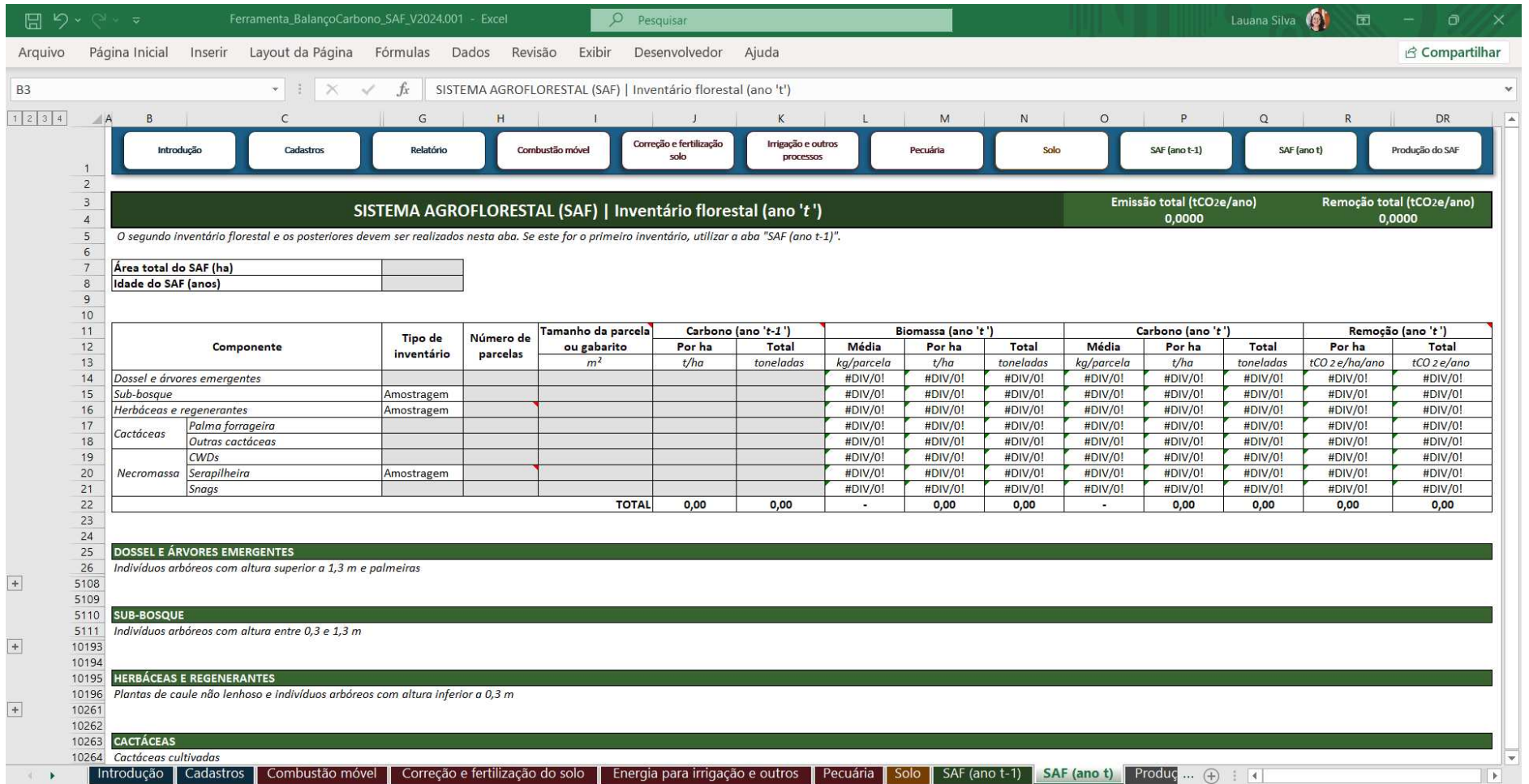


Figura 9E – Tela “SAF (ano t)”.

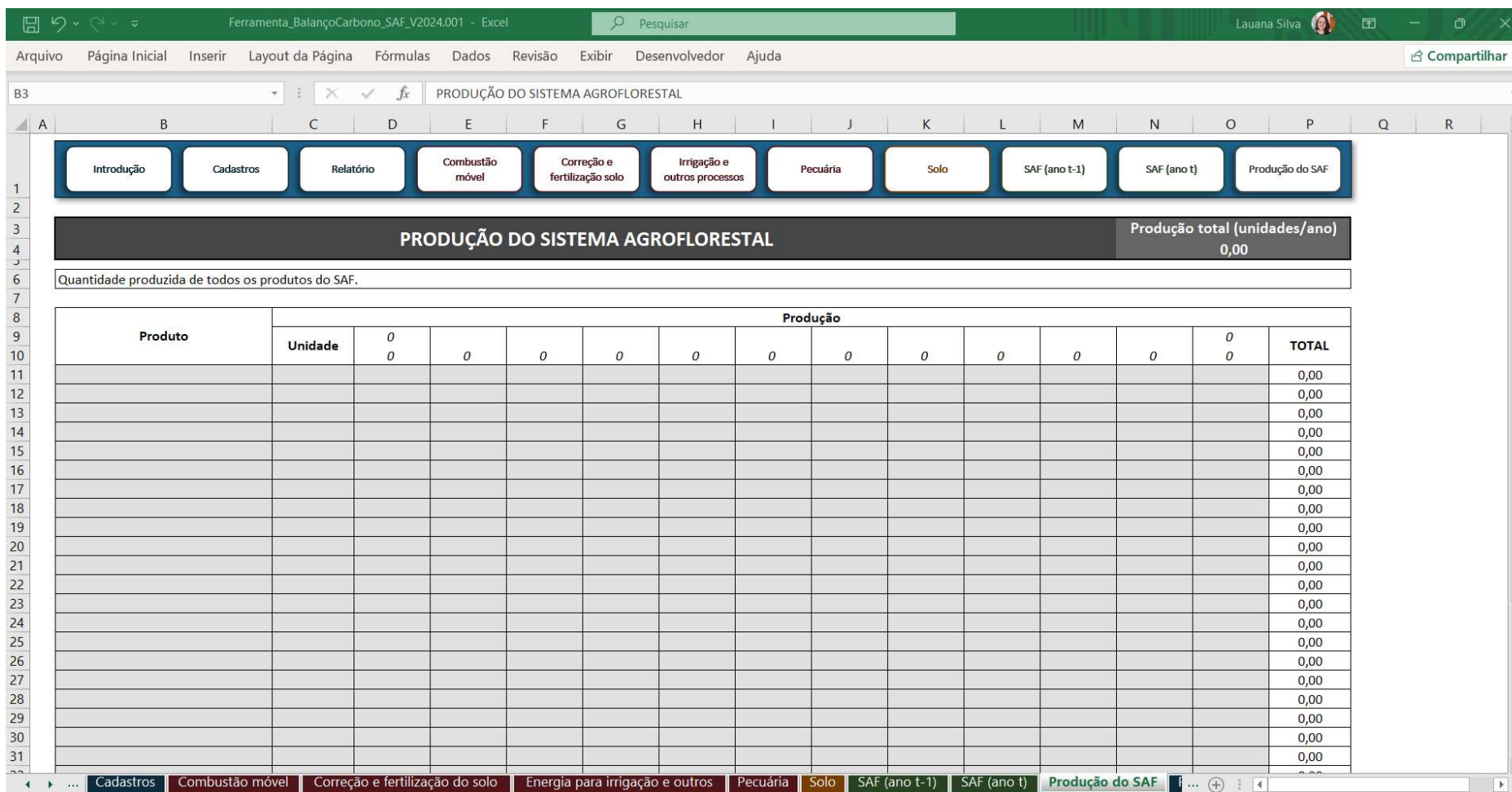


Figura 10E – Tela “Produção do SAF”.

Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Pesquisar

Lauana Silva

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

Compartilhar

B2

RELATÓRIO

Período de referência  
0 0 - 0 0

Produtor (a): 0  
Nome da propriedade rural: 0  
Tamanho (ha): 0,00  
Cidade: 0

CAR: 0  
Estado: 0

FONTE	EMISSIONES DE GEE	REMOÇÕES DE CO <sub>2</sub>	EMISSIONES BIOGÊNICAS	UNIDADE
Combustão móvel	0,0000	-	0,0000	tCO <sub>2</sub> e/ano
Correção e fertilização do solo	0,0000	-	-	tCO <sub>2</sub> e/ano
Irrigação e outros processos	0,0000	-	0,0000	tCO <sub>2</sub> e/ano
Pecuária	0,0000	-	-	tCO <sub>2</sub> e/ano
Solo	0,0000	0,0000	-	tCO <sub>2</sub> e/ano
Sistema Agroflorestal	0,0000	0,0000	-	tCO <sub>2</sub> e/ano
<b>Total</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	tCO <sub>2</sub> e/ano

**PRODUÇÃO ANUAL** 0,00 unidades/ano

\*Unidade produzida = quilos, litros, m<sup>3</sup>

**BALANÇO DE CARBONO**  
0,0000 tCO<sub>2</sub>e

**PEGADA DE CARBONO**  
#DIV/0! kgCO<sub>2</sub>e/un. produzida

**Remoções > Emissões**  
Os seus SAFs já estão contribuindo para o combate às mudanças climáticas.

**Emissões > Remoções**  
Os seus SAFs ainda não estão contribuindo para o combate às mudanças climáticas.

A pegada de carbono é uma medida que indica o impacto ambiental, em termos de gases de efeito estufa (GEE), causado por um produto, serviço, evento, organização ou qualquer entidade.

Combustão móvel Correção e fertilização do solo Energia para irrigação e outros Pecuária Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF Relatório

Figura 11E – Tela “Relatório”.

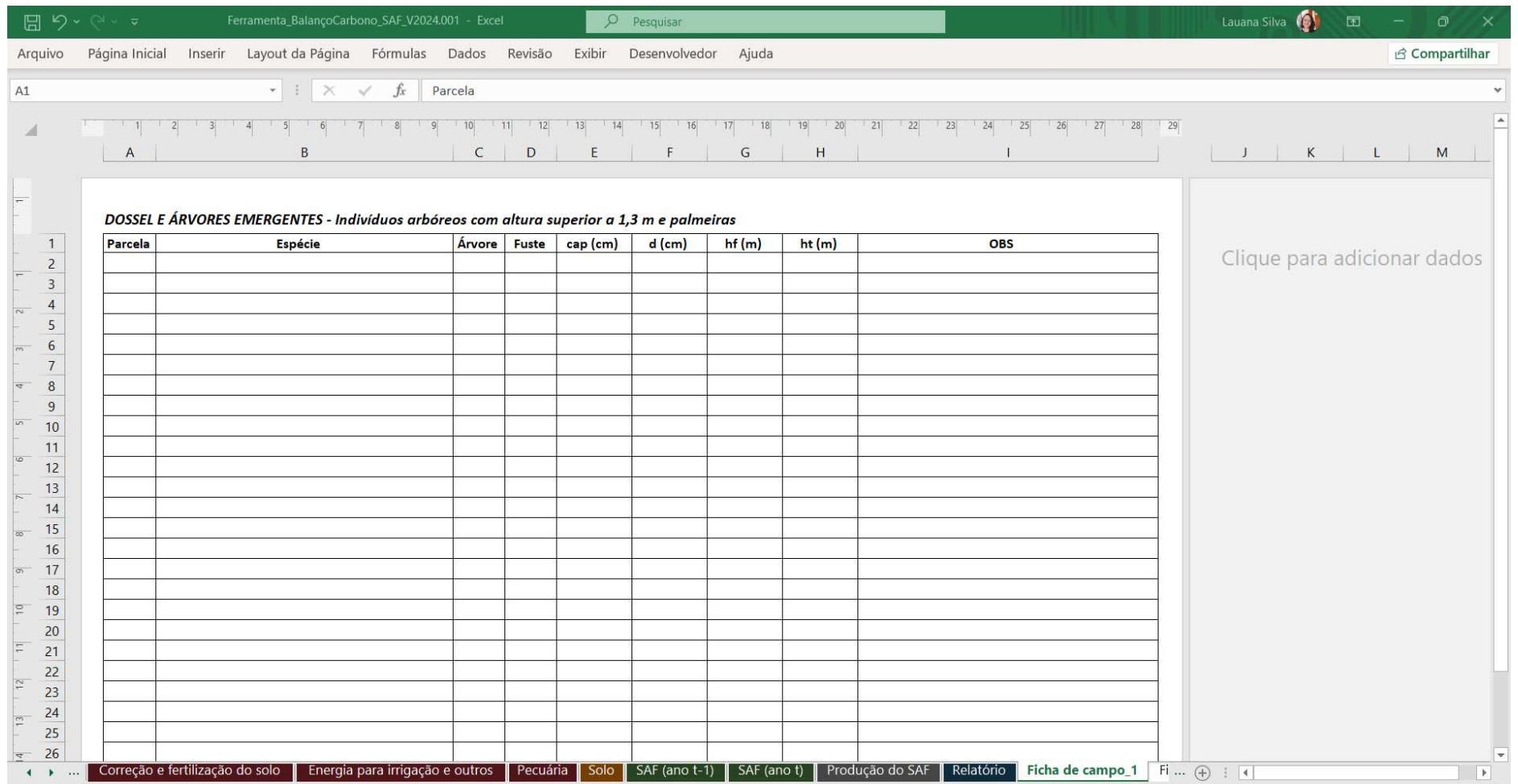


Figura 12E – Tela “Ficha de campo 1 - Dossel e árvores emergentes”.



Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

A1

Parcela

**SUB-BOSQUE - Individuos arbóreos com altura entre 0,3 e 1,3 m**  
**SNAGS - Árvores mortas em pé**

Parcela	Árvore	Fuste	cas (cm)	das (cm)	ht (m)	OBS

Clique para adicionar dados

Energia para irrigação e outros Pecúaria Solo SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF Relatório Ficha de campo\_1 **Ficha de campo\_2** Ficha de camp...

Figura 13E – Tela “Ficha de campo 2 - Sub-bosque / Snags”.

**Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel**

***HERBÁCEAS E REGENERANTES - Plantas de caule não lenhoso e indivíduos arbóreos com altura inferior a 0,3 m***  
***SERAPILHEIRA - Resíduos vegetais de diversos tamanhos e em diferentes estágios de decomposição***

Componente	Parcela	Tamanho do gabarito (m <sup>2</sup> )	Massa úmida do material coletado no gabarito (kg)	Massa úmida da amostra (kg)	Massa seca da amostra (kg)	OBS

Clique para adicionar dados

Tabs: Pecuária, Solo, SAF (ano t-1), SAF (ano t), Produção do SAF, Relatório, Ficha de campo\_1, Ficha de campo\_2, **Ficha de campo\_3**, Ficha de campo\_4, Ficha c...

Figura 14E – Tela “Ficha de campo 3 - Herbáceas e regenerantes / Serapilheira”.



Ferramenta\_BalancoCarbono\_SAF\_V2024.001 - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda

Parcela

**NECROMASSA - Resíduos lenhosos grosseiros (CWDs)**

Parcela	Árvore	Estágio de decomposição	Circunferência 1 (cm)	Circunferência 2 (cm)	Comprimento (m)	OBS

Estágios de decomposição :

SAF (ano t-1) SAF (ano t) Produção do SAF Relatório Ficha de campo\_1 Ficha de campo\_2 Ficha de campo\_3 Ficha de campo\_4 **Ficha de campo\_5**

Clique para adicionar dados

Figura 16E – Tela “Ficha de campo 5 - Necromassa (CWDs)”.



Ano	Parâmetros	Unidades	Mês											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2016	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0960	0,0815	0,0710	0,0757	0,0701	0,0760	0,0725	0,0836	0,0897	0,0925	0,1002	0,0714
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
2017	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0566	0,0536	0,0696	0,0815	0,0847	0,0676	0,0965	0,1312	0,1264	0,1366	0,1193	0,0892
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	7%	7%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
2018	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0640	0,0608	0,0635	0,0523	0,0607	0,0915	0,1076	0,1181	0,1182	0,0802	0,0366	0,0343
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	8%	8%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
2019	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0355	0,0667	0,0530	0,0514	0,0482	0,0426	0,0906	0,1070	0,1024	0,1040	0,1078	0,0913
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	11%
2020	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0916	0,0558	0,0384	0,0296	0,0358	0,0491	0,0400	0,0414	0,0329	0,0961	0,1191	0,1109
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	11%	11%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	10%	10%	11%	11%
2021	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,1164	0,0820	0,0673	0,0764	0,0883	0,1491	0,1634	0,1743	0,1699	0,1786	0,1484	0,1029
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	12%	12%	13%	13%	10%	10%	10%	10%	12%	12%	10%	10%
2022	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0732	0,0503	0,0406	0,0216	0,0280	0,0441	0,0419	0,0457	0,0491	0,0471	0,0402	0,0294
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	% biodiesel no diesel	%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
2023	FE do SIN	tCO <sub>2</sub> /MWh	0,0292	0,0238	0,0296	0,0340	0,0295	0,0528	0,0495	0,0419	0,0343	0,0387		
	% etanol na gasolina	%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%		
	% biodiesel no diesel	%	10%	10%	10%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%		

Fontes: MAPA, 2015, CNPE, 2023, GHG Protocol, 2023, MCTI, 2023

**Apêndice G** – Equações a nível de árvore individual utilizadas para estimar a biomassa seca de indivíduos arbóreos com altura superior a 1,3 metros e palmeiras

Espécie	Bioma	Compartimento	Equação	Fonte
<i>Acacia mangium</i> Willd.	Todos	AGB+BGB	$(0,4103*(d^{2,3315}))^{*(1-0,4307)}$	Adaptado de Gomes, 2017
<i>Acacia mearnsii</i> De Wild.	Todos	AGB+BGB	$10^{(-1,2874+2,80262*\log_{10}(d))}$	Caldeira et al., 2011
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Todos	AGB	$\exp(-9,341381587+2,27623091*\log(d)+0,3954337202*\log(ht))*1000$	Scolforo et al., 2008
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Todos	AGB	$\exp(-5,1733249886+2,8278563823*\log(d)-2,0882060533*\log(ht))*1000$	Scolforo et al., 2008
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Caatinga, Amazônia e Pampa	AGB	$48,7255*(1-\exp(-0,1435*d))^{2,4096}$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Todos	AGB	$-76,809+14,899*d$	Padilha, 2011
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul	Todos	AGB	$0,2482*(d^{2,1628})$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	Todos	AGB	$3,561821+0,044706*(d^{2*ht})$	Souza, 2018
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg. var. <i>peregrina</i>	Todos	AGB	$396,9-93,24*d+5,715*d^2$	Gomes, 2022
<i>Aniba rosiodora</i> Ducke	Todos	AGB	$0,17609*(((d^{2*ht})^{0,78505})$	Krainovic et al., 2017
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	Todos	AGB+BGB	$\exp(-2,12394+2,46033*\log(d))$	Schumacher et al., 2011
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc.	Todos	AGB	$0,3675*(d^{1,8355})$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Astronium urundeuva</i> (M. Allemão) Engl.	Todos	AGB	$0,1397*(d^{2,4659})$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Ateleia glazioviana</i> Baill.	Todos	AGB	$-5,626+1,2986*\text{LOG}(d^{2*ht})$	Fontoura et al., 2017
<i>Attalea phalerata</i> Mart. ex Spreng.	Todos	AGB	$\exp(3,2579+1,1249*\log(ht+1))$	Goodman et al., 2013
<i>Avicennia schaueriana</i> Stapf & Leechm. ex Moldenke	Todos	AGB	$\exp(4,8017+2,5282*\log(d))/1000$	Estrada et al., 2014
<i>Bambusa oldhamii</i> Munro	Todos	AGB	$-13,4200+3,9572*d$	Sanquetta et al., 2015
<i>Bambusa vulgaris</i> Schrad. ex J.C.Wendl.	Todos	AGB	$4,9887+0,0144*(((d^{2*ht})$	Sanquetta et al., 2015
<i>Banara guianensis</i> Aubl.	Todos	AGB	$\exp(-1,90+1,11*\log(d^{2*ht})+0,05*\log(ht))$	Uhl et al., 1988
<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Todos	AGB	$0,0699*(d^{2,2115})*(ht^{0,8155})$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Bauhinia forficata</i> Link	Todos	AGB	$10^{(-2,480+0,9270*\log_{10}(d^{2*ht}))}$	Schacht et al., 1988
<i>Bellucia</i> spp.	Todos	AGB	$\exp(-2,4387+2,0751*\log(d)+0,5360*\log(ht))$	Nelson et al., 1999
<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Todos	AGB	$-5,0085*d+0,7694*(d^{2*ht})$	Lima, 2011
<i>Cecropia glaziovii</i> Snethl.	Todos	AGB	$295,6/(1+\exp(6,1366-0,1161*d-0,1522*ht))$	Uller et al., 2021

<b>Espécie</b>	<b>Bioma</b>	<b>Compartimento</b>	<b>Equação</b>	<b>Fonte</b>
<i>Cecropia sciadophylla</i> Mart.	Todos	AGB	$\exp(-2,5118+2,4257*\log(d))$	Nelson et al., 1999
<i>Cecropia</i> spp.	Todos	AGB	$\exp(-3,78+0,95*\log(d^2)+1,00*\log(ht))$	Uhl et al., 1988
<i>Cedrela odorata</i> L.	Todos	AGB+BGB	$\exp(-2,294+2,365*\log(d))$	Robortella, 2010
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	Todos	AGB+BGB	$\exp(-1,843+1,701*\log(d))$	Robortella, 2010
<i>Cenostigma bracteosum</i> (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis	Todos	AGB	$6,6205+0,0341*((d^2)*ht)$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis	Todos	AGB	$0,0626*(d^2)*ht$	Schacht et al., 1988
<i>Cereus jamacaru</i> DC.	Todos	AGB	$0,0010*(d^3,2327)$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Cnidoscolus quercifolius</i> Pohl	Todos	AGB	$0,6064*(d^1,4216)$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Coccoloba guaranitica</i> Hassler	Todos	AGB	$6,717*\exp(d*0,139)$	Padilha, 2011
<i>Cordia oncocalyx</i> Allemão	Todos	AGB	$8,730+0,0414*((d^2)*ht)$	Schacht et al., 1988
<i>Croton floribundus</i> Spreng.	Todos	AGB	$\exp(-2,8564+2,4771*\log(d))$	Nicodemo et al., 2016
<i>Croton heliotropiifolius</i> Kunth	Todos	AGB	$\exp(-1,6887+1,2224*\log(d)+0,9761*\log(ht))$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Croton hemiargyreus</i> Müll.Arg.	Todos	AGB	$0,886+0,0484*((d^2)*ht)$	Schacht et al., 1988
<i>Croton jacobinensis</i> Baill.	Todos	AGB	$0,3569*(d^1,8565)$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Croton matourensis</i> Aubl.	Todos	AGB	$\exp(-3,4630+2,2885*\log(d)+0,5906*\log(ht))$	Nelson et al., 1999
<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. Ex L.f.) D.Don	Todos	AGB	$5,81707+0,01679*d^2*ht$	Coutinho et al., 2017
<i>Cyathea delgadii</i> Sternb.	Todos	AGB	$0,1523*d^1,1254*ht^1,0338$	Uller et al., 2021
<i>Dalbergia cearensis</i> Ducke	Todos	AGB	$\exp(-3,710+1,878*\log(d*ht))$	Nogueira et al., 2021
<i>Diplokeleba floribunda</i> N.E.Br.	Todos	AGB	$0,306*(d^2,145)$	Padilha, 2011
<i>Diptychandra aurantiaca</i> Tul.	Todos	AGB	$\exp(-2,119+2,38*\log(d))$	Salis et al., 2006
<i>Eremanthus erythropappus</i> (DC.) MacLeish	Todos	AGB	$\exp(-3,6776993+1,0141433*\log((d^2)*ht))$	Scolforo et al., 2008
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh.	Todos	AGB	$0,002222-0,000062*(d^2)+0,00002*(d^2*ht)+0,00001405*(d*ht^2)$	Franco, 1996
<i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill	Todos	AGB	$0,0249*(((d^2)*ht)^0,9679)$	Ribeiro et al., 2015
<i>Euterpe edulis</i> Mart.	Todos	AGB	$0,0175*d^1,5288*ht^1,66$	Uller et al., 2021
<i>Euterpe precatoria</i> Mart.	Todos	AGB	$-108,81+13,589*hf$	Goodman et al., 2013
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Todos	AGB	$\exp(-2,4990+2,1283*\log(d)+0,5508*\log(ht))$	Nelson et al., 1999
<i>Guadua chacoensis</i> (Rojas) Londoño	Todos	AGB	$-27,53382+2,80989*d+1,91081*ht$	Mognon et al., 2014
<i>Guadua weberbaueri</i> Pilg.	Todos	AGB	$0,172*ht+1,18*d-4,478$	Torezan e Silveira, 2000
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Todos	AGB+BGB	$\exp(-1,442+2,058*\log(d))$	Robortella, 2010



Espécie	Bioma	Compartimento	Equação	Fonte
<i>Iriartea deltoidea</i> Ruiz & Pav.	Todos	AGB	$\exp(-3,483+0,94371*\log((d^2)*hf))$	Goodman et al., 2013
<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill.	Todos	AGB	$0,1970*(d^1,8145)$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Kielmeyera coriacea</i> Mart. & Zucc.	Todos	AGB	$\exp(-10,6053+2,20772*\log(d)+0,726309*\log(ht))$ *1000	Scolforo et al., 2008
<i>Laetia procera</i> (Poepp.) Eichler	Todos	AGB	$\exp(-2,6385+2,1976*\log(d)+0,4565*\log(ht))$	Nelson et al., 1999
<i>Laguncularia racemosa</i> (L.) C.F.Gaertn.	Todos	AGB	$0,1214*((d^2)*ht)^0,8615$	Medeiros e Sampaio, 2008
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	Todos	AGB+BGB	$\exp(3,4349-0,2046*ht+1,4603*\log(cap))/1000$	Aleixo et al., 2008
<i>Licania minutiflora</i> (Sagot) Fritsch	Todos	AGB	$\exp(-2,265+2,386*\log(d))$	Salis et al., 2006
<i>Magonia pubescens</i> A.St.-Hil.	Todos	AGB	$\exp(-2,888+2,795*\log(d))$	Salis et al., 2006
<i>Mauritia flexuosa</i> L.f.	Todos	AGB	$\exp(2,4647+1,3777*\log(hf))$	Goodman et al., 2013
<i>Mauritiella aculeata</i> (Kunth) Burret	Todos	AGB	$2,8662*hf$	Goodman et al., 2013
<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> Benth.	Todos	AGB	$4,020+0,339*((d^2)*ht)$	Schacht et al., 1988
<i>Mimosa hostilis</i> (Mart.) Benth.	Todos	AGB	$0,3127*(d^2,1183)$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Mimosa ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	Todos	AGB	$\exp(1,1118+1,7371*\log(d)-0,9536*\log(ht))$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Mimosa scabrella</i> Benth.	Todos	AGB+BGB	$-0,49361+0,034865*(d^2)*ht$	Mello et al., 2012
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Todos	AGB	$0,5084*(d^1,7121)$	Dalla Lana et al., 2018
<i>Monteverdia rigida</i> (Mart.) Biral	Todos	AGB	$0,3460*(d^2,0231)$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Musa</i> spp	Todos	AGB	$0,030*(d^2,13)$	Van Noordwijk et al., 2002
<i>Nectandra grandiflora</i> Nees	Todos	AGB+BGB	$\exp(-2,08721+0,0364642*d+0,71874*\log(d^2*ht))$	Barbeiro et al., 2009
<i>Oenocarpus bataua</i> Mart.	Todos	AGB	$\exp(4,5496+0,1387*hf)$	Goodman et al., 2013
Palmeiras (várias)	Todos	AGB	$\exp(-6,3789-0,877*\log(1/d^2)+2,151*\log(ht))$	Saldarriaga et al., 1988
<i>Phyllostachys aurea</i> Rivière & C. Rivière.	Todos	AGB	$(572,612+0,155*((d*10)^2)*ht)/1000$	Monastier et al., 2015
<i>Phyllostylon rhamnoides</i> (Poiss.) Taub.	Todos	AGB	$5,886*\exp(d*0,127)$	Padilha, 2011
<i>Pimenta pseudocaryophyllus</i> (Gomes) Landrum	Todos	AGB	$0,08562+5,147161*hf+0,364603*(d^2)-$ $0,08531*((d^2)*hf)$	Girard, 2005
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (Sénécl.) W. H. Barrett & Golfari	Todos	AGB	$\exp(-4,02 +1,83*\log(d)+1,36*\log(ht))$	Lima et al., 2016
<i>Pinus</i> spp.	Todos	AGB+BGB	$-6,0656+0,0719*(d^2)+0,0171*(d^2)*ht$	Schikowski et al., 2013
<i>Pinus taeda</i> L.	Todos	AGB+BGB	$\exp(8,051060-65,107266*(d^-1))$	Witschoreck, 2008
<i>Platanus x acerifolia</i>	Todos	AGB+BGB	$10^{(-1,161443+0,913291*\log(10((d^2)*ht))}$	Hoppe et al., 2006
<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) Marchand	Todos	AGB	$\exp(-2,083+2,536*\log(d))$	Salis et al., 2006
<i>Rhizophora mangle</i> L.	Todos	AGB+BGB	$\exp(5,534244+2,404770*\log(d))/1000$	Santos et al., 2017
<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	Todos	AGB	$0,2274*(d^2,2710)$	Sampaio e Silva, 2005
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Todos	AGB+BGB	$\exp(-0,441+1,951*\log(d))$	Robortella, 2010

<b>Espécie</b>	<b>Bioma</b>	<b>Compartimento</b>	<b>Equação</b>	<b>Fonte</b>
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Ducke) Barneby	Todos	AGB	$11,35+0,0139*(d^2*ht)$	Oliveira, 2022
<i>Socratea exorrhiza</i> (Mart.) H.Wendl.	Todos	AGB	$\exp(-3,7965+1,0029*\log((d^2)*hf))$	Goodman et al., 2013
<i>Solanum crinitum</i> Lam.	Todos	AGB	$\exp(-2,95+1,02*\log(d^2)+0,83*\log(ht))$	Uhl et al., 1988
<i>Solanum rugosum</i> Dunal	Todos	AGB	$\exp(-3,06+0,89*\log(d^2)+1,11*\log(ht))$	Uhl et al., 1988
<i>Stryphnodendron adstringens</i> (Mart.) Coville	Todos	AGB	$\exp(-11,2875746052+2,3822964052*\log(d)+0,9086217316*\log(ht))*1000$	Scolforo et al., 2008
<i>Syzygium cumini</i> (L.) Skeels	Todos	AGB+BGB	$\exp(-2,450+2,607*\log(d))$	Robortella, 2010
<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore	Todos	AGB+BGB	$\exp(-2,032+2,397*\log(d))$	Robortella, 2010
<i>Tabebuia cassinoides</i> (Lam.) DC.	Todos	AGB+BGB	$-25,095+4,858*d$	Melo et al., 2014
<i>Terminalia argentea</i> Mart. & Zucc.	Todos	AGB	$\exp(-1,915+2,409*\log(d))$	Salis et al., 2006
<i>Vismia cayennensis</i> (Jacq.) Pers.	Todos	AGB	$\exp(-2,4240+2,4855*\log(d)+0,0738*\log(ht))$	Nelson et al., 1999
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	Todos	AGB	$\exp(-3,54+1,13*\log(d^2)+0,77*\log(ht))$	Uhl et al., 1988
<i>Vismia japurensis</i> Reichardt	Todos	AGB	$\exp(-2,0118+2,2337*\log(d)+0,1877*\log(ht))$	Nelson et al., 1999
Várias	Amazônia	AGB+BGB	$0,700*(d^2,018)$	Lima et al., 2012
Várias	Caatinga	AGB	$\exp(-1,2884+1,6102*\log(d)+0,4343*\log(ht))$	Dalla Lana et al., 2018
Várias	Cerrado	AGB	$\exp(-10,1966777197+2,4240650757*\log(d)+0,5413156008*\log(ht))*1000$	Scolforo et al., 2008
Várias	Mata Atlântica	AGB	$10^{(-0,882390231+2,409594057*\log_{10}(d))}$	Vogel et al., 2006
Várias	Pantanal	AGB	$0,188*(d^2,266)$	Padilha, 2011

AGB: biomassa acima do solo (tronco+galhos+folhas)

BGB: biomassa abaixo do solo (raízes)

## Apêndice H – Fatores de forma

<b>Fator de forma</b>	<b>Fonte</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fonte</b>
0,500	SFB, 2019	0,873	Figueiredo et al., 2009
0,712	Heinsdijk e Bastos, 1963	0,874	Figueiredo et al., 2009
0,800	Gimenez, 2014	0,877	Figueiredo et al., 2009
0,742	Colpini et al., 2009	0,874	Figueiredo et al., 2009
0,803	Correia et al., 2017	0,878	Figueiredo et al., 2009
0,770	Borsoi, 2005	0,871	Figueiredo et al., 2009
0,827	Scolforo et al., 1994	0,909	Figueiredo et al., 2009
0,920	Schuch et al., 2008	0,884	Figueiredo et al., 2009
0,629	Souza e Jesus, 1991	0,927	Figueiredo et al., 2009
0,614	Souza e Jesus, 1991	0,814	Figueiredo et al., 2009
0,703	Souza e Jesus, 1991	0,541	Kalil Filho et al., 2019a
0,679	Souza e Jesus, 1991	0,649	Kalil Filho et al., 2019b
0,840	Durlo e Denardi, 1998	0,640	Locatelli et al., 2017
0,869	Figueiredo et al., 2009	0,616	Locatelli et al., 2017
0,899	Figueiredo et al., 2009	0,610	Figueiredo et al., 2005
0,859	Figueiredo et al., 2009	0,520	Figueiredo et al., 2005
0,835	Figueiredo et al., 2009	0,480	Figueiredo et al., 2005
0,906	Figueiredo et al., 2009	0,444	Cipriani et al., 2015
0,870	Figueiredo et al., 2009	0,548	Cipriani et al., 2015
0,907	Figueiredo et al., 2009	0,561	Cipriani et al., 2015
0,804	Figueiredo et al., 2009	0,489	Cipriani et al., 2015
0,833	Figueiredo et al., 2009	0,482	Cipriani et al., 2015
0,916	Figueiredo et al., 2009	0,448	Cipriani et al., 2015
<b>Média</b>		<b>0,740</b>	