

Documentos

410

Colombo, PR / dezembro, 2025

Métricas de carbono do eucalipto destinado à produção de carvão vegetal: análise das emissões e remoções de GEE de florestas plantadas em Minas Gerais

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTAVEL



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTAVEL



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura e Pecuária*

ISSN 1517-526X / e-ISSN 1980-3958

Documentos 410

Dezembro, 2025

Métricas de carbono do eucalipto
destinado à produção de
carvão vegetal: análise das emissões
e remoções de GEE de florestas
plantadas em Minas Gerais

*Franciele Alba
José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira
Josiléia Acordi Zanatta
Luiz Marcelo Brum Rossi
Wilson Anderson Holler*

*Embrapa Florestas
Colombo, PR
2025*

Embrapa Florestas	Edição executiva e revisão de texto
Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba	<i>José Elidney Pinto Júnior</i>
Caixa Postal 319	Normalização bibliográfica
83411-000 Colombo, PR	<i>Francisca Rasche</i>
www.embrapa.br/florestas	Projeto gráfico
www.embrapa.br/fale-conosco/sac	<i>Leandro Sousa Fazio</i>
Comitê Local de Publicações	Diagramação
Presidente	<i>Celso Alexandre de Oliveira Eduardo</i>
<i>Patrícia Póvoa de Mattos</i>	Foto da capa
Vice-presidente	<i>Wilson Anderson Holler</i>
<i>José Elidney Pinto Júnior</i>	
Secretária-executiva	
<i>Elisabete Marques Oaida</i>	
Membros	
<i>Annette Bonnet</i>	
<i>Cristiane Aparecida Fioravante Reis</i>	
<i>Elene Yamazaki Lau</i>	
<i>Guilherme Schnell e Schühli</i>	
<i>Luis Claudio Maranhão Froufe</i>	
<i>Marina Moura Morales</i>	
<i>Paulo Marcelo Veras de Paiva</i>	
<i>Sandra Bos Mikich</i>	Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Florestas

Métricas de carbono do eucalipto destinado à produção de carvão vegetal: análise das emissões e remoções de GEE de florestas plantadas em Minas Gerais. [recurso eletrônico] / Francieli Alba ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas, 2025.

PDF (34 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-526X : e-ISSN 1980-3958 ; 410)

1. *Eucalyptus*. 2. Setor siderúrgico. 3. Mitigação. 4. Mudanças climáticas. 5. Emissões de gases de efeito estufa. 6. Floresta plantada. I. Alba, Francieli. II. Moreira, J. M. M. A. P. III. Zanatta, J. A. IV. Rossi, L. M. B. V. V. Holler, W. A. VI. Série..

CDD (21. ed) 674.098173

Autores

Franciele Alba

Engenheira florestal, doutora em Engenharia Florestal, bolsista na Embrapa Florestas, Colombo, PR

José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira

Engenheiro florestal, doutor em Economia Aplicada, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Josiléia Acordi Zanatta

Agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Luiz Marcelo Brum Rossi

Engenheiro florestal, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Wilson Anderson Holler

Engenheiro cartógrafo, mestre em Desenvolvimento de Tecnologia, analista da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Os autores agradecem à Empresa Kéntron, pela cooperação técnica-financeira que possibilitou a execução deste trabalho, bem como a todas as associações, consultores, empresários e produtores que participaram dos painéis para definição dos sistemas modais de produção de pequena, média e grande escala, especialmente à Eduarda Lee Ferreira Lima e à Larissa Pereira Mouro, assessoras técnicas da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), a R. C. Serviços Ltda, ao João Cancio de Andrade Araújo, Engenheiro Florestal Consultor, e à pesquisadora Marilia Ieda da Silveira Folegatti Matsuura. A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração de todos.

Apresentação

O estudo desenvolve métricas de carbono, especificamente o balanço e a pegada de carbono, na fase produtiva de florestas plantadas de eucalipto em Minas Gerais, destinadas ao suprimento do setor siderúrgico. O estado de Minas Gerais, um polo siderúrgico de relevância global, usa carvão vegetal como alternativa renovável em substituição ao carvão mineral na produção de ferro-gusa e aço. O estudo detalha as emissões em diferentes escalas produtivas (pequena e média) para prover uma visão abrangente das emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) na silvicultura.

Ambos os sistemas produtivos de eucalipto — em pequena e média escala — operam como sumidouros líquidos de carbono. Este balanço líquido negativo (remoções superiores às emissões) indica que a produção de madeira para carvão vegetal, ativamente, remove dióxido de carbono da atmosfera. Este resultado reforça a sustentabilidade ambiental das florestas plantadas e repassa parte dessa vantagem para produção de carvão vegetal de eucalipto. A contribuição se dá como alternativa de combustível renovável (substituindo o carvão mineral e mitigando, aproximadamente, 75% das emissões industriais), mas, também como um mecanismo eficaz para a mitigação da mudança climática.

A metodologia empregada adotou uma abordagem multifacetada, combinando um levantamento bibliográfico sistemático de bases de dados oficiais (como IBGE, Ibama e Rais) com a coleta de dados primários, mediante entrevistas semiestruturadas realizadas com produtores de diferentes escalas em Minas Gerais. Foram configurados dois sistemas modais de produção, um para pequenos produtores (ciclo de 25 anos com 4 rotações) e outro para médios produtores (ciclo de 14 anos com 2 rotações). As emissões de GEE (fluxos diretos e indiretos) foram calculadas seguindo-se, rigorosamente, as diretrizes metodológicas do IPCC (Intergovernamental Panel on

Climate Change), utilizando-se fatores de emissão específicos para combustíveis, adubos e agroquímicos. O cálculo do balanço líquido de carbono foi obtido pela subtração entre as emissões totais e as remoções de GEE. É crucial notar que o sequestro de carbono, que indica o impacto da mudança do uso do solo no armazenamento de carbono, foi contabilizado, exclusivamente, na biomassa radicular e no solo para o período de 20 anos, evitando-se a dupla contagem do carbono estocado na biomassa aérea, que será reportado na fase industrial de produção do ferro-gusa.

A evidência de que a produção de eucalipto atua como um sumidouro líquido de carbono está intrinsecamente ligada à Ação Contra a Mudança Global do Clima (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 estabelecido pela Agenda 2030 da ONU), ao fornecer uma estratégia de mitigação baseada em sistemas florestais manejados adequadamente. Também contribui para a conservação de ambientes florestais nativos por reduzir a pressão do desmatamento (ODS 15).

Marcelo Francia Arco-Verde
Chefe-Geral interino da Embrapa Florestas

Sumário

Introdução	9
Diagnóstico do ambiente de estudo	11
Caracterização do sistema de produção de eucalipto para siderurgia	11
Estimativa da pegada e do balanço de carbono	15
A importância da produção de carvão vegetal em Minas Gerais	19
Emissões de GEE da fase produtiva do plantio de eucalipto	22
Balanço de carbono	28
Considerações finais	30
Referências	30

Introdução

O setor siderúrgico de Minas Gerais se destaca como um dos mais relevantes do Brasil, especialmente pela expressiva produção de ferro-gusa e aço, fortemente integrada à cadeia do carvão vegetal. O estado abriga um grande polo produtor de carvão vegetal, com aproximadamente um milhão de hectares de plantações de eucalipto destinadas à produção desse insumo, utilizado como alternativa renovável aos combustíveis fósseis nos altos-fornos das siderúrgicas locais (Associação Mineira da Indústria Florestal, 2020; Sindicato das Indústrias Florestais do Estado de São Paulo, 2024). A substituição do carvão mineral pelo carvão vegetal na produção de ferro-gusa e aço implica na mitigação de, aproximadamente, 75% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) da fase industrial em relação ao uso de combustível fóssil (Souza; Pacca, 2021).

Para avaliar de forma completa e robusta o impacto ambiental dessa cadeia produtiva, é fundamental estimar de forma integrada todas as métricas de carbono, a fim de obter o balanço e, ou a pegada de carbono. Essa avaliação deve considerar as etapas do ciclo de produção do carvão vegetal, incluindo a fase de crescimento e produção da floresta, desde a implantação até a colheita, o transporte da madeira, o processo de carbonização e o transporte até o uso final na siderurgia. Embora seja possível obter métricas pontuais — como estoques de carbono na biomassa vegetal e emissões de gases de efeito estufa (GEE) específicas durante operações de campo —, resultados apenas para uma destas condições não capturam a complexidade dos fluxos de carbono, especialmente na fase produtiva, em que as emissões e remoções de carbono são difusas e de difícil monitoramento (Vieira et al., 2019; Premetilake et al., 2023).

Estudos recentes demonstram que plantações de eucalipto apresentam elevado potencial de sequestro de carbono, tanto na biomassa aérea quanto subterrânea e nas camadas do solo, contribuindo significativamente para o balanço positivo de carbono em sistemas florestais brasileiros (McMahon et al., 2019; Vieira et al., 2019). No entanto,

a maioria dos estudos não contempla todas as fases do ciclo produtivo (Gatto et al., 2011; Binkley et al., 2017; McMahon et al., 2019; Vieira et al., 2019). Por isso, o conceito de pegada de carbono, que engloba o levantamento ou inventário das atividades e operações de todas as etapas do ciclo produtivo vinculando a emissão de GEE atrelada à cada uma delas, torna-se uma ferramenta essencial para uma avaliação abrangente e confiável (Galli et al., 2012).

A pegada de carbono identifica os principais pontos de emissão de GEE, sendo uma ferramenta para orientar estratégias de redução de emissões de GEE e para comunicar, de forma efetiva, o desempenho ambiental das empresas aos consumidores e partes interessadas. No entanto, ainda há desafios relacionados à padronização das definições, delimitação dos escopos 1, 2 e 3 e à disponibilidade de fatores de emissão confiáveis e representativos dos ambientes produtivos do País. Poucos foram os estudos que quantificaram a pegada de carbono em plantios de eucalipto, com destaque para os resultados do repositório Ecoinvent 2.2. Esse repositório é o mais reconhecido banco de dados de inventários de ciclo de vida (ICV) utilizado para estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e outras avaliações ambientais, que indicou, com base em fontes secundárias, uma pegada de carbono de 15,94 kg CO₂e/m³ de tora de eucalipto, (Gonçalves et al., 2018).

Na fase de produção da floresta, operações e insumos podem gerar emissões de GEE. Considerando que o tamanho da propriedade implica em diferente capacidade de investimento em tecnologias e produção, a escala de produção pode impactar na emissão de GEE, por unidade de produto. Assim, este estudo tem como objetivo quantificar o balanço e a pegada de carbono, detalhando as emissões de GEE para a produção de florestas plantadas com eucalipto destinadas à produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa em Minas Gerais.

Diagnóstico do ambiente de estudo

Para o diagnóstico do ambiente de estudo e a caracterização detalhada dos sistemas de produção de eucalipto em Minas Gerais, adotou-se uma abordagem em duas etapas principais: (1) levantamento bibliográfico sistemático e (2) levantamento da cadeia produtiva por meio de entrevistas.

Na primeira etapa, realizou-se uma análise de dados secundários provenientes de bases oficiais, como IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e RAIS (Relação Anual de Informações Sociais), para descrever a produção de eucalipto por município, micro e macrorregião de Minas Gerais. A base do IBGE foi utilizada para obter dados estatísticos de uso da terra e informações demográficas regionais, enquanto a base do Ibama forneceu registros de atividades licenciadas para silvicultura e produção de carvão. A RAIS foi consultada para caracterizar a força de trabalho, o perfil dos trabalhadores e sua distribuição geográfica no setor.

A utilização de dados secundários oficiais permitiu a análise espacial e temporal da expansão dos plantios e as regiões e municípios de maior produção de eucalipto e carvão, bem como a identificação de padrões produtivos e socioeconômicos. Além disso, a integração de diferentes fontes de dados possibilitou uma visão abrangente do setor, subsidiando análises comparativas e a construção de indicadores técnicos relevantes para o planejamento e a gestão florestal.

Caracterização do sistema de produção de eucalipto para siderurgia

Após a análise e diagnóstico do ambiente de estudo, observou-se as regiões e municípios de maior concentração de produção de eucalipto para fins de produção de carvão, visando entender a dinâmica de produção e orientar as entrevistas com produtores, consultores e empresários florestais. O estudo optou por abranger diferentes

escalas de produção de plantios de eucalipto, entre pequenos e médios produtores. Essa abordagem visa capturar a heterogeneidade dos sistemas produtivos e permitir maior generalização dos resultados, conforme recomendado em estudos que buscam compreender dinâmicas produtivas em contextos diversos. A escolha por não delimitar geograficamente os levantamentos permite identificar padrões e desafios comuns sob diferentes realidades, ampliando a aplicabilidade dos achados.

Complementarmente, um levantamento da cadeia produtiva foi realizado por meio de entrevistas semiestruturadas. O objetivo foi diagnosticar detalhadamente a cadeia do eucalipto para a produção de toras de madeira, que se destinam, à produção do carvão vegetal e, consequentemente, do ferro-gusa, mapeando as emissões de GEE. O método envolveu entrevistas com produtores de floresta e prestadores de serviço nas regiões de maior produção de madeira de eucalipto destinada à produção de carvão, em Minas Gerais. Com base em painéis realizados nos municípios de Curvelo e João Pinheiro, ambos localizados no Norte de Minas Gerais e, também, em entrevistas semiestruturadas de produtores e profissionais de consultoria da região, configurou-se os sistemas de produção modais de eucalipto em Minas Gerais, destinados ao suprimento da produção de carvão.

O suprimento de madeira para a produção de carvão vegetal a partir de eucalipto em Minas Gerais ocorre em diferentes escalas. Cada escala apresenta características distintas em termos de tecnologia empregada, eficiência produtiva e impacto ambiental, especialmente no que se refere à pegada de carbono. Assim, dois sistemas de produção modais foram criados, um representando os pequenos produtores e outro para representar médios produtores.

As diferentes escalas de produção buscaram representar área plantada e nível tecnológico adotado. Embora o número de entrevistas seja limitado, a inclusão de diferentes classes produtivas e a confirmação das informações com consultores especializados contribuem para ampliar a validade das informações levantadas.

Os sistemas modais de produção para pequenos e médios produtores foram, então, caracterizados quanto à quantidade de insumos,

produtos e máquinas utilizados em cada operação e fase do ciclo produtivo (Tabela 1). O sistema modal também foi configurado com o número de ciclos e rotações, bem como em relação ao potencial de produção da floresta em cada rotação ou ciclo (Tabela 2). Assim, a pequena propriedade adota ciclos longos de, aproximadamente, 25 anos com 4 rotações, enquanto a média escala, normalmente, faz ciclos que envolvem duas rotações de sete anos, num ciclo de 14 anos. Na Tabela 1, a manutenção 2 se refere aos insumos e operações utilizadas na condução de rebrota ou talhadia. A descrição detalhada dos sistemas modais, em termos quantitativos, foi depositada no banco de dados Redape (Zanatta et al., 2025).

Tabela 1. Fases e operações abrangidas no questionário para obter as estimativas de emissões de carbono nas atividades florestais e identificação em qual escala está cada fase e operação.

Fase	Operação	Tipo do insumo emissor	Escala
Implantação	Aplicação de calcário	Combustíveis e corretivos	Pequena e média
Implantação	Aplicação de herbicida pós-emergente	Combustíveis e herbicidas	Pequena e média
Implantação	Aplicação de herbicida pré-emergente	Combustíveis e herbicidas	Pequena e média
Implantação	Combate às formigas	Inseticidas	Pequena e média
Implantação	Construção de aceiros	Combustíveis	Média
Implantação	Desbrota	Combustíveis	Média
Implantação	Irrigação	Combustíveis	Média
Implantação	Limpeza mecânica	Combustíveis	Pequena e média
Implantação	Manutenção de aceiros	Combustíveis	Média
Implantação	Plantio	Combustíveis	Pequena e média
Implantação	Roçada mecanizada	Combustíveis	Pequena e média
Implantação	Subsolagem com adubação de base	Combustíveis e adubos	Pequena e média
Implantação	Adubação de arranque	Combustíveis e adubos	Pequena

Continua...

Continuação.

Fase	Operação	Tipo do insumo emissor	Escala
Implantação	Tratamento das mudas (cupinicida)	Inseticidas	Média
Implantação	Gradagem para incorporar calcário	Combustíveis	Pequena
Manutenção	Adubação de cobertura	Combustíveis e adubos	Pequena e média
Manutenção	Aplicação de herbicida pós-emergente	Combustíveis e herbicidas	Pequena e média
Manutenção	Combate às formigas	Inseticidas	Pequena e média
Manutenção	Inventário	Combustíveis	Média
Manutenção	Manutenção de aceiros	Combustíveis	Média
Manutenção	Monitoramento-visitas	Combustíveis	Média
Manutenção	Roçada mecânica	Combustíveis	Pequena e média
Colheita	Baldeio	Combustíveis	Média
Colheita	Carregamento de madeira	Combustíveis	Pequena e média
Colheita	Corte	Combustíveis	Pequena e média
Manutenção 2	Resíduos da colheita	Resíduo colheita	Pequena e média
Manutenção 2	Adubação de cobertura	Combustíveis e adubos	Pequena e média
Manutenção 2	Aplicação de calcário	Combustíveis e corretivos	Pequena
Manutenção 2	Gessagem	Combustíveis	Pequena
Manutenção 2	Adubação de cobertura	Combustíveis e adubos	Pequena e média

Tabela 2. Caracterização dos ciclos e produção de eucalipto em duas escalas produtivas, em Minas Gerais.

Ciclo extração (anos)	Anos	Produção (m ³ /ha)
Pequena escala – Área menor que 50 ha		
Primeira rotação	7	245
Segunda rotação	6	241,5
Terceira rotação	6	241,5
Quarta rotação	6	210
Ciclo	25	938
Média escala – Área maior que 50 ha		
Primeira rotação	7	210
Segunda rotação	7	199,5
Ciclo	14	409,5

Estimativa da pegada e do balanço de carbono

O monitoramento das remoções e o levantamento das emissões de GEE foram realizados com base em metodologias reconhecidas internacionalmente, seguindo diretrizes do IPCC e padrões de inventários nacionais.

A análise do balanço de carbono foi realizada mediante quantificação de dois componentes principais: o sequestro de carbono e as emissões de carbono atribuídas à fase agrícola da produção de madeira de eucalipto.

O sequestro de carbono foi estimado considerando-se exclusivamente a biomassa abaixo do solo (raízes) e o carbono estocado no solo. A biomassa acima do solo não foi incluída na fase agrícola, para evitar dupla contagem, uma vez que o sequestro de carbono desse compartimento dar-se-á na incorporação do carbono da biomassa ao

ferro-gusa, durante a fase industrial. A biomassa aérea será reportada aqui como indicador de produtividade e, também, como coeficiente técnico para a estimativa das emissões de GEE dos resíduos vegetais que permanecem no campo após a colheita.

Os dados de biomassa das raízes e carbono do solo foram obtidos por meio de levantamento sistemático da literatura científica, priorizando estudos que empregam métodos reconhecidos internacionalmente para a quantificação desses estoques (Alba et al., 2025).

A quantidade de emissões de GEE na fase de produção florestal foi calculada com base nas informações da quantidade de insumo e combustível, obtidas nas entrevistas semiestruturadas, que abordaram detalhadamente as operações silviculturais e logísticas.

Os fatores de emissão de GEE relacionados a essas atividades foram baseados nas diretrizes do GHG Protocol e do IPCC (Paustian et al., 2006; Domke et al., 2019). Os fatores de emissões utilizados estão descritos na Tabela 3, juntamente com a fonte. Os nomes comerciais dos produtos foram citados, ressaltando-se que existem diferentes formulações comerciais com o mesmo princípio ativo.

Tabela 3. Fatores de emissões de GEE de insumos utilizados para o cultivo de eucalipto em Minas Gerais.

Produto	Fator de Emissões	Unidade	Fonte
Nutriente			
Calcário	0,13	kg C-CO ₂ /kg insumo	Paustian et al., 2006.
K - potássio	0,15	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
N - nitrogênio	0,2	kg C-CO ₂ /kg insumo	Domke et al., 2019.
P - fósforo	0,2	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
N - uréia	0,016	kg N-N ₂ O/kg insumo	IPCC, 2019.
Herbicidas			
Fordor	7,8	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
Glifosato	4,368	kg C-CO ₂ /L insumo	Lal, 2004.
Goal	3,024	kg C-CO ₂ /L insumo	Lal, 2004.
Scout	7,21175	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.

Continua...

Continuação.

Produto	Fator de Emissões	Unidade	Fonte
Inseticidas			
Fipronil	9,36	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
Isca formicida	0,153	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
K-Othrine® 2P	0,0234	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
Regent	4,08	kg C-CO ₂ /kg insumo	Lal, 2004.
Combustível			
Diesel	0,87	kg C-CO ₂ /L de combustível	Carvalho, 2011. Soares et al, 2009. Paustian et al., 2006.
Gasolina	0,76	kg C-CO ₂ /L de combustível	Carvalho, 2011.

As emissões de carbono referentes ao uso de defensivos agrícolas e adubos foram calculadas com base nos seguintes parâmetros e Fatores de Emissão (FE) específicos:

- Glifosato: para o cálculo das emissões, foi considerada a concentração de 48% do produto comercial Roundup®.
- Fluazifop-butyl (Fordor®): o Fator de Emissão (FE) adotado para este ingrediente ativo foi 10,4 kg carbono equivalente/kg, com base na sua maior emissão registrada.
- Fipronil: as emissões de Fipronil foram estimadas utilizando-se o Fator de Emissão (FE) do Cipermetrina, (11,7 kg carbono equivalente/kg), devido à sua maior emissão entre os compostos disponíveis para o cálculo.
- K-Othrine® 2P: o Fator de Emissão (FE) da Cipermetrina (11,7 kg carbono equivalente/kg) foi utilizado como referência para o K-Othrine® 2P, por ser um produto pertencente ao grupo químico dos piretroides.

Essa abordagem metodológica permite padronizar o cálculo das emissões de GEE, utilizando-se dados que representam um cenário conservador de emissões para cada grupo de produtos químicos.

Para insumos comerciais, a quantidade de princípio ativo foi ponderada pela sua proporção no produto, permitindo conversão precisa para kg de carbono por hectare (kgC/ha).

As emissões foram calculadas utilizando-se a fórmula padrão:

Emissões CO₂ ou N₂O = quantidade de insumo ou combustível × fator de emissão (kgCO₂e/ha ou kg N₂O/ha).

A conversão de C-CO₂ para CO₂ adotou a relação estequiométrica entre o elemento carbono e a molécula de CO₂. A conversão de N₂O para CO₂ adotou o potencial de aquecimento do N₂O em relação ao CO₂, que corresponde a 273, conforme determina o AR5.

Os resultados de cada operação foram somados para obter as emissões totais da fase produtiva, garantindo que tanto os fluxos diretos quanto os indiretos fossem contabilizados. Para as emissões de fluxo direto foram considerados combustível queimado, adubos e herbicidas aplicados.

Para as emissões indiretas de N₂O, as resultantes do manejo do nitrogênio do adubo e dos resíduos florestais mantidos no campo foram calculadas considerando-se as perdas por volatilização e lixiviação.

Proporções de perda:

- Volatilização: 15% do nitrogênio aplicado.
- Lixiviação: 30% do nitrogênio aplicado.

As emissões de N₂O foram calculadas com base em fatores de emissão específicos para a volatilização (0,14 kg N-N₂O/kg N volatilizado) e lixiviação (0,11 kg N-N₂O/kg N lixiviado), conforme as diretrizes do IPCC (Paustian et al., 2006).

Essa abordagem permite uma estimativa robusta e completa das emissões de GEE associadas à produção de eucalipto antes do processamento industrial, fundamental para o cálculo da pegada de carbono da produção de madeira (matéria-prima do carvão vegetal).

As emissões de nitrogênio a partir de resíduos de colheita foram quantificadas, considerando-se que da massa da madeira colhida retida na floresta 20% permanecem no solo florestal na forma de resíduos vegetais, correspondendo a um fator de expansão de biomassa (BEF) de 20%. Para isso, foi utilizada a seguinte abordagem:

Cálculo da massa de resíduos:

- A massa total de madeira colhida foi multiplicada pelo fator 0,2 (correspondente a 20% de retenção na área de plantio).
- Massa de resíduos (kg) = IMA (m^3/ha por ano) × Densidade ($0,420 \text{ kg/m}^3$) × BEF (20%).
- Nitrogênio nos resíduos (kg): o conteúdo de nitrogênio nos resíduos foi determinado multiplicando-se a massa de resíduos pelo teor de nitrogênio (0,82%).
- Emissões N-N₂O: as emissões de N₂O foram calculadas multiplicando-se o nitrogênio presente nos resíduos pelo seu fator de emissão 0,002 (para nitrogênio orgânico).

Todos os parâmetros acima foram obtidos no Relatório de Referência da Quarta Comunicação Nacional de Emissões e Remoções do Brasil (Brasil, 2021). Os micronutrientes não foram incluídos na análise de emissões, pois, não se tem informações de FE e praticamente não se adota essa prática em plantios florestais.

O balanço líquido de carbono foi determinado pela diferença entre o total de carbono sequestrado (solo e raízes) e o carbono emitido ao longo de todo o ciclo produtivo do eucalipto. Esse índice permite avaliar o papel do sistema florestal como sumidouro (sequestro superior às emissões) ou como fonte de carbono (emissões superiores ao sequestro). A pegada de carbono, entretanto, foi obtida dividindo-se a emissão total pela produção do ciclo produtivo.

A importância da produção de carvão vegetal em Minas Gerais

Minas Gerais se destaca como um polo central na produção de carvão vegetal no Brasil, um insumo crucial para o setor siderúrgico mineiro, principalmente na região norte desse estado (Figuras 1 e 2). O forte vínculo com as plantações de eucalipto não só posiciona a região como líder mundial, mas, também promove uma alternativa sustentável aos

combustíveis fósseis em seus altos-fornos. O uso do carvão vegetal proveniente de plantações de eucalipto permite à indústria mineira substituir o coque mineral, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e promovendo a chamada “produção de aço verde” (Schettini et al., 2022). O carvão vegetal atua como agente redutor no processo de transformação do minério de ferro em ferro metálico, sendo funcionalmente equivalente ao coque na etapa de redução, com a vantagem do menor impacto ambiental (Yuan et al., 2021).

A produção de madeira de eucalipto destinada à geração de carvão vegetal, apesar da concentração geográfica no noroeste de Minas Gerais (Figura 3), é oriunda de diferentes sistemas de produção, principalmente em relação à escala de produção não homogênea. A concentração em determinadas mesorregiões e municípios reflete a proximidade das indústrias consumidoras e a busca por otimização logística, como evidenciado por análises espaciais e mapas de produção (Bichel; Telles, 2021). Essa concentração também está relacionada à disponibilidade de infraestrutura, políticas de incentivo e parcerias institucionais que fortalecem o setor florestal no estado.

Além do impacto econômico, a cadeia do carvão vegetal em Minas Gerais contribui para a geração de empregos, renda e desenvolvimento regional, influenciando positivamente indicadores socioeconômicos locais. O avanço tecnológico e a adoção de sistemas mais eficientes de carbonização também têm potencial para melhorar o balanço de carbono do setor, alinhando-se aos compromissos ambientais nacionais e internacionais.

A área mais produtiva, destacada em verde na Figura 3, abrange municípios como João Pinheiro, Buritizeiro, Três Marias, Pirapora e Pompeu, sendo uma das principais zonas de produção de carvão no estado de Minas Gerais. Dentre eles, João Pinheiro se destaca como um dos maiores produtores, evidenciando sua expressiva participação no setor. Além disso, municípios localizados mais ao nordeste, como Grão Mogol, Turmalina e Carbonita, apesar de ocuparem uma área menor, também apresentam contribuição significativa, colaborando para a composição dos 40% da produção total de carvão no estado.

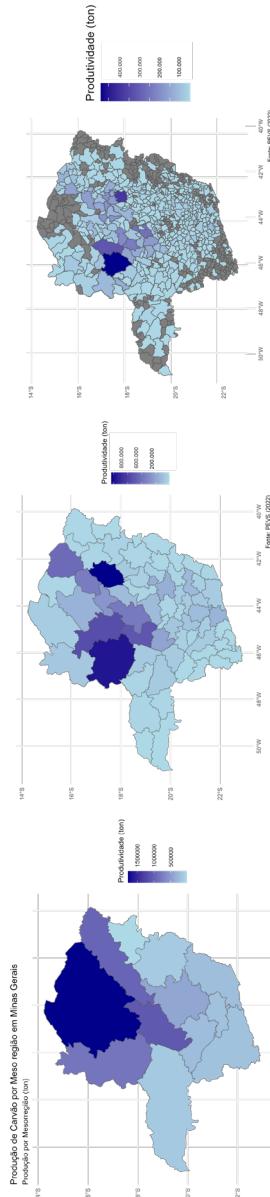


Figura 1. Mapas representativos da produção de carvão vegetal nas mesorregiões, microrregiões e municípios do estado de Minas Gerais.

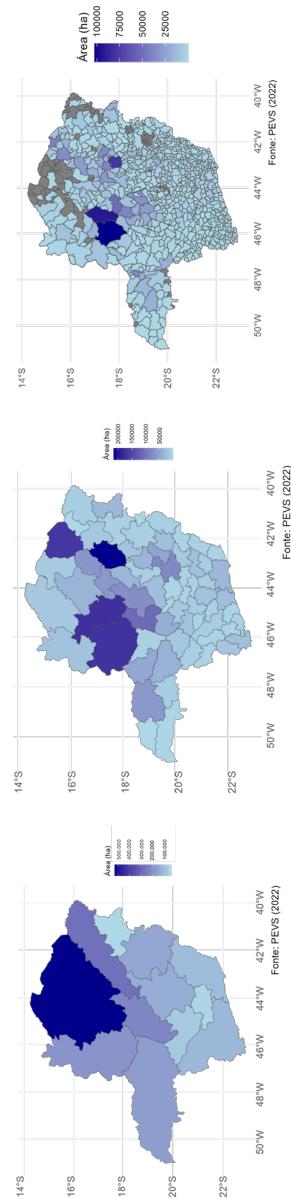


Figura 2. Mapas representativos da área de produção de eucalipto para carvão vegetal nas mesorregiões, microrregiões e municípios do estado de Minas Gerais.

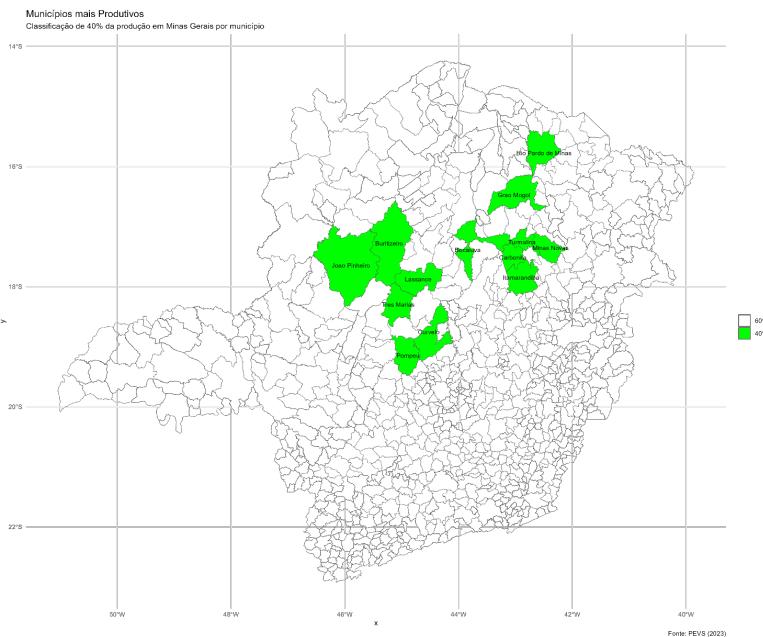


Figura 3. Municípios com maior produção de carvão vegetal proveniente de eucalipto em Minas Gerais, representando 40% do total.

Emissões de GEE da fase produtiva do plantio de eucalipto

As emissões de CO₂ equivalente (CO₂e) por unidade de produto entre as escalas de propriedades investigadas foram muito próximas. Na produção de eucalipto em propriedades de escala média, foram emitidos 13,98 kg de CO₂e/m³, em comparação à pequena escala, com 13,36 kg de CO₂e/m³ (Tabela 3). Embora a produção na escala média apresenta emissões de CO₂ e por metro cúbico ligeiramente superiores à escala pequena, a produtividade por hectare – IMA m³/ha por ano - foi menor na escala média (29,25 m³/ha por ano) em comparação à pequena (37,52 m³/ha por ano), o que também influencia os

resultados. Vale ressaltar que a produtividade menor em média escala pode ter sido por diversos fatores, desde um maior conservadorismo por conta dos especialistas consultados, dos cenários de produtividade média considerados e, ou até uma maior heterogeneidade das áreas de produção com consequente aumento na dificuldade no manejo decorrente da maior escala, resultando em menor expectativa de produtividade. De qualquer forma, os resultados apresentados destacam a importância da eficiência produtiva refletindo na intensidade do impacto ambiental investigado.

Tabela 3. Emissões totais de CO₂ equivalente por metro cúbico de madeira.

Escala produtora	Produtividade (m ³ /ha)	Emissões de kg CO ₂ e/m ³
Pequena	37,52	13,36
Média	29,25	13,98

O CO₂ é o principal fator nas emissões de GEE em ambas as escalas de produção, enquanto o N₂O contribui com uma parcela menor, mas, ainda significativa (Figura 4). A maior participação de N₂O decorre de emissões de GEE de fonte direta independente da escala de produção. As emissões de N₂O diretas tenderam a ser maiores na escala pequena do que na média, o que pode indicar que práticas de manejo específicas como adubação nitrogenada nesse tipo de produção podem estar elevando as emissões desse gás, mas, possivelmente, ao mesmo tempo, tem contribuído para maior produtividade desse sistema. As emissões de N₂O representaram 24 e 29% das emissões totais de CO₂e no sistema de produção de média e pequena escala, respectivamente. Práticas que determinam emissões de N₂O incluem aplicações de fertilizantes nitrogenados (Hassan et al., 2022), irrigação excessiva ou manejo inadequado da água (Zhang et al., 2021; Hassan et al., 2022), entre outras práticas observadas nas entrevistas realizadas no estudo. É crucial destacar a eficiência das práticas de manejo e a adequação dos procedimentos operacionais empregados para a máxima eficiência técnica e ambiental.

No entanto, o foco analítico do estudo reside na quantificação do balanço líquido de emissões de GEE por unidade produtiva (kg CO₂e/m³)

ou também chamada pegada de carbono. Com base neste indicador específico, a pequena escala resultou em um impacto de emissão levemente inferior em comparação com a média escala. Essa diferença sutil nas emissões não está associada à ineficiência de manejo – que foi comprovadamente elevada pela produtividade – mas sim a fatores específicos, nas quantidades de insumos e de práticas de manejo adotadas.

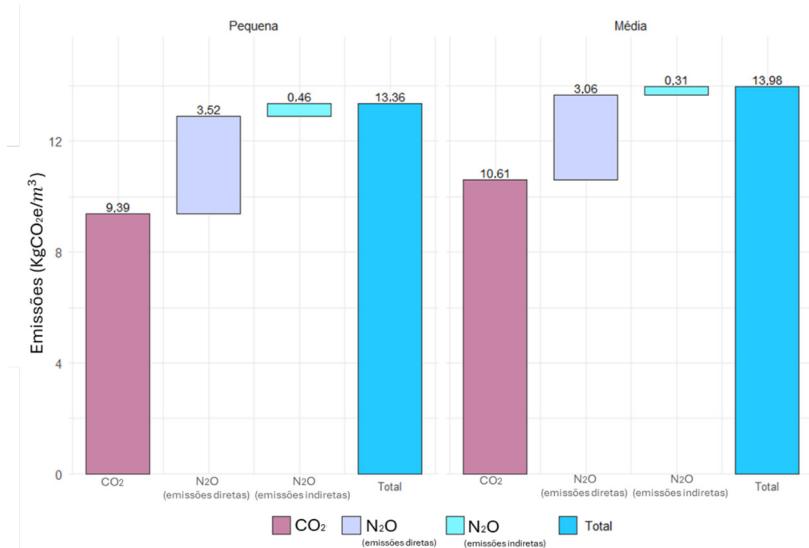


Figura 4. Emissões de gases de efeito estufa (GEE) por fontes diretas e indiretas na fase agrícola da produção do eucalipto em Minas Gerais, em pequena e média escala de produção.

A contribuição das emissões de GEE de cada fase de produção varia entre as escalas (Figura 5). Na escala pequena, as emissões de GEE são bem distribuídas entre as quatro fases de produção, mas com maior participação da condução da rebrota (28,9%), seguida, pela fase da implantação (25,8%), colheita (24,6%) e manutenção

(20,7%). Na escala média de produção, a fase de implantação tem a maior contribuição (37,6%), seguida pela colheita (28,9%), manutenção (22,1%) e condução da rebrota (11,4%), resultado do maior número de operações mecanizadas durante a fase de implantação e colheita do plantio.

Este resultado decorre principalmente do grau de mecanização empregado na implantação do eucalipto, o qual é mais intenso na média escala pelo uso de maquinário de maior porte, se comparado ao de pequena propriedade, resultando em maiores emissões de GEE devido ao combustível fóssil (2,73 kg CO₂eq/m³ versus 0,49 kg CO₂eq/m³) e de fertilizantes (2,17 kg CO₂eq/m³ versus 0,59 kg CO₂eq/m³). Entretanto, todas as adubações de cobertura e aplicação de corretivos realizadas ao longo das rotações de rebrota na produção em pequena escala foram classificadas como fase de manutenção, aumentando as emissões desta fase, quando comparadas com a mesma fase do sistema de produção em média escala, uma vez que a produção em pequena escala teve quatro rotações em comparação com a média escala que tem adotado apenas duas rotações no ciclo. As emissões dos corretivos da acidez do solo foram da ordem 2,03 kg CO₂eq/m³ na pequena escala, decorrente de uma aplicação de calcário no início da terceira rotação, versus emissão nula na média escala, pois, todo calcário aplicado foi apenas na primeira rotação, classificada como fase de implantação. As adubações de cobertura na fase de implantação da pequena escala foram responsáveis pela emissão de 2,07 kg CO₂eq/m³, enquanto os adubos aplicados na fase de manutenção da média escala emitiram 0,19 kg CO₂eq/m³. Nota-se que, apesar do maior número de rotações na pequena escala, também há maior investimento em adubação de manutenção durante a condução da rebrota. Estes foram os principais pontos de diferenciação entre os dois sistemas de produção que explicam a diferença de alocação das emissões por fase da cultura.

A análise detalhada das operações revela quais atividades contribuem mais significativamente para as emissões de GEE em cada fase de produção (Figura 6). Para a produção em pequena escala, a fonte de emissões preponderante foi o manejo dos resíduos da

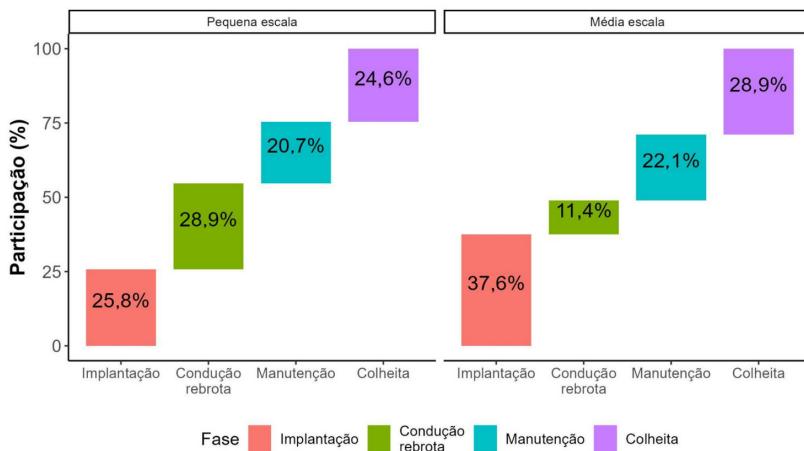


Figura 5. Contribuição percentual das fases de produção para as emissões totais de GEE, por escalas de produção de eucalipto em Minas Gerais.

colheita (16,1%) e adubação de cobertura (15,9%) na fase de manutenção. A fase de colheita representa a segunda maior contribuição, com 24,6% das emissões totais, sendo a operação de carregamento e empilhamento (18,6%) a mais emissora. Isso é decorrente do sistema menos mecanizado utilizado nessa escala, em comparação com a média escala. Por fim, a fase de implantação contribui com 25,8% das emissões, com destaque para a aplicação de calcário (15,4%) que é realizada, também, na fase de condução de rebrota para a terceira rotação.

Além disso, a aplicação de calcário (13,1%) é a operação de maior contribuição para a fase de implantação da cultura na média escala de produção. A maior participação das emissões na fase de implantação pode estar relacionada à operações mecanizadas no início do ciclo, assim como o uso de máquinas de maior porte, típico de sistemas de maior escala de produção. A maior contribuição da fase de colheita para as emissões na escala de produção média também

está diretamente relacionada ao uso mais intenso de máquinas, como feller-buncher e skidder, para corte e baldeio da madeira, respectivamente. Em contraste, a produção de pequena escala utiliza processos semimecanizados, com corte manual por motosserras e menor uso de equipamentos pesados ou de maior porte. Sistemas mais mecanizados consomem mais óleo diesel devido ao uso de máquinas de grande porte, elevando as emissões de CO₂e durante as operações de corte, carregamento e transporte. A mecanização total aumenta

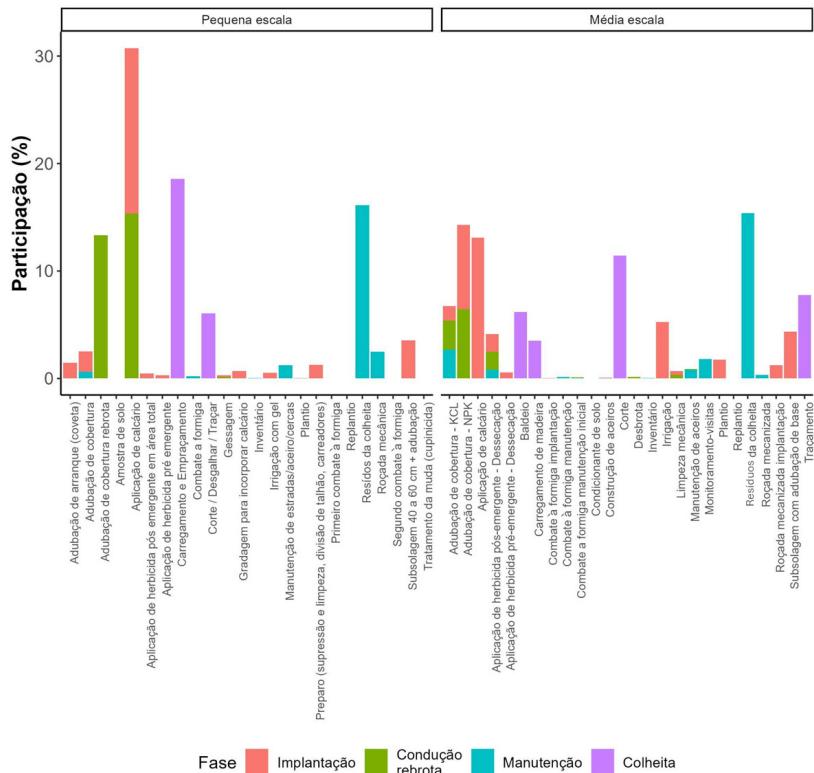


Figura 6. Contribuição de cada operação para as emissões totais de GEE.

a eficiência operacional, mas pode elevar as emissões por hectare ou por operação, especialmente quando comparada com sistemas semimecanizados ou manuais. Entretanto, é necessário em escalas de produção maiores, devido à eficiência de colheita.

Essa análise detalhada mostra que, embora as fases de produção tenham contribuições diferentes entre as escalas de produção, as operações de aplicação de insumos (adubação e calcário) e o manejo de resíduos de colheita são, consistentemente, as maiores fontes de emissões de GEE em ambos os tamanhos de propriedades.

Balanço de carbono

A contabilidade completa do balanço de carbono inclui os estoques de carbono do sistema de produção e as emissões totais. Considerando o carbono armazenado na biomassa de raízes e no solo ao longo de 20 anos, um período alinhado com as diretrizes do IPCC para contabilizar o impacto da mudança do uso do solo no armazenamento de carbono, os resultados indicam um sequestro significativo em ambas as escalas de produção: 100,45 kg CO₂e/m³ para a pequena escala e 161,4 kg CO₂e/m³ para a média escala (Figura 7). Esses valores evidenciam a capacidade dos sistemas de produção de eucalipto para carvão vegetal de atuar como importantes sumidouros de carbono, especialmente quando se contabiliza o carbono estocado no solo e nas raízes ao longo do tempo.

Descontando-se as emissões totais por unidade de produto das remoções de GEE, obteve-se o balanço de carbono (na forma de CO₂ equivalente) que indicou valores negativos em ambas as escalas de produção. Esse comportamento indica que as remoções superam as emissões de GEE, caracterizando os sistemas como sumidouros líquidos de carbono (Figura 7). Além do balanço de carbono mostrar que o sistema de produção compensa suas emissões, também indica que este remove ativamente o carbono da atmosfera, contribuindo para a mitigação e enfrentamento da mudança climática.

A sustentabilidade do carvão vegetal de eucalipto é reforçada pelo fato de que, além de suprir a demanda energética do setor siderúrgico,

contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa também na fase agrícola de produção da madeira destinada à geração do carvão. Estudos apontam que a substituição de combustíveis fósseis por carvão vegetal de origem renovável pode reduzir significativamente a pegada de carbono da indústria do aço (Schettini et al., 2022; Silva et al., 2024). Além disso, a utilização de tecnologias mais limpas e o aproveitamento de resíduos e subprodutos tornam o processo ainda mais eficiente e ambientalmente responsável. Portanto, a produção de carvão vegetal a partir de eucalipto, quando manejada adequadamente, representa uma estratégia viável para a sustentabilidade do setor siderúrgico brasileiro (Schettini et al., 2022; Silva et al., 2024; Carneiro et al., 2025), representando apenas na fase agrícola de produção do eucalipto um sequestro de carbono superior a 27 kg/m³ de madeira produzida no talhão.

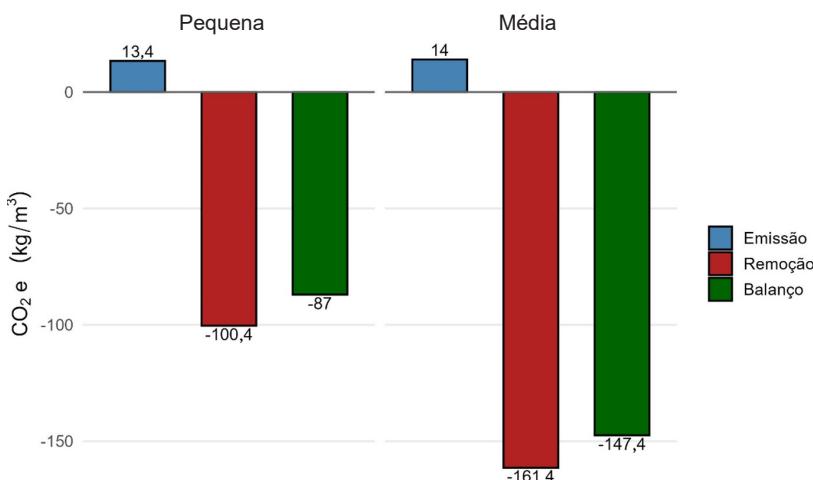


Figura 7. Contabilidade de carbono considerando emissões e remoções de GEE e o balanço, na forma de CO₂ equivalente, por unidade de produto, nas escalas de produção de eucalipto pequena e média.

Considerações finais

A análise das duas escalas de produção revelou que, apesar das pequenas variações nas emissões de GEE por metro cúbico, ambos os sistemas apresentam bom desempenho ambiental, independente da métrica observada, de pegada de carbono ou balanço de carbono. A fase de manutenção, com destaque para a adubação e o manejo de resíduos, foi identificada como a principal fonte de emissões de GEE na produção de pequena escala, enquanto a fase de implantação, com maior uso de insumos e mecanização, foi o principal contribuinte na produção de média escala.

O achado mais significativo do estudo é que, considerando o sequestro de carbono na biomassa de raízes e no solo, independente da escala de produção, o plantio de eucalipto atua como sumidouro líquido de carbono. O sequestro de carbono supera as emissões totais de GEE, demonstrando que a produção de carvão vegetal a partir da madeira de eucalipto, quando manejada adequadamente, é uma estratégia viável e eficaz para a sustentabilidade do setor siderúrgico e para a mitigação da mudança climática.

Referências

ALBA, F.; ZANATTA, J. A.; ROSSI, L. M. B.; PAZ, J. M. M. A.; HOLLER, W. A. **Estoque de carbono em plantios de eucalipto em Minas Gerais:** efeito da mudança de uso do solo. Colombo: Embrapa Florestas, 2025. (Embrapa Florestas. Documentos, 408).

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DA INDÚSTRIA FLORESTAL. **Minas Gerais tem a maior base florestal plantada do país e se consolida como o maior produtor de carvão vegetal do mundo.** Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://amif.org.br/minas-gerais-tem-a-maior-base-florestal-plantada-do-pais-e-se-consolida-como-o-maior-produtor-de-carvao-vegetal-do-mundo/>. Acesso em: 1 set. 2025.

BICHEL, A.; TELLES, T. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, 127714, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127714>.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>.

CARNEIRO, A. de C. O.; SIQUEIRA, H. F. de; BARROS, R. J. T.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; MORAIS JUNIOR, V. T. M. de; FRANÇA, L. C. de J.; CARVALHO, A. L.; GUIMARÃES, D. P. da S.; EVANGELISTA, E. L. C.; LOPES, O. P.; WINTER, S. G.; DEMUNER, I. F. Circular economy in charcoal production: valorization of residues for increased efficiency and sustainability. **Sustainability**, v. 17, n. 7, 3191, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17073191>.

CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiro nos grandes centros urbanos brasileiros**. Brasília, DF: Ipea, 2011. (Texto para Discussão, n. 1606).

DOMKE, G.; BRANDON, A.; DIAZ-LASCO, R.; FEDERICI, S.; GARCIA-APAZA, E.; GRASSI, G.; GSCHWANTNER, T.; HEROLD, M.; HIRATA, Y.; KASIMIR, A.; KINYANJUI, M. J.; KRISNAWATI, H.; LEHTONEN, A.; MALIMBWI, R. W.; NIINISTO, S.; OGLE, S. M.; PAUL, T.; RAVINDRANATH, N. H.; ROCK, J.; SANQUETTA, C. R.; SANCHEZ, M. J. S.; VITULLO, M.; WAKLIN, S. J.; ZHU, J. Forest land. In: BUENDIA, C.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IPCC, 2019. v. 4, cap. 4.

GALLI, A.; WIEDMANN, T.; ERCIN, E.; KNOBLAUCH, D.; EWING, B.; GILJUM, S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 100-112, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.017>.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 95-905, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>.

GONÇALVES, C. F.; CORREA, S. R. S.; RODRIGUES, L. B.; ALMEIDA NETO, J. A. Pegada de carbono do ciclo de vida da celulose de eucalipto: estudo de caso numa empresa baiana. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 4, p. 1-15, 2018.

HASSAN, M. U.; AAMER, M.; MAHMOOD, A.; AWAN, M. I.; BARBANTI, L.; SELEIMAN, M. F.; BAKHSH, G.; ALKHARABSHEH, H. M.; BABUR, E.; SHAO, J.; RASHEED, A.; HUANG, G. Management strategies to mitigate N₂O emissions in agriculture. **Life**, v. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/life12030439>.

IPCC. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [S.I.], 2019. v. 4.

LAL, R. Carbon emission from farm operations. **Environment International**, v. 30, p. 981–990, 2004.

McMAHON, D.; VERGÜTZ, L.; VALADARES, S.; SILVA, I.; JACKSON, R. Soil nutrient stocks are maintained over multiple rotations in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 448, p. 364-375, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2019.06.027>.

PAUSTIAN, K.; RAVINDRANATH, N. H.; AMSTEL, A. van; GYTARSKY, M.; KURZ, W. A.; OGLE, S.; RICHARDS, G.; SOMOGYI, Z. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: volume 4: agriculture, forestry and other land use. Eggborough: IGES, 2006. 21 p. Disponível em: <https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4>. Acesso em: 12 jun. 2025

PREMETILAKE, M.; PERERA, G.; KULASOORIYA, S.; RATMAYAKE, R. Variation in above and below ground carbon storage in a *Eucalyptus grandis* plantation established in a grassland with a chronosequence of age. **Tropical Ecology**, v. 64, p. 601-611, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00286-2>.

SCHETTINI, B. L. S.; JACOVINE, L. A. G.; TORRES, C. M. M. E.; CARNEIRO, A. de C. O.; VILLANOVA, P. H.; ROCHA, S. J. S. S. da; RUFINO, M. P. M. X.; SILVA, L. B.; e 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, part A, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115330>.

SILVA, S.; VENTURINI, O.; LEME, M.; MOURA, D. de; OLIVEIRA HECK, T. de. Enhancing sustainability in charcoal production: Integrated life cycle assessment and by-product utilization to promote circular systems and minimize energy loss. **Biomass and Bioenergy**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107115>.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS FLORESTAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Boletim Index**, maio, 2024. Disponível em: https://sif.org.br/wp-content/uploads/2024/05/BOLETIM-INDEX_Maio24_Final1-1.pdf. Acesso em: 10 set. 2025.

SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Embrapa Agrobiologia. Circular técnica, 27). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/630482/1/cit027.pdf>.

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

VIEIRA, M.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid *Eucalyptus* plantation in Southern Brazil. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 536, 2019.

YUAN, X.; LUO, F.; LIU, S.; ZHANG, M.; ZHOU, D. Comparative study on the kinetics of the isothermal reduction of iron ore composite pellets using coke, charcoal, and biomass as reducing agents. **Metals**, v. 11, 340, p. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11020340>.

ZHANG, J.; LI, H.; DENG, J.; WANG, L. Assessing impacts of nitrogen management on nitrous oxide emissions and nitrate leaching from greenhouse vegetable systems using a biogeochemical model. **Geoderma**, v. 382, p. 114701, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114701>.

ZANATTA, J. A.; PAZ, J. M. M. A.; ALBA, F. Coeficientes técnicos da produção de eucalipto em Minas Gerais na pequena, média e grande escala de produção. In: EMBRAPA. **Redape**: repositório de dados de pesquisa da Embrapa. 2025. <https://doi.org/10.48432/FKLFNK>