

Colombo, PR / Novembro, 2025

Estoque de carbono em plantios de eucalipto em Minas Gerais: efeito da mudança de uso do solo

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

13 AÇÃO CONTRA A MUDANÇA GLOBAL DO CLIMA



OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

15 VIDA TERRESTRE



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

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

Documentos 408

Novembro, 2025

Estoque de carbono em plantios de eucalipto em
Minas Gerais: efeito da mudança de uso do solo

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

Embrapa Florestas
Colombo, PR
2025

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba
Caixa Postal 319
83411-000 Colombo, PR
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-presidente

José Elidney Pinto Júnior

Secretária-executiva

Elisabete Marques Oaida

Membros

Annete Bonnet

Cristiane Aparecida Fioravante Reis

Elene Yamazaki Lau

Guilherme Schnell e Schühli

Luis Claudio Maranhão Froufe

Marina Moura Morales

Paulo Marcelo Veras de Paiva

Sandra Bos Mikich

Edição executiva e revisão de texto

José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica

Francisca Rasche

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Celso Alexandre de Oliveira Eduardo

Foto da capa

Josileia Acordi Zanatta

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

Estoque de carbono em plantios de eucalipto em Minas Gerais: efeito da mudança de uso do solo.
[recurso eletrônico] / Franciele Alba ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas, 2025.

PDF (41 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-526X : e-ISSN 1980-3958 ; 408)

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

CDD (21. ed) 674.098173

Francisca Rasche (CRB-9/1204)

© 2025 Embrapa

Autores

Franciele Alba

Engenheira florestal, doutora em Engenharia Florestal, bolsista na 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

José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira

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

Wilson Anderson Holler

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

Apresentação

As florestas plantadas têm papel de destaque no enfrentamento da mudança do clima. Esse documento traz uma análise sobre a magnitude dos estoques de carbono de plantios florestais e sua contribuição para a mitigação da mudança do clima, destacando métricas imprescindíveis para a contabilidade de carbono dos sistemas de produção. A análise aborda estudos desenvolvidos no estado de Minas Gerais, com foco em plantios de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa. O trabalho se insere no contexto da crescente necessidade de o Brasil consolidar o potencial de sequestro de carbono dos plantios florestais, servindo tanto como base às políticas públicas de estímulo à adaptação e mitigação de gases de efeito estufa (GEE) como Plano ABC+, mas também atender às demandas do setor florestal.

A importância do estudo está em fornecer métricas quantitativas e comparáveis para superar a carência de dados regionais precisos para a contabilidade de GEE no País. Essas métricas podem subsidiar inventários nacionais e, principalmente, garantir a competitividade e a reputação ambiental dos produtos florestais brasileiros em mercados internacionais. O trabalho confirma que plantios florestais atuam como um sumidouro de carbono, principalmente daquele contido em raízes e no solo, com potencial de acumular mais de 99 t ha^{-1} de CO_2 no horizonte de 20 anos.

O estudo se baseou numa revisão sistemática da literatura para organizar e juntar dados regionais e gerar métricas robustas e representativas do ambiente estudado. O estudo avaliou os estoques de carbono em três compartimentos cruciais: a biomassa aérea, a biomassa radicular e o carbono armazenado no solo. Para analisar o efeito da mudança de uso do solo, a pesquisa adotou o índice de alteração do carbono do solo (IAC), nas transições envolvendo Cerrado/eucalipto e pastagem/eucalipto, além de estimar o fator R, que representa a alocação de carbono radicular (R) em relação ao carbono da parte aérea.

O trabalho contribui diretamente para a Agenda 2030 das Nações Unidas, estando alinhado com dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O primeiro é o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao quantificar o potencial de mitigação e sequestro de carbono do sistema. O segundo é o ODS 15 (Vida Terrestre), pois a disponibilidade de madeira de plantio e a gestão do carbono no solo, conforme demonstrado (especialmente na conversão de pastagens), promovem o uso sustentável dos ecossistemas e aliviam a pressão de extração sobre as florestas nativas.

Marcelo Francia Arco-Verde

Chefe-Geral interino da Embrapa Florestas

Sumário

Introdução	6
Levantamento sistemático dos estoques de carbono	9
Métricas de carbono e biomassa vegetal aérea e radicular	11
Geração do fator R	11
Carbono do solo: geração do índice alteração do carbono	12
Estoque de carbono na biomassa da parte aérea	13
Estoque de carbono na raiz	17
Relação entre carbono do sistema radicular e o da parte aérea	19
Carbono no solo e IAC	23
Remoção de CO ₂ e	28
Considerações finais	29
Referências	31

Introdução

Nas últimas décadas, a crescente preocupação global com a mudança climática intensificou a demanda por estratégias eficazes de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). No contexto brasileiro, iniciativas vêm sendo implementadas para reduzir emissões e aumentar o sequestro de carbono. Um dos exemplos é o Plano ABC+, onde o componente de florestas plantadas representa 50% da meta de mitigação entre 2020 e 2030 (Brasil, 2021a). No inventário nacional de emissões e remoções de GEE, a área de florestas plantadas no Brasil, que está descrito dentro do setor Mudança de Uso da Terra, figura com potencial de mitigação de 350 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂e). Contudo, esse sumidouro de carbono é totalmente suprimido pelas elevadas emissões de GEE oriundas do desmatamento, que atinge valores da ordem de 787 milhões de toneladas de CO₂e (Brasil, 2021b). Apesar da importância das florestas plantadas, seja no aspecto econômico, seja no ambiental, o País ainda carece de métricas regionais para a contabilização das remoções e emissões de GEE de forma mais precisa e atender as crescentes exigências dos mercados globais, garantindo a competitividade nacional.

Minas Gerais é o estado com a maior área de plantios florestais do País, com 2,27 milhões de hectares (Indústria Brasileira de Árvores, 2024), que responde por 6,35% das exportações nacionais de produtos florestais (Serviço Florestal Brasileiro, 2025). Os principais produtos dos plantios florestais de Minas Gerais são celulose (20%) e carvão vegetal (59,06%) (IBGE, 2025), ambos relacionados na cadeia de exportação. Recentemente, as exigências para a exportação de alguns desses produtos foram enquadradas no Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (CBAM, na sigla em inglês para Carbon Border Adjustment Mechanism), uma estratégia da União Europeia para priorizar a compra de produtos mais sustentáveis, exigindo para tal a declaração de emissões de GEE atrelada ao produto. Nesse cenário, setores produtivos voltados à exportação enfrentam pressões

crescentes para relatar métricas ambientais de forma robusta e confiável. O Brasil ainda carece de mecanismos integrados e transparentes para contabilizar emissões e remoções de GEE, conforme exigido por essas novas regulações, sendo que uma das dificuldades é a falta de métricas representativas e regionais.

Em Minas Gerais, a cadeia do ferro-gusa é o principal vetor de demanda por carvão vegetal de eucalipto condicionando padrões de manejo e cronogramas de corte. O setor siderúrgico, especialmente aquele que utiliza o carvão vegetal de florestas plantadas de eucalipto para a produção de ferro-gusa, destaca-se como exemplo emblemático de produção sustentável. Minas Gerais abriga o maior polo produtor de carvão vegetal do Brasil (Associação Mineira da Indústria Florestal, 2020), com cerca de um milhão de hectares de eucalipto destinados à produção de carvão para uso nas siderúrgicas locais (Sindicato das Indústrias Florestais do Estado de São Paulo, 2024). Apesar de representar uma alternativa mais sustentável em comparação ao uso de combustíveis fósseis, a contabilização das emissões e remoções de carbono associadas à essa cadeia produtiva ainda é limitada, dificultando a comprovação de sua efetividade ambiental frente a mercados exigentes e sistemas de certificação internacional.

No manejo de eucalipto, diversas métricas de carbono podem ser obtidas de forma pontual, tais como estoques de carbono na biomassa e emissões específicas durante operações de campo. A quantificação dos estoques de carbono em florestas é feita por meio de métricas que abrangem diferentes compartimentos do ecossistema florestal. As principais métricas internacionalmente reconhecidas incluem: a) estoque de carbono da biomassa aérea, como galhos, folhas, troncos e copa das árvores, geralmente estimado por inventário florestal, utilizando equações alométricas baseadas em variáveis como diâmetro à altura do peito (DAP), altura da árvore e densidade da madeira (Vieira; Rodríguez-Soalleiro, 2019) Premetlake et al., 2023); b) estoque de carbono da biomassa radicular que quantifica principalmente as raízes vivas, normalmente estimada como uma fração da biomassa aérea, usando razões raiz: parte aérea específicas para cada espécie e, ou região (Calvo Buendia et al., 2019;

Deng et al., 2023); c) o estoque de carbono do solo, em que se mede o carbono orgânico presente nas camadas do solo, geralmente até 30 cm de profundidade, por meio de amostragens, seguidas por análises laboratoriais (Zanatta et al., 2015; Fontana et al., 2024). A partir dos dados de estoque de carbono desses compartimentos (solo e biomassa), estima-se o sequestro de carbono líquido, que vem a ser a diferença de estoque entre usos da terra num intervalo de tempo.

A medida direta do conteúdo de carbono no solo é trabalhosa e normalmente implica em elevado custo de amostragem e análises (Fontana et al., 2024). Como alternativa, para estimar a mudança nos estoques de carbono devido à transição de uso, adota-se o índice de alteração de carbono, que avalia a alteração do carbono do solo do uso atual em relação a um uso de referência ou anterior, considerando o horizonte de 20 anos (Ribeiro et al., 2015; Costa et al., 2020; Zanatta et al., 2020).

A combinação das métricas de estoque de carbono no solo e na biomassa permite uma avaliação robusta e completa dos estoques de carbono, sendo fundamental para inventários nacionais, projetos de Redução do Desmatamento e Degradação Evitado (REDD+) e certificação de créditos de carbono (Atmadja et al., 2022). Compreender e aplicar métricas de carbono precisas em produtos brasileiros é fundamental para atender exigências de mercados internacionais, especialmente diante de regulações ambientais cada vez mais rigorosas (Fan et al., 2019). No CBAM, o qual é uma política da União Europeia para a taxação de emissões de GEE, a exigência recai sobre a declaração verificável das emissões incorporadas ao produto, incluindo a fase agrícola sempre que houver contribuição material para o inventário. A contabilização dessas métricas baseada em ciência e na realidade nacional gera impactos diretos em competitividade, acesso a mercados e reputação ambiental dos produtos brasileiros.

Neste contexto, este estudo tem o objetivo de fornecer métricas quantitativas dos estoques de carbono em florestas plantadas com eucalipto destinadas à produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa em Minas Gerais, considerando a estimativa dos estoques de carbono da biomassa aérea e biomassa radicular, além do carbono

armazenado no solo. A abordagem proposta inclui a sistematização de dados secundários de atividade florestal da região e informações da literatura científica, visando gerar métricas, construir indicadores e coeficientes técnicos que subsidiem o cálculo do estoque de carbono em plantios de eucalipto em Minas Gerais, como efeito da mudança de uso do solo e considerando a fase agrícola do ciclo produtivo.

Esses objetivos estão alinhados com a Agenda 2030 das Nações Unidas, especificamente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 15, que visa *“proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres”*, e com o ODS 13 que trata da *“Ação contra a mudança global do clima”*, visto que a gestão do carbono no solo desempenha um papel fundamental no enfrentamento da mudança do clima e na conservação da biodiversidade dos ecossistemas brasileiros, uma vez que sofrem menor pressão de extração devido à disponibilidade de madeira de plantios florestais.

Levantamento sistemático dos estoques de carbono

Para quantificar os estoques de carbono, foi realizada uma busca estruturada em bases de dados reconhecidas (Web of Science, ScienceDirect, Scopus, SciELO, Oasisbr e Google Acadêmico), abrangendo publicações científicas. As estratégias de busca combinaram descritores em português para bases de dados do Brasil e, em inglês, para bases de dados internacionais, com operadores booleanos, priorizando estudos com dados primários e reporte de incertezas.

O período de busca para publicações foi de 2010 a janeiro de 2025 para o carbono na biomassa aérea, enquanto para o carbono no solo e carbono nas raízes foi considerado um intervalo maior (de 2005 a janeiro de 2025), devido ao baixo número de publicações científicas levantadas, inicialmente. A restrição dos anos pesquisados também foi mantida devido à necessidade de selecionar material genético e modelos de produção atuais. Além disso, foi utilizado esse intervalo para carbono no solo para capturar avanços metodológicos

e dados de referência de ambientes nativos, amplamente utilizados em modelagens e relatórios nacionais e internacionais. A delimitação temporal para o carbono no solo se justifica pela maior disponibilidade de estudos de base e pelo uso desses dados em inventários nacionais (Brasil, 2021b) e relatórios de setoriais (Brasil, 2021c).

Para a busca foram utilizadas combinações de palavras-chave com operadores booleanos, visando garantir a abrangência dos temas de carbono da parte aérea e abaixo do solo:

- Carbono parte aérea: biomassa OR carbono AND florestas de eucalipto AND carvão AND Minas Gerais;
- Carbono abaixo do solo: carbono AND solo OR raízes AND florestas de eucalipto AND Minas Gerais OR Brasil.

Como critério de inclusão, foram considerados apenas estudos realizados no estado de Minas Gerais para as variáveis de carbono da parte aérea e do solo, visando obter homogeneidade edafoclimática e comparabilidade dos resultados. Para o carbono do sistema radicular, a busca foi ampliada para outros Estados brasileiros, devido à escassez de dados regionais e à necessidade de robustez estatística. O número de estudos, mesmo para biomassa de parte aérea que teve o maior quantitativo, não permite uma segregação por condições edafoclimáticas.

Os dados extraídos foram organizados em uma base padronizada, incluindo variáveis como localização geográfica, tipo de solo, tempo de uso da área, incremento médio anual (IMA), informações dos cultivos como densidade e espaçamento de plantio e quantificação do estoque de carbono em diferentes compartimentos (biomassa acima e abaixo do solo, carbono acima e abaixo do solo, carbono do solo e camadas do solo amostradas). A padronização dos dados facilita comparações e análises meta-analíticas, conforme recomendado em revisões sistemáticas (Higgins, 2023). A base de dados foi depositada no repositório Redape (Zanatta et al., 2025a, 2025b, 2025c).

Métricas de carbono e biomassa vegetal aérea e radicular

As análises descritivas e exploratórias foram realizadas, incluindo médias e desvios-padrão dos estoques de carbono da parte aérea e radicular por autor e, para a biomassa da raiz, também por unidade da Federação. Essa abordagem permitiu caracterizar a variabilidade dos dados e identificar padrões iniciais e valores.

A relação entre a idade dos povoamentos e os estoques de carbono foi avaliada por meio de modelagem matemática, utilizando regressão linear simples. Assim, foi possível quantificar o acúmulo de carbono em função da idade e identificar tendências de crescimento, tanto do carbono da biomassa aérea como da biomassa radicular.

Geração do fator R

A fração de massa de raiz (Root Mass Fraction, RMF ou simplesmente R, como adotado pelo IPCC) foi utilizada como indicador da alocação relativa de biomassa nas raízes, calculada pela razão entre o carbono nas raízes e o carbono da parte aérea.

Para investigar padrões de alocação, os dados foram estratificados em classes de conteúdo de carbono da parte aérea, buscando identificar variações em diferentes estágios de desenvolvimento ou condições ambientais do plantio florestal. Para isso, foi empregada uma estratificação dos dados em cinco classes de conteúdo de carbono da parte aérea: classe I 0–50 t ha⁻¹, classe II 50–100 t ha⁻¹, classe III 100–150 t ha⁻¹, classe IV 0–100 t ha⁻¹ e classe V 0–150 t ha⁻¹. As classes se justapõem para testar se os modelos com classes estratificadas são melhores para representar o comportamento do plantio em diferentes fases ou se independe disto. Além disso, o valor de R médio foi calculado nas classes, bem como categorizado por Estados. O cálculo do R médio nas categorias acima descritas permite comparações regionais e entre diferentes níveis de produtividade.

Para se estimar o sequestro de carbono em um plantio florestal, considerou-se três rotações, resultando em um período de 20 anos, sendo que cada rotação foi de 7 anos + 6 anos + 6 anos, correspondendo ao modal de produção de eucalipto para carvão em Minas Gerais. Os ciclos e rotações foram adotados tanto para avaliar a acumulação de carbono durante o crescimento radicular dos povoamentos quanto para a decomposição radicular subsequente ao corte raso. Para a modelagem de crescimento radicular foi adotada a média da produção radicular, gerada por esse estudo, considerando 7 anos. Para modelar o processo de decomposição das raízes, utilizou-se a equação de decaimento exponencial específica para eucaliptos, conforme proposto por Deng et al. (2023), desenvolvida para o Sul da China, em condições climáticas equivalentes àsquelas observadas no estado de Minas Gerais. Essa modelagem foi realizada utilizando o software Excel. O carbono da biomassa da parte aérea foi desconsiderado nessa estimativa porque, na produção de eucalipto para carvão, o carbono contido no tronco será incorporado no processo de produção do ferro-gusa, sendo então contabilizado na fase industrial da produção desse produto.

Carbono do solo: geração do índice de alteração do carbono

Para garantir a comparabilidade entre os estudos analisados, os valores de carbono do solo foram padronizados para a camada de 0–30 cm, conforme recomendação internacional para avaliação de mudanças em estoques de carbono entre usos do solo. Essa padronização minimiza erros associados à variação de profundidade e densidade do solo, facilitando a comparação entre diferentes usos e manejos.

Para avaliar o impacto do uso da terra sobre os estoques de carbono no solo pelo eucalipto, considerou-se que as principais conversões historicamente adotadas foram: pastagens para eucalipto e vegetação de Cerrado para eucalipto. Para cada transição foi gerado o

Índice de Alteração do Carbono do Solo (IAC) que foi calculado pela razão entre o estoque de carbono no solo sob o uso atual (plantio de eucalipto) e o estoque sob o uso anterior (pastagem ou vegetação nativa), conforme equação abaixo:

$$IAC = \frac{\text{Estoque de carbono no solo (uso atual)}}{\text{Estoque de carbono no solo (uso anterior)}}$$

em que

Estoque de carbono no solo (Uso atual): Quantidade total de carbono (t ha^{-1}) após a conversão do uso da terra.

Estoque de carbono no solo (uso anterior): Quantidade total de carbono (t ha^{-1}) antes da conversão.

Valores de IAC maiores que 1 indicam aumento do estoque de carbono após a mudança de uso, enquanto valores menores que 1 indicam perda de carbono. O uso desse indicador é reconhecido em programas nacionais e internacionais de monitoramento de carbono aéreo (Eggleston et al., 2006; Assad et al., 2020), sendo fundamental para avaliar a sustentabilidade de práticas de manejo e políticas de mitigação de mudança climática.

Estoque de carbono na biomassa da parte aérea

O valor médio do estoque de carbono na biomassa da parte aérea encontrada entre os trabalhos analisados foi $66,84 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 1), com variação significativa entre os estudos, refletido num desvio padrão de 32 t ha^{-1} . Esse comportamento reflete as diferenças principalmente nas idades dos povoamentos e condições locais dos sítios florestais em termos de clima e solo (Gatto et al., 2011; Truguilho et al., 2010).

O maior estoque de carbono, na média do estudo, foi 76 t ha^{-1} , reportado por Gatto et al. (2011), o que pode estar relacionado à idade mais avançada das árvores desse estudo, uma vez que esse autor apresenta valores em plantios de até dez anos de idade. Em contraste, o menor estoque de carbono foi 30 t ha^{-1} , encontrado por Truguilho et al. (2010), em plantios de cinco anos, o que pode ser resultado, além da menor idade, das características edafoclimáticas da região, incluindo a baixa fertilidade do solo, como reportado pelo autor.

Ao analisar a faixa etária de 5 a 7 anos, observou-se que o estoque médio de carbono da biomassa na parte aérea foi $67,07 \text{ t ha}^{-1}$, similar à média geral ($66,84 \text{ t ha}^{-1}$), uma vez que metade dos estudos encontrados apresentam valores nessa faixa de idade. No geral, a produção de biomassa da parte aérea é influenciada pela capacidade produtiva do sítio, idade, pelas condições climáticas (Castilho et al., 2006; Gatto et al., 2011; Binkley et al., 2017). Esses últimos autores observaram que, acima de $18\text{-}20^\circ\text{C}$, o aumento de 1°C na temperatura média do sítio florestal estava associado a um declínio de $2,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No entanto, a idade do povoamento é um dos principais determinantes do acúmulo de biomassa e carbono na parte aérea, com estabilização dos estoques em idades intermediárias, normalmente a partir de oito anos, também para outras espécies (Sanquetta et al., 2014). Entender o comportamento dos estoques de carbono em relação à idade é relevante para alimentar modelos de balanço de carbono e quantificar emissões de GEE evitadas ou quantificar o sequestro de carbono na cadeia de produção de carvão vegetal, conforme destacado em avaliações de diferentes biomas e sistemas de manejo (Fialho; Zunn, 2014; Jones et al., 2019; Anderson-Teixeira et al., 2021).

Os resultados indicaram aumento do estoque de carbono na biomassa da parte aérea, com o avanço das idades das plantações (Figura 2). A cada ano, as plantações acumularam na biomassa da parte aérea, em média $11,88 \text{ t ha}^{-1}$ de carbono, valor representado pelo coeficiente angular da regressão linear. O incremento anual em carbono observado neste levantamento foi ligeiramente superior ao valor adotado no 4º inventário nacional de remoções e emissões de GEE do Brasil, publicado em 2020 (Brasil, 2021b, 2021c), cujo valor

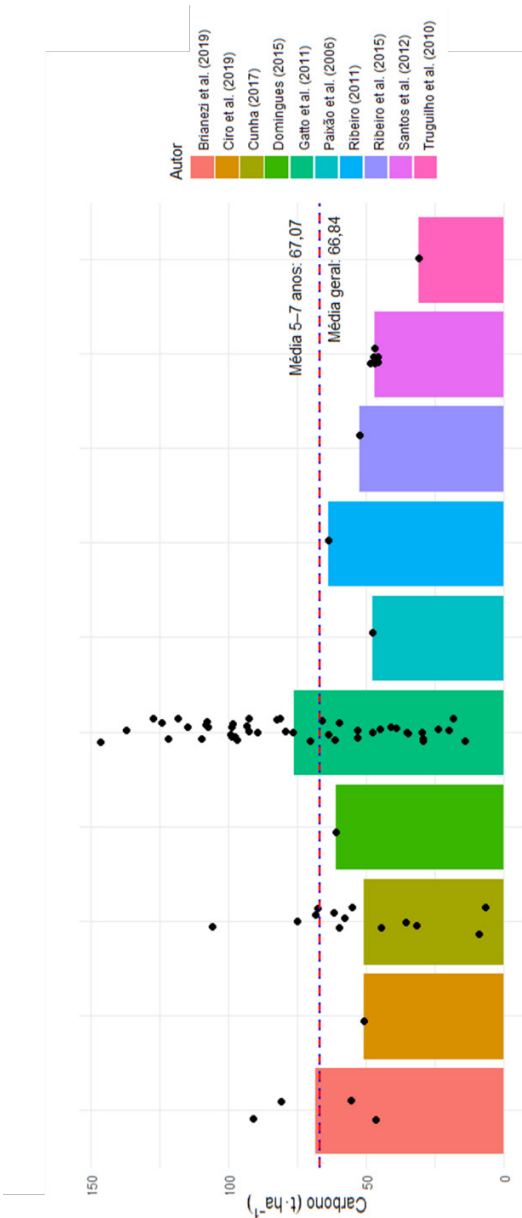


Figura 1. Estoques médios de carbono na biomassa da parte aérea de eucalipto, levantados em estudos desenhados em Minas Gerais, apresentados por autoria.

de incremento foi $8,56 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Essa diferença positiva em termos de acúmulo nesse estudo possivelmente se deve a essa análise se limitar ao estado de Minas Gerais, estado com maior área de plantios florestais no Brasil e que demonstra a aptidão edafoclimática da região, representando um IMA superior a $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Comparando com dados nacionais, porém, o incremento médio de carbono anual está em plena concordância com estudos recentes em plantações de eucalipto no Brasil, que relatam taxas de acúmulo de carbono acima do solo entre $8,3$ e $12,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em sistemas de rápido crescimento (Vieira; Rodríguez-Soalleiro, 2019). Os mesmos autores, mediante estudo de um plantio híbrido com dez anos de idade estabelecido no Sul do Brasil, encontraram uma taxa de acúmulo de C de $11,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na biomassa da parte aérea, praticamente idêntica ao valor observado no presente estudo. Outros trabalhos também destacam o rápido acúmulo de carbono em plantações de eucalipto, especialmente em sistemas de curta rotação e sob condições favoráveis de manejo (Binkley et al., 2017; Premetilake et al., 2023).

Naturalmente, os maiores estoques de carbono na biomassa da parte aérea foram observados em plantios com mais de 8-10 anos (Gatto et al., 2011; Domingues, 2015). Nessa faixa de idade, os autores observaram valores superiores a 100 t ha^{-1} de carbono, o que reforça a tendência de acúmulo contínuo de carbono com o envelhecimento dos povoamentos. A variabilidade observada em torno da linha de tendência é esperada, pois fatores como solo, clima, manejo e material genético influenciam significativamente a taxa de crescimento e o sequestro de carbono da espécie vegetal (Gatto et al., 2011; Cunha, 2017; Binkley et al., 2017).

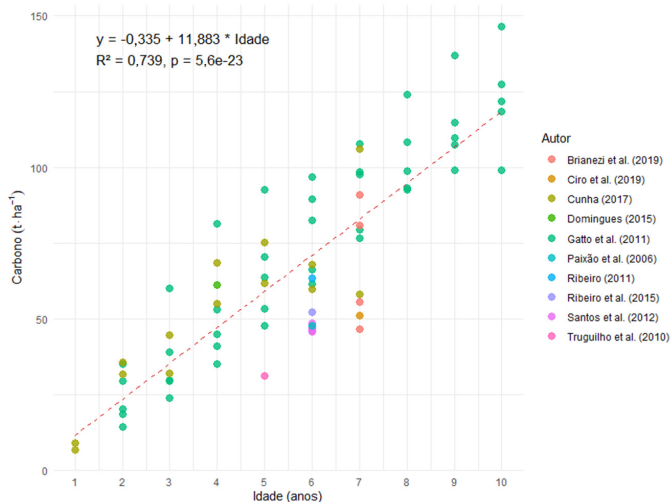


Figura 2. Relação entre o estoque de carbono na biomassa da parte aérea e a idade dos plantios de eucalipto em Minas Gerais.

Estoque de carbono na raiz

O número de estudos que quantificam a biomassa e o estoque de carbono de raiz de eucalipto foi menor que os trabalhos que quantificam a biomassa da parte aérea, totalizando quatro estudos, em dois diferentes estados: Minas Gerais e São Paulo, integrando a faixa de idade de 2 a 7 anos (Paixão et al., 2006; Gatto et al., 2011; Ribeiro et al., 2015; Rodrigues, 2021).

O estoque de carbono no compartimento radicular também exibe uma relação positiva com a idade (Figura 3). A cada ano de idade, há um acréscimo médio de 3,73 t ha⁻¹ de carbono nas raízes (Figura 3). Embora este valor seja menor que o incremento médio anual observado para o estoque de carbono da parte aérea, é consistente com a fisiologia das plantas, em que o crescimento da biomassa radicular acompanha o desenvolvimento da parte aérea.

O valor do coeficiente de determinação indica que 68% da variação no estoque de carbono do sistema radicular pode ser explicada pela idade das florestas. Esse valor, embora ligeiramente inferior ao coeficiente de determinação da relação do estoque de carbono da parte aérea e idade ($R^2 = 88\%$), ainda é consideravelmente alto, o que reforça a idade como um fator chave na acumulação de carbono em ambos os compartimentos. A variabilidade observada entre os autores, nos dados de estoque de carbono na raiz, assim como no estoque de carbono na biomassa da parte aérea, enfatiza a necessidade de considerar as particularidades metodológicas e de cada sítio de produção, ao realizar comparações. Diferenças nas metodologias de amostragem de raízes, tipos de solo, disponibilidade de nutrientes e regime hídrico podem influenciar significativamente a biomassa

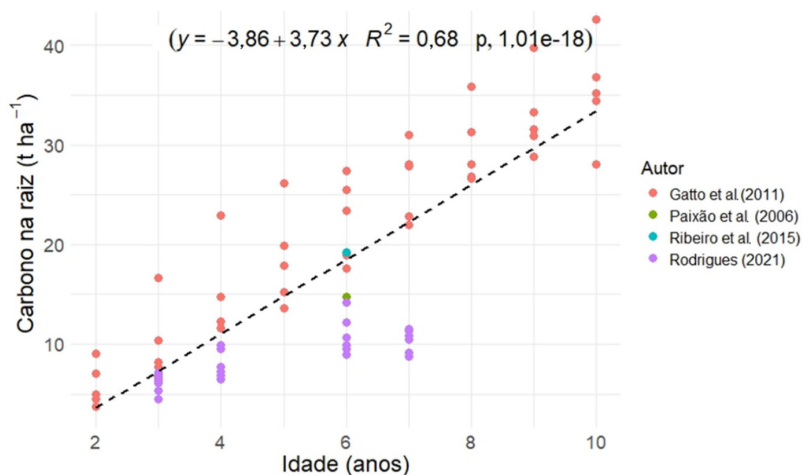


Figura 3. Relação entre o estoque de carbono na biomassa radicular e a idade dos plantios de eucalipto em Minas Gerais e São Paulo.

radicular e, conseqüentemente, o estoque de carbono (Bordron et al., 2019; Basílio et al., 2024).

A média geral do estoque de carbono encontrado no compartimento radicular em um plantio de idade madura foi 17,23 t ha⁻¹. Embora a maior parte do carbono da biomassa vegetal esteja concentrada na parte aérea, o carbono presente nas raízes é fundamental para o sequestro de carbono no longo prazo, pois este permanece na área após o corte raso da floresta, garantindo também a resiliência do sítio florestal (Deng et al., 2023).

Relação entre carbono do sistema radicular e o da parte aérea

A análise da relação entre o carbono estocado na biomassa da parte aérea e na biomassa radicular, estratificada em cinco classes distintas, revelou uma correlação linear positiva consistente, indicando que o acúmulo de carbono nas raízes acompanha o da parte aérea, mas em proporções diferentes, dependendo da produção da parte aérea (Figura 4). A correlação variou significativamente entre as classes, com coeficientes de determinação (R^2) que variam de moderados ($R^2 = 0,56$ na Classe II) a extremamente fortes ($R^2 = 1,00$ na Classe III e $R^2 = 0,88$ na Classe V), o que denota diferentes graus de previsibilidade do modelo. Percebe-se um efeito sistemático associado à fonte dos dados, em que os valores de um mesmo autor tendem a se agrupar de forma consistente acima ou abaixo da linha de regressão geral. Isso sugere que fatores específicos de cada estudo — como a espécie, as condições edafoclimáticas do local e a metodologia ou modelos alométricos empregados — exercem uma influência substancial na partição de carbono entre os compartimentos aéreo e radicular.

O valor da fração de raiz (R) estimado pelos modelos lineares de regressão (Figura 4) foram ligeiramente diferentes daqueles calculados aritmeticamente por classes de quantidade de carbono na parte aérea (Figura 5). Contudo, ambos os procedimentos metodológicos sugerem que a alocação de carbono na biomassa de raízes

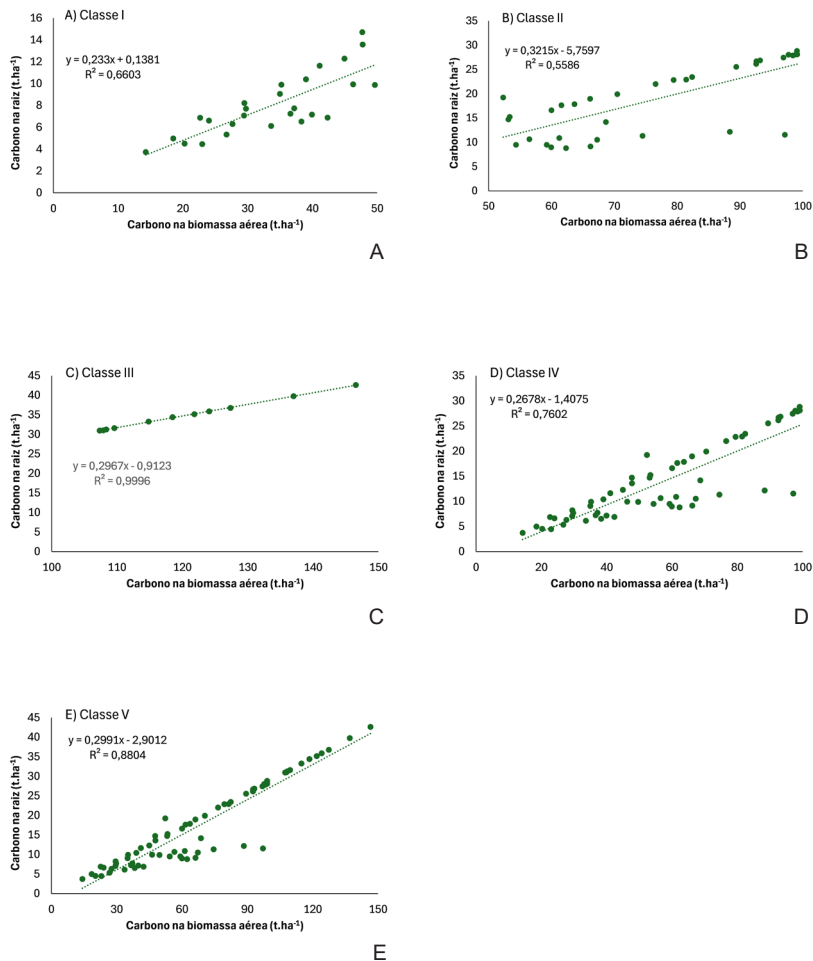


Figura 4. Relação entre o estoque de carbono do compartimento raiz e o estoque de carbono da parte aérea de plantios de eucalipto em Minas Gerais e São Paulo.

(A) Classe I de 0 – 50 t ha⁻¹ de carbono; (B) classe II de 50 a 100 t ha⁻¹ de carbono; (C) classe III de 100 a 150 t ha⁻¹ de carbono; (D) classe IV de 0 a 100 t ha⁻¹ de carbono; (E) classe V de 0 a 100 t ha⁻¹ de carbono.

é relativamente maior em florestas que atingem um estágio de maior acumulação de carbono da parte aérea (Classe II – 50 a 100 t ha⁻¹; Classe III - 100 a 150 t ha⁻¹ de carbono) do que quando o estoque é menor (Classe 0 a 50 t ha⁻¹), entendendo que essas classes podem representar diferenças de idade e, também, limitações no sítio de produção. Essa diferenciação no comportamento pode ser um indicativo de que, em um determinado ponto de maturidade, as árvores podem investir mais em seu sistema radicular para suporte estrutural e aquisição de recursos em um ambiente mais competitivo ou em estágios de crescimento mais lentos, onde a manutenção da biomassa existente se torna prioritária (Qi et al., 2019; He et al., 2023).

O R médio também variou com o ambiente do estudo, sendo que, em Minas Gerais, foi observado o maior valor (0,28), seguido por São Paulo (0,18) (Figura 6). Essas diferenças podem ser atribuídas à variações nos procedimentos de amostragem, nas condições ambientais como disponibilidade de água e nutrientes, e manejo florestal entre os sítios de produção. Florestas em condições de estresse hídrico ou nutricional, por exemplo, podem alocar proporcionalmente mais carbono para as raízes, a fim de otimizar a captação de recursos (Gonçalves, 1994; Mello; Gonçalves, 2008, Gatto et al., 2011, Aaltonen et al., 2016; Brunn et al., 2022).

A média geral da relação C raiz: C aéreo foi 0,25, valor abaixo daquele que o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Eggleston et al., 2006; Calvo Buendia et al., 2019) sugere, sendo esse valor entre 27-37% da biomassa vegetal aérea para florestas, globalmente. Contudo, esses valores médios não consideram especificidades de espécies ou tipos de plantação, como o eucalipto. No inventário nacional, descrito na quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, o Brasil adota o R de 0,35 (Brasil, 2021c), oriundos de estudos que foram realizados antes de 2005 e, possivelmente, representando ainda muitos plantios seminais. A aplicação desses valores-padrão na ausência de dados locais pode não refletir acuradamente a realidade das plantações de eucalipto, as quais demonstram variações significativas em função do clima, manejo e idade da floresta. A realidade

atual inclui outros materiais genéticos e predomínio de plantios clonais e tendem a apresentar valores de R menores. Lopes et al. (2025) estimaram, para a região Centro-Sul do Brasil, valores de R médio de 0,22 com variação de 0,10 a 0,34, os quais são muito próximos dos valores desse estudo.

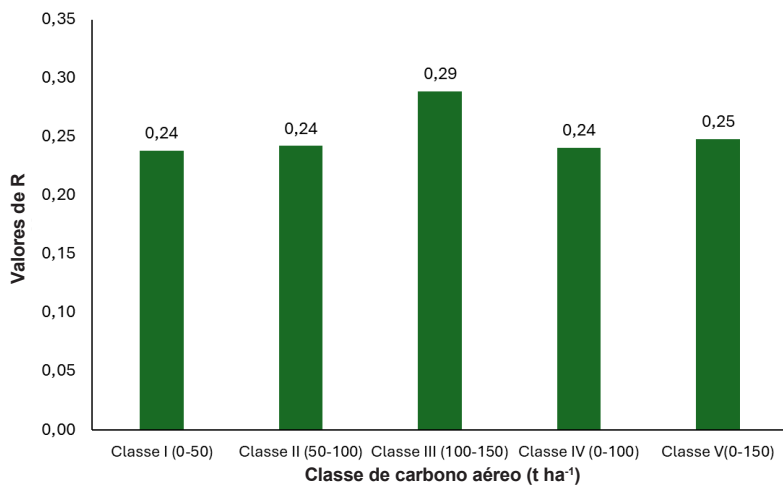


Figura 5. Valores de R por classe de quantidade de estoque de carbono na biomassa aérea de eucalipto.

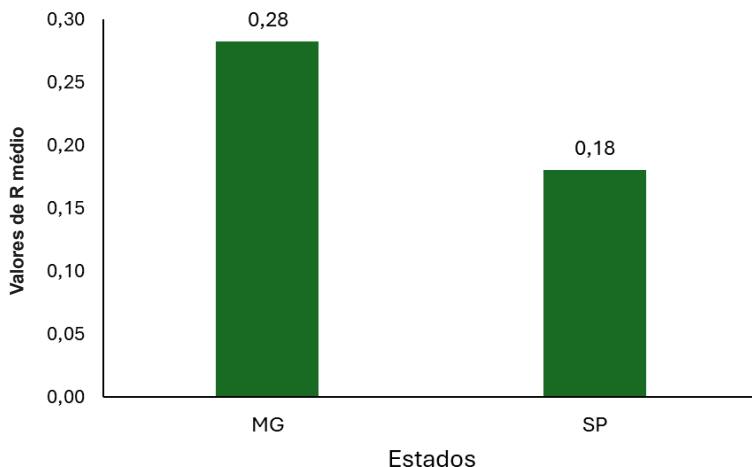


Figura 6. Valores de R médio nos estados de Minas Gerais (MG) e São Paulo (SP).

Carbono no solo e IAC

No total foram identificados 16 estudos de diferentes autores abordando o estoque de carbono no solo, sob diferentes usos da terra em Minas Gerais. No Cerrado, a média do estoque de carbono no solo, na camada de 0 – 30 cm, foi $66,5 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto no plantio de *Eucalyptus spp.* foi $60,4 \text{ t ha}^{-1}$ e na pastagem foi $57,1 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 7). Esses resultados refletem tendências amplamente observadas na literatura, nas quais áreas de vegetação nativa do Cerrado apresentam maiores estoques de carbono devido à alta deposição de serapilheira, raízes profundas e menor perturbação antrópica (Fialho; Zinn et al., 2014; Costa et al., 2020; Zanatta et al., 2020).

Os índices de alteração de carbono (IAC) nas transições envolvendo Cerrado, eucalipto e pastagem, em ambos os sentidos de alteração de uso da terra, podem ser observado na Figura 8.

A conversão de Cerrado para plantios de eucalipto gera uma perda média aproximada de 9,2% do carbono do solo. Entretanto, a

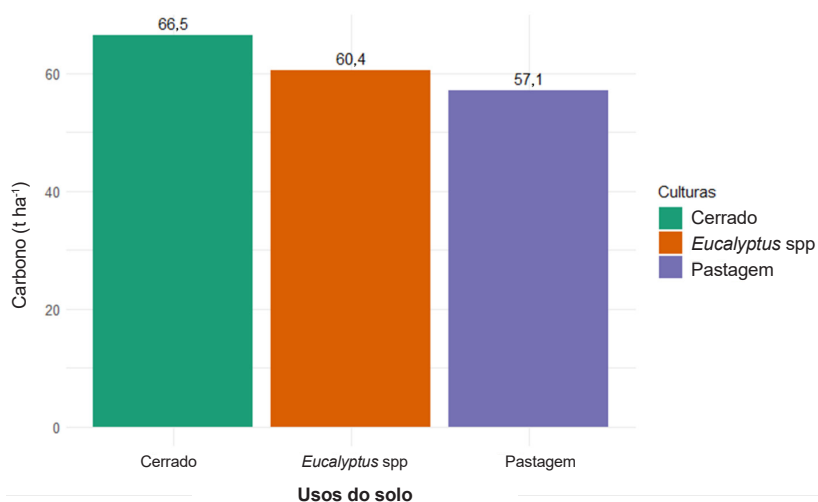


Figura 7. Estoques de carbono no solo, na camada de 0-30 cm, de diferentes usos do solo, no estado de Minas Gerais.

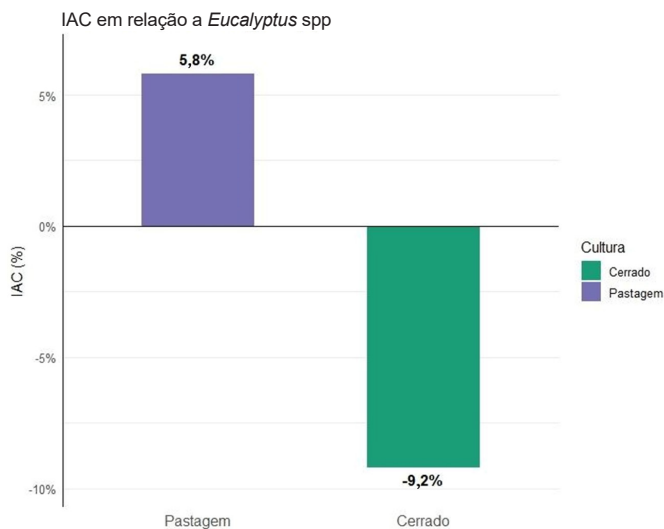


Figura 8. Índice de alteração do carbono (IAC) entre os usos do solo na transição Cerrado e eucalipto e pastagem e eucalipto.

conversão de pastagens para plantios de eucalipto tem potencial de aumentar em 5,8% o estoque de carbono no solo, e pode ser ainda maior se as pastagens apresentarem níveis elevados de degradação (Zanatta et al., 2020).

O IAC entre os usos da terra indica que, embora o eucalipto não recupere totalmente o estoque original do Cerrado, este é mais eficiente do que as pastagens em preservar o carbono do solo. Isso indica que a substituição de pastagens por eucalipto pode resultar em um ganho no estoque de carbono do solo, corroborando achados de que sistemas florestais ou, ainda, sistemas integrados com o componente florestal são estratégias eficazes para restaurar o carbono do solo em áreas degradadas, conforme incentiva diversas políticas públicas, entre elas, o Plano de Ação para Recuperação e Manejo de Florestas, o Floresta+Sustentável, do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) (Brasil, 2023), o Plano ABC+ (Brasil, 2021a) e o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas.

A conversão do Cerrado para pastagem ou eucalipto geralmente resulta na redução do carbono do solo, mas a magnitude dessa perda depende do manejo e do histórico de uso da terra. Estudos mostram que plantações de eucalipto bem manejadas podem manter ou até recuperar parte do carbono perdido após a conversão de pastagens degradadas, aproximando-se dos níveis encontrados na vegetação nativa (Ribeiro et al., 2023). É importante considerar, ainda, a qualidade do carbono estocado. O Cerrado tende a acumular frações mais estáveis de matéria orgânica, enquanto plantações de eucalipto e pastagens podem apresentar maior proporção de carbono lábil, mais suscetível à decomposição (Costa et al., 2020; Ribeiro et al., 2023).

Ao analisar apenas a cultura eucalipto, com média geral de carbono no solo de 60,41 t ha⁻¹ (Figura 9), a região de Bocaiúva apresentou o maior estoque de carbono no solo, ultrapassando 120 t ha⁻¹, valor bastante acima da média geral. Além disso, locais como Paraíba, João Pinheiro, Rio Doce e Vazante mostraram estoques de carbono no solo significativamente abaixo da média, destacando regiões com menores acúmulos de carbono no solo. Os municípios de Florestal, Lavras e Santa Bárbara registraram estoques próximos ou ligeiramente

superiores à média. Essa variação entre as áreas pode refletir fatores como clima, tipo de solo, uso e cobertura da terra, práticas de manejo e histórico de degradação ou conservação.

Ao se considerar que as plantações de eucalipto em Minas Gerais ocupam atualmente mais de 2,2 milhões de hectares, e assumindo que 50% das áreas de plantios florestais foram derivadas de pastagem, estima-se um ganho de aproximadamente 3,8 milhões de toneladas de carbono no solo ($1,1 \text{ milhão ha} \times 60,4 \text{ t ha}^{-1} \times 0,058$). O armazenamento e a estabilidade do carbono em sistemas florestais podem fundamentar políticas públicas voltadas ao aumento ou à manutenção dos estoques de carbono no solo, contribuindo para a mitigação da mudança climática e para a sustentabilidade do uso da terra.

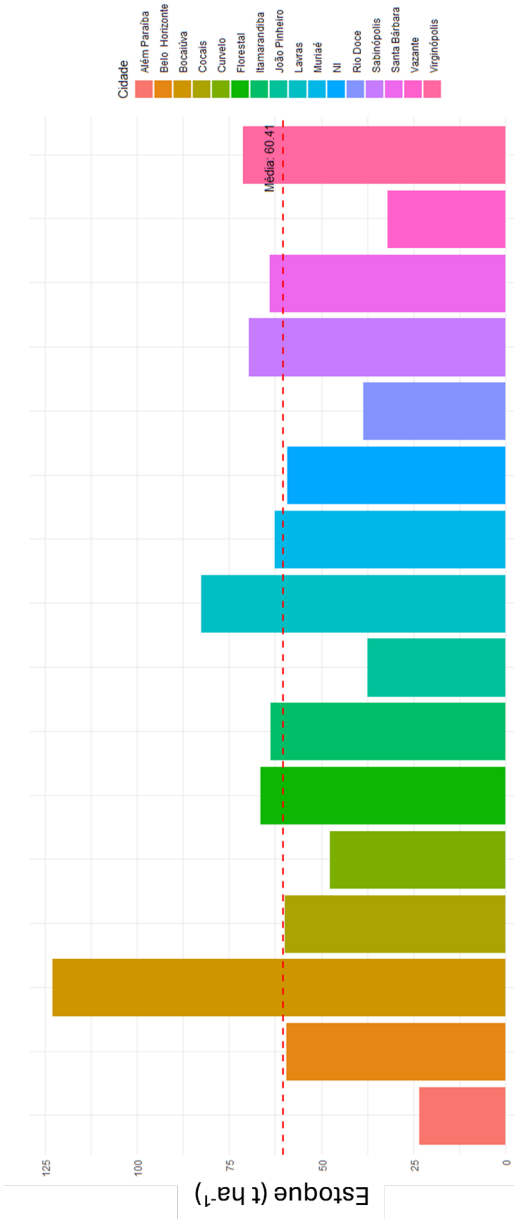


Figura 9. Estoque de carbono no solo, na camada de 0-30 cm, por município.

Remoção de CO₂e

As métricas de remoção de CO₂ foram calculadas sem considerar o carbono da biomassa aérea, considerando que esse compartimento é matéria prima para produção do carvão vegetal e, nesse caso, o carbono é contabilizado no processamento do ferro-gusa. Essa decisão foi baseada no entendimento de que, para a produção de carvão, o carbono da parte aérea é transferido para um novo produto, o que impede sua contabilização como um sequestro permanente para fins de compensação na fase agrícola. Desse modo, o estudo quantificou como remoção de CO₂ apenas o carbono estocado no solo e nas raízes, que representam um armazenamento de longo prazo.

O ganho de carbono no solo atribuído à mudança de uso da terra foi determinado pela diferença entre os estoques de carbono sob o plantio de eucalipto e a pastagem. Após 20 anos, essa diferença foi quantificada em 3,31 t ha⁻¹ de carbono (Figura 7). Este acúmulo contribuiu para uma remoção equivalente de CO₂ de 12,14 t ha⁻¹ (Tabela 1).

A dinâmica do carbono na biomassa radicular foi modelada com base em um padrão de acúmulo e decomposição repetitivos ao longo de um ciclo de 20 anos, cobrindo múltiplos ciclos (Figura 10). Observou-se que, em cada ciclo, o estoque de carbono na biomassa das raízes atinge um pico de 17,23 t ha⁻¹ quando a floresta está madura (sete anos). Após a colheita, a biomassa radicular remanescente se decompõe, liberando carbono para o solo e a atmosfera. A simulação demonstrou que, ao final do período de 20 anos, o carbono acumulado nas raízes totalizou 23,70 t ha⁻¹, correspondendo a 86,90 t de CO₂ equivalente. Este modelo reflete a variação do carbono radicular em diferentes idades da floresta.

No período de 20 anos, os resultados indicaram uma remoção total de 99,03 t ha⁻¹ de CO₂e em plantios de eucalipto destinados à produção de carvão (Tabela 1), considerando compartimento solo e raízes. Isso equivale a uma taxa anual de sequestro de CO₂e de 4,95 t ha⁻¹ ou 1,35 t ha⁻¹ ano⁻¹ de carbono. Este valor pode ser utilizado para a mensuração de remoções de CO₂ da atmosfera, fornecendo dados essenciais para o balanço de carbono, e demonstrando o potencial de tais sistemas de plantio para a mitigação de emissões de GEE.

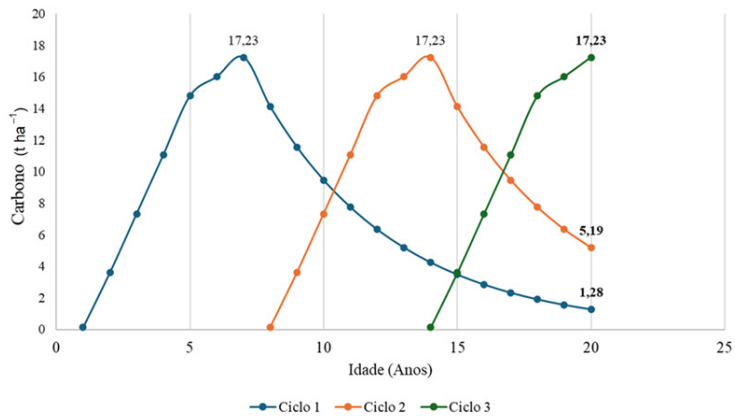


Figura 10. Acúmulo e decomposição do carbono na biomassa das raízes de eucalipto, ao longo de 20 anos.

Tabela 1. Métricas de carbono em plantios de eucalipto, em Minas Gerais.

Componentes	Carbono remanescente (t ha ⁻¹)	C remanescente em CO2 equivalente (t ha ⁻¹)
Solo	3,31	12,14
Raiz	23,70	86,90
Total	27,01	99,03

Considerações finais

Os resultados deste estudo atendem diretamente ao objetivo de fornecer métricas quantitativas e comparáveis dos estoques de carbono em florestas plantadas de eucalipto destinadas à produção de carvão vegetal, para o setor de ferro-gusa em Minas Gerais.

A estabilidade observada na relação entre carbono da parte aérea e radicular, mesmo entre diferentes classes de produtividade, reforça

a confiabilidade dos coeficientes técnicos gerados para subsidiar inventários e balanços de carbono, embora a alocação radicular média tenha sido ligeiramente inferior aos padrões internacionais, refletindo as especificidades das plantações brasileiras.

A análise da dinâmica do carbono radicular e do estoque no solo demonstrou que este sistema pode atuar como um sumidouro de carbono de grande magnitude. Com um estoque total de 99,03 t ha⁻¹ de CO₂e, esses plantios se mostram promissores para a compensação de emissões de GEE, especialmente quando realizados em áreas de pastagem com algum nível de degradação como uso anterior. No entanto, para se obter um balanço de GEE mais completo e preciso, é fundamental que futuras investigações considerem as emissões de metano e óxido nitroso relacionadas à manutenção e ao crescimento do plantio. Nesse sentido, os dados detalhados sobre o estoque e a dinâmica do carbono radicular e do solo apresentados neste trabalho servirão como uma base robusta para calibrar e subsidiar modelos que incluam esses outros fluxos de GEE, permitindo uma avaliação mais holística e acurada do potencial de mitigação climática desses sistemas.

Apesar de o presente estudo ter fornecido métricas quantitativas robustas para os estoques de carbono, é crucial reconhecer suas limitações. Uma das principais lacunas identificadas é a falta de estudos que acompanham o ciclo de produção de eucalipto maior de sete anos, para saber o comportamento do estoque de carbono em diferentes compartimentos. Futuras pesquisas deveriam se concentrar em estudos de longa duração que acompanhem a dinâmica do carbono ao longo de múltiplos ciclos de rotação, avaliando o impacto cumulativo do manejo florestal.

A escassez de dados regionais para o carbono da biomassa radicular e a necessidade de extrapolar dados de outros Estados, por exemplo, introduz um grau de incerteza que poderia ser mitigado com a realização de medições de campo diretas em diferentes regiões edafoclimáticas de Minas Gerais, assim como a investigação sobre os índices de decomposição da biomassa radicular. O desenvolvimento de modelos de alometria específicos para a biomassa radicular

de eucalipto em diferentes condições ambientais brasileiras é outra área de pesquisa prioritária. No componente solo, apesar da riqueza de estudo verificada, as camadas amostradas são superficiais e não contemplam a totalidade do potencial dos plantios florestais em acumular carbono no solo. Essas abordagens aprofundarão o conhecimento científico e fortalecerão a base de dados nacional para atender, de forma mais eficiente e confiável, às demandas por transparência e sustentabilidade em mercados globais.

Referências

AALTONEN, H.; LINDÉN, A.; HEINONSALO, J.; BIASI, C.; PUMPANEN, J. Effects of prolonged drought stress on Scots pine seedling carbon allocation. **Tree Physiology**, v. 37, n. 3, p. 418-427, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw119>.

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.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; PAVÃO, E. M.; GUSSON, E.; SILVA, J. P.; PRADO, A.; PONTES, C.; BIDERMAN, R.; ESTURBA, T.; ROMEIRO, V. **Greenhouse Gas Protocol Calculation Tool for Forestry in Brazil**. [S.l.]: WRI BRASIL, 2020. 32 p. (Technical note).

ANDERSON-TEIXEIRA, K.; HERRMANN, V.; MORGAN, R.; BOND-LAMBERTY, B.; COOK-PATTON, S.; FERSON, A.; MULLER-LANDAU, H.; WANG, M. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 6, e064026, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>.

ATMADJA, S. S.; DUCHELLE, A. E.; DE SY, V.; SELVIANA, V.; KOMALASARI, M.; SILLS, E. O.; ANGELSEN, A. How do REDD+ projects contribute to the goals of the Paris Agreement? **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 4, e044033, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5669>.

BASÍLIO, J. J. N.; CAMPOE, O. C.; QUEIROZ, T. B. Fine root density dynamics and carbon stock of *Eucalyptus* spp.: interplay of age, genotype, and edaphoclimatic conditions. **Plants**, v. 13, n. 11, p. 1503, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13111503>.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, Í.; 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>.

BORDRON, B.; ROBIN, A.; OLIVEIRA, I. R.; ALMEIDA, R. G.; LIMA, S. S.; LACLAU, J. P. Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young *Eucalyptus grandis* trees. **Forest Ecology and Management**, v. 431, p. 6-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.018>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030**: plano operacional. Brasília, DF, 2021a. 133 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc>. Acesso em: 13 ago. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF, 2021b. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/4_com_nac_brasil_web.pdf. Acesso em: 17 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**: relatório de referência: Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF). Brasília, DF, 2021c. 314 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 15 mai. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Portaria nº 628, de 14 de novembro de 2023. Institui o Plano de Ação para Recuperação e Manejo de Florestas – Plano Floresta + Sustentável, no âmbito do Ministério da Agricultura e Pecuária. **Diário Oficial da União**, edição 217, seção 1, p. 4, 16 nov. 2023.

BRUNN, M.; HAFNER, B.; ZWETSLOOT, M.; WEIKL, F.; PRITSCH, K.; HIKINO, K.; RUEHR, N.; SAYER, E.; BAUERLE, T. Carbon allocation to root exudates is maintained in mature temperate tree species under drought. **The New Phytologist**, v. 236, n. 1, p. 76-88, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.18157>.

CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROSHENKO, Y. SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed.). **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneve: IPCC, 2019. v. 4. cap. 10. p. 10.9-10.167. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 3 nov. 2025.

CASTILHO, C. V.; MAGNUSSON, W. E.; de ARAÚJO, R. N. O.; LUIZÃO, R. C. C.; LUIZÃO, F. J.; LIMA, A. P.; HIGUCHI, N. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: effects of soil and topography. **Forest Ecology and Management**, v. 234, n. 1/3, p. 85-96, 2006.

COSTA, A. A.; DIAS, B. O.; FRAGA, V. S.; SANTANA, C. C.; SILVA, N. Carbon and nitrogen stocks in soils under different forms of use in the Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 528-533, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p528-533>.

CUNHA, D. N. **Estoques de carbono em componentes de povoamentos de eucalipto no cerrado de Minas Gerais**. 2017. 47 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

DENG, X.; LIANG, X.; SHEN, L.; LIU, H.; YANG, M.; ZENG, M.; LIANG, M.; CHENG, F. Decomposition and nutrient dynamics of stumps and coarse roots of *Eucalyptus* plantations in southern China. **Annals of Forest Science**, v. 80, n. 1, p. 30, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01201-y>.

DOMINGUES, G. F. **Estimação de biomassa aérea e volume em povoamentos de eucaliptos através de imagens do satélite ALOS**. 2015. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, K. M.; NGARA, T.; TANABE, K. **2006 IPCC: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

FAN, J. L.; ZHANG, X.; WANG, J. D.; WANG, Q. Measuring the impacts of international trade on carbon emissions intensity: a global value chain perspective. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 21, n. 4, p. 617-636, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/1540496X.2019.1662783>.

FIALHO, R. C.; ZINN, Y. L. Changes in soil organic carbon under *Eucalyptus* plantations in Brazil: a comparative analysis. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 4, p. 428-437, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2158>.

FONTANA, A.; VIVIAN, A. M.; ARCO, M. A. de L.; MENEZES, A. R. de; SANTOS, B. V. C.; CLEMENTE, E. de P. **Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 7 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 83).

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. D.; 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. 895-905, 2011.

GONÇALVES, J. L. M. **Características do sistema radicular de absorção do sob diferentes condições edáficas**. 1994. 84 f. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

HE, L.; ZHANG, X.; WANG, X.; ULLAH, H.; LIU, Y.; DUAN, J. Tree crown affects biomass allocation and its response to site conditions and the density of *Platycladus orientalis* Linnaeus plantation.. **Forests**, v. 14, n. 12, p. 2433, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122433>.

HIGGINS, J. P. T.; THOMAS, J.; CHANDLER, J.; CUMPSTON, M.; LI, T.; PAGE, M.; WELCH, V. (ed.). **Cochrane handbook for systematic reviews of interventions version 6.4**: updated August 2023. [S.l.]: Cochrane, 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Ibá 2024**: relatório anual. [S. l.]: Ibá, 2024. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2024**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=774>. Acesso em: 10 ago. 2025.

JONES, I.; DeWALT, S.; LOPEZ, O.; BUNNEFELD, L.; PATTISON, Z.; DENT, D. Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. **The Science of the Total Environment**, v. 697, e133987, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133987>.

LOPES, I. L. e; CAMPOE, O. C.; BARROS, G. M.; GONÇALVES, A. F. A.; MATZNER, G. G. M.; FIGURA, M. A.; ALVARES, C. A.; CUNHA, F. L.; REZENDE, V. B. S. de; STAHL, J.; BASÍLIO, J. J. N.; FÉLIX, H. J. A.; BOIGUES, T. B.; DICK, G.; MATTOS, E. M. de; GUILLEMOT, J.; LE MAIRE, G.; COOK, R.; ALBAUGH, T. J.; RUBILAR, R. A.; JESUS, M. S. de; TONACO, A. S.; MUNHOZ, J. S. B.; DELIBERARI, I.; STAPE, J. L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P. Improved estimates of biomass expansion factors and root-to-shoot ratios: an approach for different forest types across a climatic gradient in Brazil. **Global Change Biology**, v. 31, n. 8, e70395, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.70395>.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.

PAIXÃO, A. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L. da; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. da. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 453-461, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-6762200600030001>.

PREMETILAKE, M. M. S. N.; PERERA, G. A. D.; KULASOORIYA, S. A.; RATNAYAKE, R. 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>.

QI, Y.; WEI, W.; CHEN, C.; CHEN, L. Plant root-shoot biomass allocation over diverse biomes: a global synthesis. **Global Ecology and Conservation**, v. 18, e00606, 2019.

RIBEIRO, F. P.; GATTO, A.; OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; VALADÃO, M. B. X.; ARAÚJO, J. B. C. N.; CARVALHO, A. M.; FERREIRA, E. A. B. Carbon storage in different compartments in *Eucalyptus* stands and native Cerrado vegetation. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2751, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12142751>.

RIBEIRO, S. C.; SOARES, C. P. B.; FEHRMANN, L.; JACOVINE, L. A. G.; GADOW, K. von. Biomassa acima e abaixo do solo e estimativas de carbono para um plantio clonal de eucalipto no sudeste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 39, n. 2, p. 353-363, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>.

RODRIGUES, G. G. **Impacto da densidade de plantio na compartimentalização da biomassa e nas emissões de gases do efeito estufa do solo (GEE) em clones de eucalipto**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Exportação de produtos florestais 1997-2024**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/paineis-interativos/exportacao-de-produtos-florestais-1997-2024>. Acesso em: 17 set. 2025.

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

TRUGUILHO, P. F.; ARANTES, M. D. C.; PÁDUA, F. A.; ALMADO, R. P.; ANA, E. R. B. Estimativa de carbono na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 16, supl. p. 33-40, 2010.

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.

ZANATTA, J. A.; PULROLNIK, K.; VIANA, J. H. M. **Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais** : Projeto Saltus. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 31 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 277). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1023672/1/Doc.277ProjetoSaltus2.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

ZANATTA, J. A.; BORDRON, B.; HOLLER, W. A.; RACHWAL, M. F. G.; ROSSI, L. M. B.; HIGA, R. C. V. **Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2020. 27 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 342). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1125871/1/Livro-Doc-342-1804-final-2.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2025.

ZANATTA, J.; ALBA, F.; ROSSI, L. M. B.; HOLLER, W.; PAZ, J. M. M. A. Estoques de carbono da parte aérea de eucalipto no estado de Minas Gerais. In: EMBRAPA. **Redape**: repositório de dados de pesquisa da Embrapa. 2025a. DOI: <https://doi.org/10.48432/AB0ZBR>.

ZANATTA, J.; ALBA, F.; ROSSI, L. M. B.; HOLLER, W.; PAZ, J. M. M. A. Estoques de carbono no solo do Cerrado e em cultivos de eucalipto e pastagens em Minas Gerais. In: EMBRAPA. **Redape**: repositório de dados de pesquisa da Embrapa. 2025b. DOI: <https://doi.org/10.48432/LWKETW>.

ZANATTA, J.; ALBA, F.; ROSSI, L. M. B.; HOLLER, W.; PAZ, J. M. M. A. Base de dados de estoques de carbono de raízes de eucalipto e fator R. In: EMBRAPA. **Redape**: repositório de dados de pesquisa da Embrapa. 2025c. DOI: <https://doi.org/10.48432/T8USJ3>.

