

Colombo, PR / Outubro, 2025

Estratégia para fornecimento de bioenergia de florestas plantadas na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (Ride)

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



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

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

Documentos 404

Outubro, 2025

Estratégia para fornecimento de bioenergia de florestas plantadas na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (Ride)

*José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira
Alisson Moura Santos
Cristiane Aparecida Fioravante Reis
Sérgio Ricardo Silva*

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

Alisson Moura Santos

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

Estratégia para fornecimento de bioenergia de florestas plantadas na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (Ride). [recurso eletrônico] / José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas, 2025.

PDF (43 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-526X : e-ISSN 1980-3958 ; 404)

1. *Eucalyptus*. 2. *Corymbia*. 3. Produtividade florestal. 4. Floresta plantada. 5. Energia. 6. Viabilidade econômica. I. Moreira, J. M. M. A. P. II. Santos, A. M. III. Reis, C. A. F. IV. Silva, S. R. V. Série.

CDD (21. ed) 634.973766

Francisca Rasche (CRB-9/1204)

© 2025 Embrapa

Autores

José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira

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

Alisson Moura Santos

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

Cristiane Aparecida Fioravante Reis

Engenheira Florestal, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Sérgio Ricardo Silva

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Os autores agradecem à Empresa Ciplan Cimento Planalto S.A., pela cooperação técnica-financeira que possibilitou a execução deste trabalho, bem como a todas as associações, consultores, empresários e produtores que participaram do painel de custo de produção do Distrito Federal, das entrevistas, ao Cristiano Viana Franco, da Vale Vivo Florestal, e Abílio Rodrigues Pacheco, pela expressiva participação e contribuição no painel de custo de produção do estado de Goiás. A execução deste trabalho não seria possível sem a colaboração de todos.

Apresentação

O foco deste trabalho foi a comparação entre dois sistemas de produção de eucalipto para energia, na região do Distrito Federal e Entorno e o estado de Goiás. A comparação detalhada dos coeficientes técnicos e preços, principalmente dos fertilizantes e defensivos utilizados, permitiu sugerir ajustes no sistema de produção modal para o Distrito Federal e Entorno com maior probabilidade de se obter a produtividade almejada. O trabalho também detalha qual seria a área florestal necessária para abastecer uma demanda energética anual de 100 mil giga calorias com os dois sistemas de produção, em duas estratégias de aquisição de cavaco distintas para cada sistema, chegando aos custos finais por giga caloria ofertada pela biomassa florestal, e qual seria o preço equivalente do coque de petróleo para obter o mesmo custo energético. Este trabalho apresenta aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial aos ODS 7, 8, 12 e 15. Seus resultados contribuem para a gestão sustentável das florestas e para o aumento do uso das energias renováveis em setores industriais, promovendo, por meio do plantio de florestas de produção para energia, o desenvolvimento regional do Distrito Federal e Entorno, bem como do Estado de Goiás, contribuindo para a tomada de decisão sobre o aumento da oferta e consumo de energia renovável na região.

A expectativa da equipe responsável pela publicação é que estas informações possam contribuir para o desenvolvimento florestal e industrial da região do Distrito Federal e do estado de Goiás, auxiliando produtores, consumidores e formuladores de políticas públicas e setoriais na definição e implementação de estratégias que possam aumentar a competitividade desta cadeia produtiva, bem como aumentar a participação de combustíveis renováveis na indústria nacional, com redução das emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera.

Marcelo Francia Arco-Verde

Chefe-Geral interino da Embrapa Florestas

Sumário

Introdução	9
Caracterização dos locais de produção de eucalipto na Ride/DF	12
Sistemas de produção de eucalipto delineados para o Distrito Federal e Goiás	18
Ajustes no sistema de produção modal do DF	25
Área de floresta de eucalipto para atender à demanda de 100 mil giga calorias anuais de energia	33
Considerações finais	36
Referências	39

Introdução

A biomassa de espécies de eucaliptos desempenha um papel estratégico no setor energético brasileiro, sendo uma fonte renovável e amplamente disponível para a geração de energia térmica. A madeira de eucalipto é utilizada de forma intensiva em caldeiras e fornos industriais, nos quais sua queima eficiente contribui para a produção de vapor e calor em diversos processos produtivos (Miranda et al., 2017). Além disso, é largamente empregada em secadores de grãos em propriedades rurais, oferecendo uma alternativa sustentável e econômica aos combustíveis fósseis. A alta densidade energética, o rápido crescimento das florestas de eucalipto e a previsibilidade no abastecimento tornam essa biomassa uma opção viável para a matriz energética nacional (Cunha et al., 2021; Massuque et al., 2024). Destaca-se, ainda, a sua importância para a indústria de cimento que demanda grandes volumes de energia térmica e tem adotado progressivamente a biomassa como combustível alternativo, com vistas à redução de custos e emissões de carbono, em consonância com os princípios da bioeconomia circular (Kusuma et al., 2022).

Neste contexto, a indústria cimenteira tem enfrentado crescentes pressões para mitigar seu impacto ambiental, devido ao histórico de elevado consumo de combustíveis fósseis na geração de energia e às consequentes emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Chaves et al., 2021). Em escala global, estima-se que as emissões de GEE no processo de produção de cimento sejam compostas por três fontes: 50% provenientes da descarbonatação do calcário; 40% da queima de combustíveis fósseis, como coque de petróleo e carvão mineral; e 10% associadas ao transporte e ao consumo de energia elétrica nas unidades fabris (Carvalho et al., 2016).

Como alternativa, o carvão vegetal é uma fonte energética ambientalmente sustentável para o setor industrial. A publicação *Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono* (Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2012) destaca o carvão vegetal como uma fonte

de energia renovável com capacidade de suprir as demandas das indústrias de cimento, tanto em quantidade quanto em qualidade. A biomassa florestal, na forma de toretes ou cavacos, também é mencionada como uma opção viável, desde que sua utilização em larga escala seja logisticamente adequada. Em determinadas situações, a indústria pode adotar a estratégia de estabelecer plantações florestais próprias, em áreas próximas às unidades consumidoras.

Nas últimas décadas, diversas empresas industriais têm buscado firmar parcerias com produtores rurais por meio de programas de fomento florestal, promovendo a capacitação técnica em silvicultura e auxiliando na implantação e condução das florestas de eucalipto. Além disso, essas empresas fornecem acesso a serviços de colheita com escala e eficiência, e estabelecem contratos com preços mínimos da madeira, garantindo a continuidade da atividade mesmo em cenários adversos de mercado. Em contrapartida, as empresas são beneficiadas pela possibilidade de participar na seleção do material genético mais adequado às suas necessidades, coordenar o volume de produção colhido anualmente e planejar de forma mais eficiente a logística de transporte da madeira, considerando as escalas conjuntas da rede de fomentados.

O fomento florestal, além de garantir o fornecimento de matéria-prima com custos compatíveis, agrega valor ao negócio ao evitar a imobilização de capital na aquisição de terras – especialmente relevante diante dos altos preços praticados atualmente – e contribui para a melhoria da imagem corporativa das empresas, sobretudo por promover parcerias com pequenos e médios produtores rurais (Ribeiro; Miranda, 2009). Os mesmos autores afirmam que esses programas também apresentam externalidades positivas, como geração de emprego e renda, arrecadação de impostos e fixação da mão de obra no campo, ao mesmo tempo que reduzem a pressão sobre as florestas nativas e combustíveis fósseis, e contribuem para a desconcentração fundiária. Um programa de fomento bem estruturado, com respeito ao produtor rural, remuneração justa pela madeira e valorização dos aspectos sociais e ambientais da propriedade, é um importante instrumento de inclusão social e desenvolvimento regional. Para a

indústria, os benefícios incluem maior estabilidade na cadeia de suprimentos e mitigação de riscos associados à escassez e à volatilidade de preços da madeira no mercado.

A crescente valorização de práticas alinhadas aos princípios ambientais, sociais e de governança (*Environmental, Social and Governance – ESG*) reforça a necessidade de estruturar modelos produtivos mais sustentáveis para o setor industrial. Neste contexto, casos de sucesso de programas de fomento florestal no Brasil são relatados pela Revista Opiniões (2006), Ribeiro e Miranda (2009) e Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) (2024), confirmando a viabilidade dessa modalidade de parceria em diversas regiões do País.

A silvicultura com eucalipto tem se destacado no Brasil como principal fornecedora de madeira para diversos usos, como carvão vegetal, celulose e lenha (Indústria Brasileira de Árvores, 2024; IBGE, 2024). O eucalipto é a base dos programas de fomento florestal implementados em diversas localidades, tendo seu sucesso atribuído à ampla adaptação das espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* às condições edafoclimáticas brasileiras, ao rápido crescimento, à elevada produtividade, ao ciclo de curta rotação, à adequação da madeira aos diferentes usos e ao domínio técnico das práticas silviculturais (Gonçalves et al., 2013; Vale et al., 2013; Schumacher; Vieira, 2015; Oliveira; Pinto Júnior, 2021; Resende et al., 2022).

No Distrito Federal e em Goiás, os principais segmentos consumidores de madeira para fins energéticos estão ligados ao agronegócio e à indústria de transformação. A lenha, em suas diferentes formas – como “metrinho” ou cavacos – desempenha papel fundamental na secagem de grãos; no funcionamento de caldeiras de laticínios, frigoríficos, indústrias alimentícias e de bebidas; além de ser amplamente utilizada em fornos das indústrias ceramistas, de fosfato, de calcinação de níquel e, especialmente, nas cimenteiras (Reis et al., 2024).

Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo fornecer subsídios e indicadores técnico-econômicos da produção de eucalipto, com foco nos setores do agronegócio e da indústria de transformação – especialmente a indústria cimenteira – localizados na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e

Entorno (Ride/DF), com ênfase no DF e GO, a fim de apoiar a tomada de decisão quanto ao uso da biomassa florestal como uma fonte de energia renovável.

Caracterização dos locais de produção de eucalipto na Ride/DF

A Ride/DF é uma região integrada de desenvolvimento econômico, criada pela Lei Complementar n.º 94, de 19 de fevereiro de 1998, e regulamentada pelo Decreto n.º 7.469, de 04 de maio de 2011, para melhorar a articulação da ação administrativa da União, dos estados de Goiás, Minas Gerais e do Distrito Federal (Brasil, 2011).

Em termos de produção de madeira de eucalipto ao longo das duas últimas décadas, O DF praticamente não participou desta atividade econômica (Reis et al., 2024). No entanto, em função da demanda regional por madeira, os plantios florestais registrados em GO apresentaram avanços significativos em duas regiões, uma ao norte e outra ao sul do DF (Figuras 1 e 2), demonstrando potencial produtivo decorrente da qualidade das terras agrícolas e às condições climáticas (Reis et al., 2024).

A produção e a demanda de madeira de eucalipto em GO estão majoritariamente presentes no sul do DF, enquanto que a produção no norte está restrita a poucos municípios, com destaque para Niquelândia. Alguns dos maiores produtores de GO, como Catalão, Rio Verde, Ipameri e Campo Alegre de Goiás, encontram-se muito distantes dos grandes consumidores, cujo custo logístico pode inviabilizar o fornecimento de biomassa, particularmente para a indústria de cimento na região do DF. Entretanto, outros municípios como Luziânia, Abadiânia, Silvânia e Cristalina, que estão entre os dez maiores produtores de eucalipto de GO, se situam dentro de um raio aproximado de 150 km do DF. Nessas condições, o suprimento

de biomassa florestal apresenta custos competitivos, desde que os plantios sejam de alta produtividade e conduzidos com adequadas práticas silviculturais e eficientes sistemas de colheita e transporte da madeira.

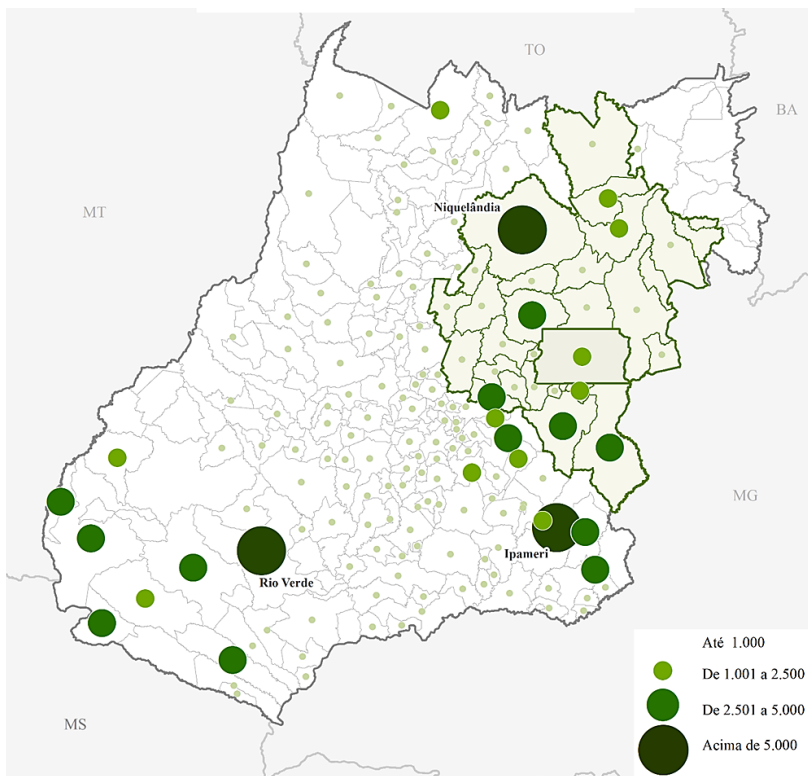


Figura 1. Distribuição espacial da área plantada com eucalipto no Distrito Federal e em Goiás, com destaque para os municípios que compõem a Região Integrada do Entorno do Distrito Federal (Ride/DF).

Fonte: IBGE (2024).

As terras goianas localizadas ao sul do DF apresentam maior aptidão agrícola, índices pluviométricos mais elevados e relevo mais

plano quando comparadas àquelas do norte do DF (Reis et al., 2015). Essas características conferem um alto potencial produtivo para os cultivos florestais, fator fundamental para obtenção de um menor custo médio de produção de madeira. Entretanto, essa região apresenta uma maior demanda para o estabelecimento de outras atividades agropecuárias, aumentando a competição pelo uso da terra e, conseqüentemente, elevando os custos de aquisição e arrendamento de propriedades rurais.

Por sua vez, as terras localizadas ao norte do DF possuem valores de aquisição e arrendamento mais baixos, contribuindo para a redução do custo médio da energia obtida a partir da biomassa dos plantios de eucalipto. Entretanto, essa vantagem é contrabalanceada pela menor produtividade florestal em comparação às terras localizadas ao sul do DF. Portanto, é preciso realizar um prognóstico mais amplo, considerando as condições edafoclimáticas, potencial produtivo, custos logísticos e demanda do mercado consumidor local por biomassa energética. Desta forma, o planejamento estratégico para o estabelecimento de um provável programa de fomento florestal requer um estudo minucioso caso a caso.

A região ao sul do DF apresenta maior demanda por biomassa florestal em comparação ao norte. Segundo Reis et al. (2024), ao sul do DF se concentram as cadeias produtivas de frango (corte e postura), pecuária leiteira, suinocultura e cultivo de grãos como soja, milho e trigo, além de mineradoras e indústrias de processamento de alimentos. Esses setores são demandantes de biomassa florestal para geração de energia, usada como substrato para sistemas pecuários, como cama de frango e *Compost Barn* para vacas leiteiras, compostagem de dejetos de suínos, dentre outros. Por outro lado, a demanda por biomassa no norte do DF contempla a pecuária de corte e a mineração, notadamente em Niquelândia e Barro Alto.

A menor demanda por madeira em uma determinada região geralmente atenua o preço, dependendo da oferta. Esse aspecto pode aumentar a competitividade do cultivo de eucalipto na região ao norte do DF, especialmente considerando cenários de aumento do consumo de biomassa para energia. Desta forma, vislumbra-se que um plano

de fomento florestal deve observar todas as áreas situadas dentro de uma determinada distância do DF, levando em consideração as vantagens e desvantagens específicas de cada região. Neste sentido, as áreas ao sul do DF se destacam pelo maior potencial produtivo, relevo mais favorável à silvicultura mecanizada e melhor infraestrutura logística; enquanto as áreas ao norte se destacam pelo menor custo de aquisição e arrendamento de terras, menor competição pela biomassa florestal e vantagens logísticas, dependendo da distância de transporte.

Quanto às formas de uso da terra na Ride/DF, elas podem ser visualizadas com auxílio dos mapas disponíveis na plataforma do Projeto MapBiomass (2024). De modo geral, se destacam as áreas ocupadas por pastagens, agricultura, florestas nativas, centros urbanos, corpos d'água, mosaicos de usos e silvicultura (Figura 2). Na Figura 3 estão destacadas as áreas ocupadas por pastagens e silvicultura.

Em termos de áreas territoriais da Ride/DF, os usos da terra estão distribuídos da seguinte forma (Projeto MapBiomass, 2024): florestas nativas ocupam 3.568.065 ha, perfazendo 46,4% da área estadual; pastagens correspondem a 2.232.199 ha (29%); agricultura contribui com 999.738 ha (13%); mosaico de usos equivalem a 520.843 ha (6,8%); áreas urbanas não vegetadas (urbanas) são 181.069 ha (2,4%); corpos d'água equivalem a 142.363 ha (1,8%) e silvicultura alcança 45.762 ha (0,6%). É interessante ressaltar que há muitas áreas que, atualmente, estão destinadas às pastagens e que se encontram em processo de degradação, apresentando elevado potencial para serem recuperadas por meio de plantações florestais em monocultivo ou em sistemas integrados com lavoura e, ou pecuária.

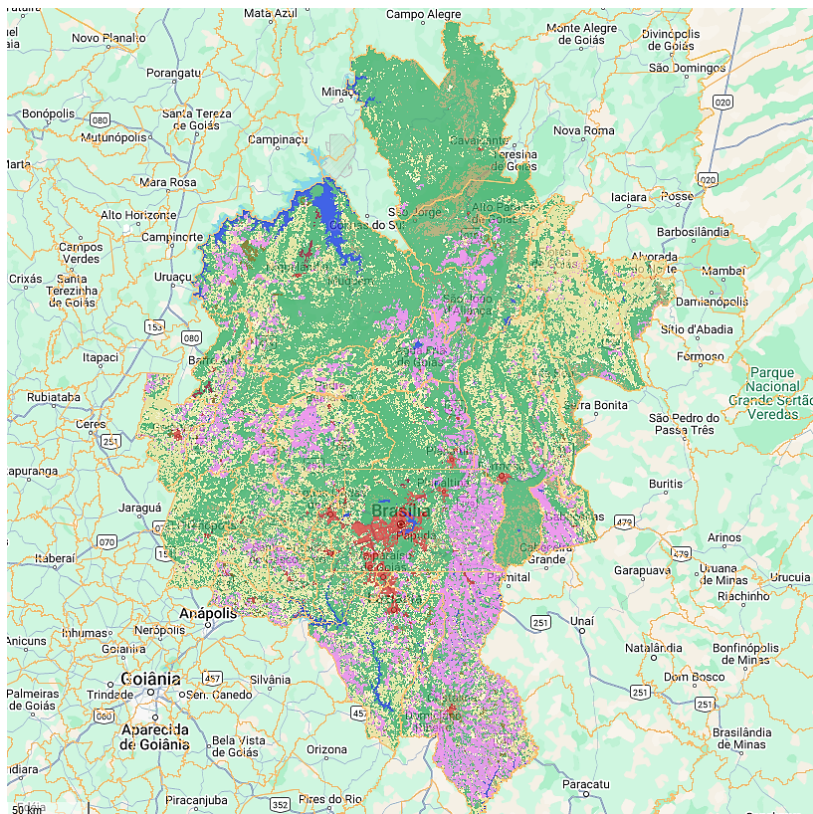


Figura 2. Formas de uso da terra para os municípios do Distrito Federal e de Goiás que compõem a Região Integrada do Entorno do Distrito Federal (Ride/DF).

Legenda: Área de pastagem (amarelo claro), agricultura (rosa), florestas nativas (verde escuro), centros urbanos (vermelho), corpo d'água (azul), mosaico de usos (amarelo escuro) e silvicultura (marrom claro).

Fonte: Projeto MapBiomass (2024)

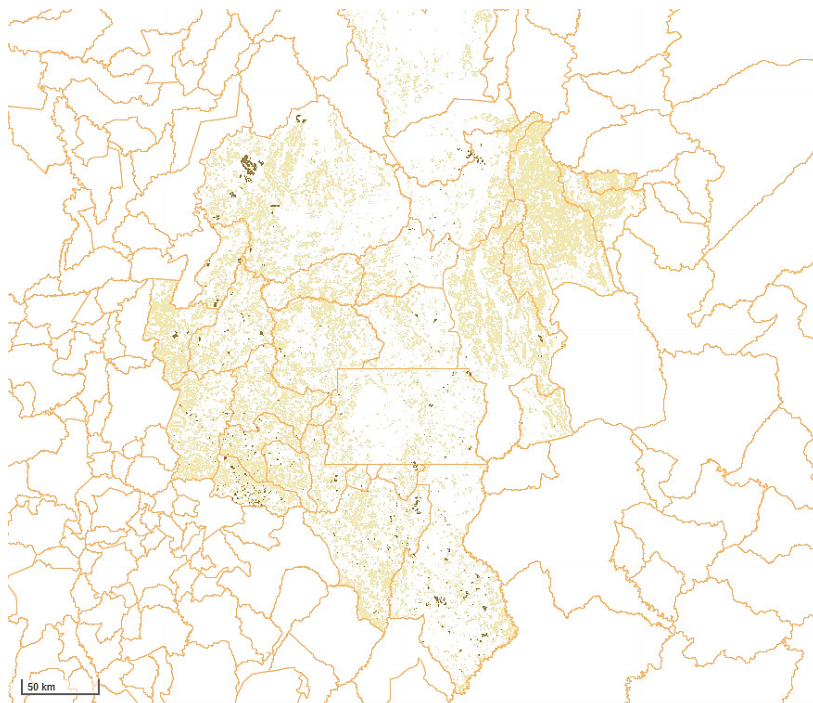


Figura 3. Distribuição espacial do uso da terra, com ênfase em pastagens e silvicultura, para os municípios do Distrito Federal e de Goiás que compõem a Região Integrada do Entorno do Distrito Federal (Ride/DF).

Legenda: pastagem (verde claro) e silvicultura (verde oliva).

Fonte: Projeto MapBiomass (2024).

Sistemas de produção de eucalipto delineados para o Distrito Federal e Goiás

Por meio da realização de dois painéis de especialistas, foram delineados dois sistemas de produção modais (SPMs) de eucalipto comumente utilizados na Ride/DF, sendo um SPM elaborado por produtores do DF e entorno (Moreira et al., 2025a), e outro por produtores de GO (Moreira et al., 2025b), principalmente nas regiões ao sul do DF.

O painel de especialistas é um instrumento de coleta de dados onde um sistema de produção mais comum para a região em estudo é elaborado em uma reunião com técnicos e produtores, permitindo agilidade na coleta e um elevado grau de conhecimento, já que o fluxo de caixa, com suas entradas e saídas, é definido em conjunto com os participantes, retratando a realidade da produção local, sendo que os participantes são corresponsáveis pelas informações levantadas (De Zen; Peres, 2002). Moreira et al. (2025a) detalham a realização do painel de especialistas do Distrito Federal e Moreira et al. (2025b) detalham o do estado de Goiás.

Os SPMs possuem muitas similaridades, viabilizando as análises conjuntas das informações obtidas nos painéis de especialistas. A seguir são destacadas as principais características dos SPM, assim como as premissas e os procedimentos utilizados nas análises, além de outras considerações para melhor interpretação dos resultados:

- Ambos utilizam considerável nível tecnológico, com aplicação de insumos e conhecimentos silviculturais, sendo mais elevado no SPM de Goiás;
- Ambos SPMs apresentam nível de produtividade de madeira esperada acima da média nacional [$> 33,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Indústria Brasileira de Árvores, 2024)]. Para ampliar a robustez das análises, foram simulados cenários com menores produtividades, permitindo avaliar a viabilidade econômica e auxiliar

na tomada de decisão frente às variações nos resultados de produtividade do eucalipto;

- Ambos os SPMs apresentam escala mecanizável para colheita, embora os custos operacionais sejam elevados devido ao deslocamento das máquinas. Esse fator pode ser reduzido caso sejam implantados talhões de eucalipto de maior escala, otimizando a logística de colheita;
- A umidade da madeira para comercialização de cavacos foi padronizada em 30%, na base úmida;
- Nos dois SPMs o principal foco produtivo foi a geração de biomassa energética a partir de cavacos de eucalipto. Entretanto, a consideração de outros produtos de maior valor agregado pode resultar em aumento da receita e consequentemente da remuneração, considerando a manutenção do custo de produção;
- Foi considerado o mesmo material genético clonal de eucalipto em ambos os SPMs, sendo os comumente plantados na região, como o VM 01 e o AEC 144, também conhecido como I144 (Moreira et al., 2025a, 2025b) com densidade básica média de 540 kg m⁻³.

As fórmulas utilizadas para o cálculo dos indicadores financeiros e aproveitamento energético, com suas respectivas fontes, podem ser encontradas nos trabalhos de Moreira et al. (2025a) para o SPM do Distrito Federal, e Moreira et al. (2025b) para o estado de Goiás. As principais diferenças entre os SPMs podem ser observadas na Tabela 1.

As quantidades de adubos e corretivos de solo, por hectare, nos SPMs do DF e GO, em diferentes anos e rotações, são apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3, respectivamente.

Tabela 1. Principais diferenças entre os sistemas de produção modais (SPM) do Distrito Federal e do Goiás.

SPM do Distrito Federal e entorno	SPM de Goiás
Floresta de eucalipto implantada e mantida pelos próprios produtores, que gerenciam a contratação dos serviços e a aquisição dos insumos utilizados.	Floresta de eucalipto implantada e mantida por empresa especializada contratada, que se responsabiliza pela realização dos serviços e aquisição de insumos.
Ciclo de produção de madeira com duas rotações de sete anos.	Ciclo de produção de madeira com duas rotações de seis anos.
Custo anual de arrendamento da terra de R\$ 1.000,00 por hectare	Custo anual de arrendamento da terra de R\$ 1.050,00 por hectare
Produtividade de madeira de eucalipto esperada de 400 m³ ha⁻¹ no primeiro corte (IMA de 57,14 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) e 340 m³ ha⁻¹ no segundo corte (IMA de 48,57 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), resultando em 740 m³ ha⁻¹ em 14 anos (IMA médio de 52,86 m³ ha⁻¹ ano⁻¹).	Produtividade de madeira de eucalipto esperada de 400 m³ ha⁻¹ no primeiro corte (IMA de 66,67 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) e 340 m³ ha⁻¹ no segundo corte (IMA de 56,67 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), resultando em 740 m³ ha⁻¹ em 12 anos (IMA médio de 61,67 m³ ha⁻¹ ano⁻¹).
O custo total estimado das operações silviculturais para o ciclo de 14 anos foi de R\$ 14,1 mil ha⁻¹, sendo 10 mil R\$ ha⁻¹ na primeira rotação e R\$ 4,1 mil ha⁻¹ na segunda rotação.	O custo total estimado das operações silviculturais para o ciclo de 12 anos foi de R\$ 25,2 mil ha⁻¹, sendo R\$15,8 mil ha⁻¹ na primeira rotação e R\$ 9,4 mil ha⁻¹ na segunda rotação.
No cenário com 100% da produtividade esperada para comercialização do metro cúbico de madeira em pé (IMA médio 52,86 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), o valor anual equivalente (VAE) foi de R\$1.543,80 ha⁻¹ ano⁻¹, a taxa interna de retorno (TIR) real de 15,62% e custo médio de produção (CMP) de R\$ 60,04 m³.	No cenário com 100% da produtividade esperada para comercialização do metro cúbico de madeira em pé (IMA médio 61,67 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), o VAE foi de 2.731,86 R\$ ha⁻¹ ano⁻¹, a TIR real de 18,29% e o CMP de R\$ 89,62m³.
A estratégia de adubação utiliza formulados do tipo NPK, além de superfosfato simples e cloreto de potássio (KCl). No entanto, não se realiza aplicação de calcário nem adubação fosfatada no início da segunda rotação.	A estratégia de adubação utiliza aplicação de calcário e adubação com formulados do tipo NPK em ambas as rotações.
Os combates às formigas são realizados de forma menos intensiva, com uso de 3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de isca formicida na implantação, 2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ na condução da rebrota e 1 kg ha⁻¹ ano⁻¹ como manutenção nas duas rotações.	Os combates às formigas são realizados de forma intensiva, com uso de 10 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de isca formicida na implantação e na condução da rebrota, 6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ nos dois anos seguintes e 3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ nos demais anos de manutenção nas duas rotações.
Utiliza aplicações de herbicidas pré-emergente (fordor) e pós-emergente (glifosato) para controle de matocompetição, com maior uso de glifosato.	Utiliza aplicações de herbicidas pré-emergentes (fordor e flumizyn) e pós-emergente (glifosato) para controle de matocompetição, com menor uso de glifosato e maior consumo de flumizyn.

Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2025a, 2025b)

Tabela 2. Especificações das quantidades de adubos e corretivos de solo utilizados em diferentes anos e rotações no sistema de produção modal do Distrito Federal (DF).

Rotação	Fertilizante (kg ha ⁻¹)	Ano 0	Ano 1
R1 ⁽¹⁾	Adubo MAP	1,00	
	Calcário	2.000,00	
	KCL 00-00-50 + B		300,00
	NPK 06-30-06 + Zn, Cu, B	280,00	
	NPK 20-00-20 + B	420,00	
	Superfosfato simples 00-18-00	350,00	
R2 ⁽²⁾	KCL 00-00-50 + B		300,00
	NPK 20-00-20 + B	170,00	

⁽¹⁾R1: rotação 1

⁽²⁾R2: rotação 2.

Tabela 3. Especificações das quantidades de adubos e corretivos de solo utilizados em diferentes anos e rotações no sistema de produção modal do Goiás.

Rotação	Fertilizante (kg ha ⁻¹)	Ano 0	Ano 1
R1 ⁽¹⁾	Adubo MAP	1,00	
	Calcário	2.000,00	
	NPK 06-30-06 + Zn, Cu, B	400,00	
	NPK 20-00-20 + B	200,00	300,00
R2 ⁽²⁾	Calcário	2.000,00	
	NPK 05-25-15	200,00	
	NPK 20-00-20 + B	300,00	

⁽¹⁾R1: rotação 1

⁽²⁾R2: rotação 2.

As aplicações de fertilizantes destacadas nas Tabelas 2 e 3 resultam nas seguintes quantidades totais de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e calcário aplicadas anualmente em cada rotação, nos SPMs (Tabela 4).

Tabela 4. Especificações das quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio e calcário aplicadas anualmente em cada rotação, nos sistemas de produção modais (SPM) do Distrito Federal e Goiás.

SPM	Rotação	Idade (anos)	Nitrogênio (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potássio (K ₂ O)	Calcário
			kg ha ⁻¹			
DF	Primeira	0	100,80	147,00	100,80	2.000,00
		1			150,00	
		Subtotal	100,80	147,00	250,80	2.000,00
	Segunda	0	34,00		34,00	
		1			150,00	
		Subtotal	34,00		184,00	
	Total		134,80	147,00	434,80	2.000,00
GO	Primeira	0	64,00	120,00	64,00	2.000,00
		1	60,00		60,00	
		Subtotal	124,00	120,00	124,00	2.000,00
	Segunda	0	70,00	50,00	90,00	2.000,00
		1				
		Subtotal	70,00	50,00	90,00	2.000,00
	Total		194,00	170,00	214,00	4.000,00

O SPM do DF utilizou uma menor quantidade dos macronutrientes N e P e de calcário, e maior adubação com K comparado ao SPM de GO. Percebe-se também no SPM do DF uma maior concentração das aplicações de nutrientes na primeira rotação, além de ausência de aplicação de calcário e P na segunda rotação. Por sua vez, o SPM de GO distribuiu a aplicação de nutrientes de forma mais uniforme entre as duas rotações, bem como entre os dois anos da primeira rotação.

As aplicações de defensivos agrícolas para o controle de formigas e matocompetição também foram distintas nos dois sistemas de

produção, sendo que o SPM do DF teve um maior consumo de herbicida pós-emergente (glifosato) para o controle de matocompetição. No SPM de GO, o uso de herbicidas pós-emergentes ocorreu em menor quantidade, ao passo que houve maior intensidade no controle de formigas cortadeiras, como forma de proteção do cultivo (Tabela 5).

Tabela 5. Comparação do uso de defensivos agrícolas, em diferentes anos e rotações, nos sistemas de produção modais do Distrito Federal e Goiás.

Painel – Rotação – Defensivo ⁽¹⁾ / Ano		0	1	2	3	4	5	6	7
DF – R1 ⁽²⁾	Cupinicida (kg)	0,07							
	Fordor (kg)	0,30							
	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Glifosato (l)	11,00	5,00						
DF – R2 ⁽³⁾	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Glifosato (l)	5,00	5,00						
GO – R1 ⁽²⁾	Cupinicida (kg)	0,10							
	Flumizyn (kg)	0,40	0,10						
	Fordor (kg)	0,40							
	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	10,00	6,00	6,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
	Glifosato (l)	5,00	5,00						
	Flumizyn (kg)	0,10							
GO – R2 ⁽³⁾	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	10,00	6,00	6,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
	Glifosato (l)	5,00							

⁽¹⁾ Os valores apontados são em unidades por hectare.

⁽²⁾ R1: rotação 1.

⁽³⁾ R2: rotação 2.

O estabelecimento da floresta de eucalipto pelos próprios produtores apresenta a vantagem de ter menor custo total, uma vez

que eles comprem os insumos agrícolas diretamente dos fornecedores e geralmente contratam apenas os serviços silviculturais da fase de implantação, utilizando mão de obra da própria propriedade nas atividades de manutenção florestal. A principal desvantagem é a variabilidade do nível de conhecimento técnico do produtor sobre as práticas silviculturais do eucalipto, limitando o alcance das metas de produtividade potencial de madeira e de custos mínimos desejados ao final do ciclo de produção, o que demanda assessoria de técnicos especializados.

A contratação de uma empresa especializada para implantar e conduzir a floresta de eucalipto geralmente aumenta o custo com aquisição de insumos, pois há bitributação, ou seja, a empresa repassa o valor dos insumos adquiridos dos fornecedores na nota fiscal dos serviços prestados. Além disso, há a remuneração pelo conhecimento técnico especializado da empresa. Entretanto, a empresa pode negociar preços menores dos insumos se houver maior escala de compra. Como vantagens da contratação da empresa especializada, o produtor tem maior garantia de obtenção da produtividade potencial de madeira, cuja condição pode ser estabelecida em contrato, e uma maior homogeneidade das florestas em diferentes ambientes.

A Tabela 6 apresenta um comparativo dos preços dos insumos utilizados nos dois sistemas de produção. Na maioria das vezes, os preços do SPM de GO foram menores, reforçando a vantagem de os próprios produtores rurais adquirirem os insumos diretamente dos fornecedores ou revendedores regionais. Pela variedade de insumos, ambos os SPMs investem consideravelmente em tecnologia, permitindo-lhes alcançar elevadas produtividades de madeira de eucalipto.

Tabela 6. Comparativo de preços dos insumos nos sistemas de produção modais do Distrito Federal e Goiás.

Tipo	Insumo	SPM DF (R\$)	SPM GO (R\$)
Defensivos	Cupinicida (R\$/kg)	800,00	
	Flumizyn (R\$/kg)		600,00
	Fordor (R\$/kg)	800,00	1.100,00
	Formicida granulado à base de sulfuramida (R\$/kg)	15,68	20,00
	Glifosato (R\$/l)	30,00	30,00
Fertilizantes	Adubo MAP (R\$/kg)	30,00	
	Calcário (R\$/t)	200,00	300,00
	NPK 05-25-15 (R\$/kg)	2,40	3,20
	NPK 06-30-06 + Zn, Cu, B (R\$/kg)	2,80	3,50
	NPK 20-00-20 + B (R\$/kg)	2,40	3,20
Mudas	Mudas (R\$/unidade)	1,50	1,50

Ajustes no sistema de produção modal do DF

Com o objetivo de aumentar a possibilidade de obtenção de boas produtividades de madeira de eucalipto, foi feito um ajuste na estratégia de adubação no SPM do DF. Esse ajuste buscou aprimorar a distribuição de nutrientes ao longo do tempo, em especial entre as rotações, semelhante àquela utilizada no SPM de GO, bem como uma intensificação das operações de combate às formigas. A nova estratégia adotou as seguintes premissas:

- As doses de N, P e K no ciclo seriam maiores que 160, 190 e 215 kg ha⁻¹, respectivamente;
- O fertilizante NPK 05-25-15 foi introduzido no SPM do DF como fonte de adubo fosfatado, com o custo de R\$ 2,40 por quilograma, que foi estimado com base no valor do

NPK 20-00-20 no SPM de GO, respeitando as proporções de preços;

- c) Os adubos foram alterados buscando atingir as doses de nutrientes descritas no item a) e minimizando o custo de aquisição de adubos. Como resultado, na primeira rotação, a dosagem de NPK 06-30-06 utilizada na adubação de base foi reduzida para $110,00 \text{ kg ha}^{-1}$; foram definidas duas aplicações de NPK 05-25-15, uma na implantação (Ano 0) e outra com um ano de idade (Ano 1), na dosagem de 175 kg ha^{-1} cada aplicação; e duas aplicações de NPK 20-00-20, sendo 130 kg ha^{-1} na implantação e 200 kg ha^{-1} no Ano 1. Para a segunda rotação, foi adicionada uma calagem de 2.000 kg ha^{-1} no Ano 0 (rebrotas); uma aplicação de NPK 05-25-15 de 280 kg ha^{-1} no Ano 0; e duas aplicações de NPK 20-00-20, sendo 110 kg ha^{-1} no Ano 0 e 170 kg ha^{-1} no Ano 1. Essas operações adicionais e modificações das dosagens dos adubos foram inseridas buscando-se equilibrar a oferta e a demanda de nutrientes para a floresta de eucalipto durante o ciclo de crescimento;
- d) Os ajustes citados resultaram em uma redução do custo total com fertilizantes de R\$ 4.515,00 por hectare para R\$ 4.084,00 por hectare, correspondendo a uma economia de 9,5%. Entretanto, o custo total com fertilização, incluindo as operações mecanizadas, mão de obra e consumo de óleo diesel aumentou de R\$ 6.588,70 por hectare para R\$ 7.071,50 por hectare, refletindo um acréscimo de 6,8%, devido às operações adicionais para melhor distribuição e aproveitamento dos fertilizantes no ciclo de produção;
- e) As operações de combate às formigas foram ajustadas para 5 kg ha^{-1} de iscas formicidas no ano inicial, 3 kg ha^{-1} nos anos 1 e 2, e 2 kg ha^{-1} nos anos subsequentes, para ambas as rotações;
- f) O rendimento das operações de combate às formigas passou de 0,30 diárias por hectare (isto é, três trabalhadores

realizam o combate em dez hectares em um dia) para 0,5 diária por hectare (cinco trabalhadores realizam o combate em dez hectares em um dia) nas fases de pré-plantio e pós-colheita; e de 0,15 diária por hectare para 0,25 diária por hectare nos demais combates, visando maiores eficácias nas operações;

- g) O custo total de combate às formigas foi elevado de R\$ 810,92 por hectare para R\$ 1.558,56 por hectare, ao longo do ciclo de produção. O maior aumento ocorreu no custo de iscas formicidas (de R\$ 297,92 para R\$ 658,56 por hectare), seguido pelo custo com a mão de obra (de R\$ 513,00 para R\$ 900,00 por hectare).

Deve-se ressaltar que, com estes ajustes nas adubações e nos combates às formigas cortadeiras, o SPM do DF apresenta maior possibilidade de alcançar os elevados níveis de produtividade de madeira de eucalipto descritos no painel, sendo esperados cenários de produtividade de 90% (P090) até 100% (P100) daquela descrita no painel, para o DF.

Na Tabela 7 podem ser observados os indicadores de viabilidade econômica do SPM ajustado para o DF, com 100% da produtividade esperada de madeira de eucalipto (IMA médio de $52,86 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). É possível observar que, mesmo com os ajustes, esse SPM ainda é viável economicamente, remunerando todos os fatores de produção. O SPM ajustado do DF pode aumentar a remuneração do empreendedor rural em R\$ 13.768,85 por hectare, considerando o valor presente líquido (VPL) após o ciclo de produção de 14 anos, com a comercialização da madeira em metro cúbico em pé, com valor anual equivalente (VAE) de R\$1.481,32 por hectare, resultando em uma taxa interna de retorno (TIR) de 15,62% ao ano, relação benefício custo (RBC) de R\$ 1,49 para cada R\$ 1,00 investido e um custo médio de produção (CMP) de R\$ 61,70 por metro cúbico. Salienta-se que, mesmo em um cenário com uma produtividade de 90% da esperada (IMA médio de $47,57 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), o SPM ajustado é economicamente viável, com um VPL de R\$ 10.230,39 por hectare, VAE

de R\$ 1.100,64 por hectare, TIR de 13,55% ao ano, RBC de R\$ 1,37 para cada R\$ 1,00 investido e um CMP de R\$ 68,55 por metro cúbico.

O SPM delineado no painel original para o mesmo cenário de comercialização apresentou um VPL de R\$ 14.349,58 por hectare, com uma produtividade esperada de 100% (P100) (Moreira et al., 2025a). No entanto, os elevados riscos de não alcance da produtividade esperada podem impactar significativamente o SPM. Nos cenários com 90%, 80% e 70% da produtividade (P090, P080, P070), o VPL do sistema original é reduzido para, respectivamente, R\$ 10.811,12, R\$ 7.272,66 e R\$ 3.734,20 por hectare, ou seja, o ajuste do SPM do DF pode proporcionar uma maior rentabilidade ao produtor ao reduzir o risco e proporcionar uma maior probabilidade de obtenção de elevadas produtividades de madeira. Neste contexto, o resultado do sistema ajustado com 90% da produtividade já é superior ao sistema original com 80%.

Destaca-se a relevância da implementação de atualizações e aprimoramentos contínuos dos procedimentos técnico-operacionais, seja em razão da evolução das práticas de manejo, seja pela disponibilidade e novos insumos e defensivos agrícolas. Essas são medidas importantes para a mitigação de riscos e maximização da eficiência operacional, contribuindo diretamente para a competitividade do sistema de produção.

Para destacar as principais modificações implementadas no SPM ajustado para o DF e realizar a sua comparação com o SPM de GO, foram elaboradas tabelas detalhando a fertilização aplicada no SPM ajustado do DF (Tabela 8) e as quantidades ajustadas dos macronutrientes N, P e K, e também de calcário (Tabela 9).

Tabela 7. Indicadores de viabilidade econômica do sistema de produção modal ajustado (SPM) para o Distrito Federal, em diferentes cenários de comercialização.

Indicadores st de madeira		Árvore em pé			Cavaco na borda do talhão	Cavaco no cliente
		st de madeira	m ³ de madeira	t de madeira	t de cavaco	t de cavaco
Com rem. terra ⁽¹⁾	VAE ⁽³⁾ (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	1.470	1.481	1.483	1.463	2.651
	TIR ⁽⁴⁾ (% a.a.)	15,6	15,6	15,6	15,7	21,1
	VPL ⁽⁵⁾ (R\$ ha ⁻¹)	13.668	13.769	13.789	13.602	24.645
	RBC ⁽⁶⁾	1,48	1,49	1,49	1,19	1,24
	CMP ⁽⁷⁾ (R\$ unid ⁻¹)	42,88	61,70	79,98	219,67	308,81
Sem rem. terra ⁽²⁾	VAE ⁽³⁾ (R\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	2.470	2.481	2.483	2.463	3.651
	VPL ⁽⁵⁾ (R\$ ha ⁻¹)	22.963	23.064	23.084	22.897	33.940
	VET ⁽⁸⁾ (R\$ ha ⁻¹)	41.174	41.355	41.391	41.057	60.857

⁽¹⁾ Com rem. terra: Indicadores que consideram a remuneração da terra.

⁽²⁾ Sem rem. terra: Indicadores que não consideram a remuneração da terra.

⁽³⁾ VAE: valor anual equivalente.

⁽⁴⁾ TIR: taxa interna de retorno.

⁽⁵⁾ VPL: valor presente líquido.

⁽⁶⁾ RBC: relação custo/benefício.

⁽⁷⁾ CMP: custo médio de produção.

⁽⁸⁾ VET: valor esperado da terra.

Tabela 8. Recomendação de aplicação de fertilizantes no sistema de produção modal (SPM) ajustado para o Distrito Federal.

Rotação	Fertilizante (kg ha ⁻¹)	Ano 0 (kg ha ⁻¹)	Ano 1 (kg ha ⁻¹)
R1 ⁽¹⁾	Adubo MAP	1,00	
	Calcário	2.000,00	
	NPK 05-25-15	175,00	175,00
	NPK 06-30-06 + Zn, Cu, B	110,00	
	NPK 20-00-20 + B	130,00	200,00
R2 ⁽²⁾	Calcário	2.000,00	
	NPK 05-25-15	280,00	
	NPK 20-00-20 + B	110,00	170,00

⁽¹⁾R1: rotação 1

⁽²⁾R2: rotação 2.

Com a reconfiguração da adubação no SPM ajustado do DF, percebe-se que a quantidade de nutrientes ficou muito semelhante ao do SPM de GO (Tabela 9). O SPM do DF ajustado teve uma melhor distribuição dos nutrientes nos dois primeiros anos da cultura e entre as rotações, possibilitando um melhor aproveitamento dos nutrientes ao longo do ciclo, o que contribui para a obtenção de uma boa produtividade de madeira de eucalipto.

Na Tabela 10 são apresentadas as quantidades aplicadas de defensivos agrícolas para realizar o controle de formigas e matocompetição, tanto no sistema de produção modal de Goiás como do sistema de produção ajustado para o Distrito Federal. A quantidade de iscas formicidas nos sistemas ajustados do DF foi aumentada em relação ao SPM original, para melhorar a proteção do plantio e aumentar a probabilidade do produtor obter a produtividade esperada mencionada no painel de especialistas.

Tabela 9. Comparativo das quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio e calcário utilizados nos sistemas de produção de Goiás e Distrito Federal após o ajuste do sistema de produção modal (SPM) do DF.

Painel	Rotação	Ano	Nutriente (kg ha ⁻¹)			
			Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Calcário
DF	R1 ⁽¹⁾	0	41,35	76,75	58,85	2.000,00
		1	48,75	43,75	66,25	
	R2 ⁽²⁾	0	36,00	70,00	64,00	2.000,00
		1	34,00		34,00	
GO	R1 ⁽¹⁾	0	64,00	120,00	64,00	2.000,00
		1	60,00		60,00	
	R2 ⁽²⁾	0	70,00	50,00	90,00	2.000,00

⁽¹⁾R1: rotação 1

⁽²⁾R2: rotação 2.

É importante destacar que os defensivos agroquímicos mencionados neste documento foram exatamente aqueles citados pelos especialistas participantes dos Painéis, mas que não constituem em recomendação de preferência, e que o produtor possui plena liberdade para optar pelas marcas dos produtos que julgar mais convenientes e adequados às suas necessidades e, ou condições específicas, desde que estejam em conformidade com a legislação brasileira, e em doses recomendadas para a cultura, conforme diretrizes estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa). Tais cuidados são necessários para garantir a eficácia do manejo e a preservação ambiental.

Tabela 10. Comparativo da aplicação de defensivos nos dois sistemas de produção modal (SPM) do Distrito Federal e Goiás, após o ajuste do sistema de produção do DF.

Painel – Rotação – Defensivo ⁽¹⁾		Ano							
		0	1	2	3	4	5	6	7
DF – R1 ⁽²⁾	Cupinicida (kg)	0,07							
	Fordor (kg)	0,30							
	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	5,00	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Glifosato (l)	11,00	5,00						
DF – R2 ⁽³⁾	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	5,00	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Glifosato (l)	5,00	5,00						
GO – R1 ⁽²⁾	Cupinicida (kg)	0,10							
	Flumizyn (kg)	0,40	0,10						
	Fordor (kg)	0,40							
	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	10,00	6,00	6,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
	Glifosato (l)	5,00	5,00						
GO – R2 ⁽³⁾	Flumizyn (kg)	0,10							
	Formicida granulado à base de sulfuramida (kg)	10,00	6,00	6,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
	Glifosato (l)	5,00							

⁽¹⁾ Os valores estão em unidades por hectare.

⁽²⁾ R1: rotação 1

⁽³⁾ R2: rotação 2.

Área de floresta de eucalipto para atender à demanda de 100 mil giga calorias anuais de energia

Com o objetivo de comparação de dois SPMs em uma mesma escala de demanda energética, foi estabelecido um valor arbitrário de 100 mil giga calorias anuais como meta a ser atingida, sendo comparadas: as áreas necessárias de plantações de eucalipto; os números de talhões em ordenamento perfeito¹; as áreas de cada talhão; as quantidades de insumos necessários para a produção das florestas após o estabelecimento do ordenamento perfeito; e os custos de aquisição de energia entre os dois SPMs (Tabela 11).

Tabela 11. Área necessária, características energéticas e de produtividade (IMA) das florestas para produção de madeira que atenda à demanda de 100 mil giga calorias por ano, no Distrito Federal e em Goiás.

Variável	SPM - DF	SPM - GO
Demanda por energia (Gcal ano ⁻¹)	100.000,00	100.000,00
Poder Calorífico Livre por Volume ao Teor de Umidade (Gcal m ⁻³)	2,17	2,17
Demanda por madeira (m ³ ano ⁻¹)	46.079,07	46.079,07
Produtividade média (IMA) do ciclo (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	52,86	61,65
Produtividade média (IMA) do ciclo (GCal ha ⁻¹ ano ⁻¹)	114,71	133,79
Duração do ciclo (anos)	14,00	12,00
Área florestal total em ordenamento (hectares)	871,77	747,43
Área do talhão modal ordenado (hectares)	62,27	62,29

¹ Floresta completamente regulada = *Fully regulated forest* (Clutter et al., 1983): consiste em uma floresta manejada em ciclos de produção de n anos, onde a mesma é dividida em n talhões, cada um em uma idade distinta e com a mesma produtividade na idade de colheita, de forma que a floresta tenha condições de manter uma produção anual constante de madeira ao longo do tempo.

Devido à maior produtividade de madeira (i.e., maior incremento médio anual, IMA) do SPM de GO, a área necessária de plantio de eucalipto para atender a mesma demanda energética é menor que a área do SPM ajustado para o DF (Tabela 11). Embora os tamanhos dos talhões modais sejam semelhantes, o DF necessita de 14 talhões (SPM com ciclo de 14 anos) e GO apenas 12. Cada talhão estará em uma distinta idade no ciclo de produção, de forma que haverá anualmente um talhão em implantação, um talhão em condução de rebrota, um talhão em colheita da primeira rotação e outro da segunda rotação, de modo a obter a mesma produção anual de madeira, ao longo do tempo.

As quantidades anuais de insumos a serem utilizadas no plantio perfeitamente ordenado para atender à demanda de 100 mil Gcal ano⁻¹ estão apresentadas na Tabela 12. Observa-se um maior uso de iscas formicidas no SPM de GO e um maior uso de glifosato no SPM do DF. As quantidades de adubos aplicados são variáveis em razão das diferentes quantidades de nutrientes em cada formulação devido às diferenças estratégicas com relação à adubação.

Os custos unitários e o volume de madeira para atender à demanda de 100 mil Gcal ano⁻¹ nos dois sistemas modais de produção estão discriminados na Tabela 13.

Duas estratégias foram consideradas para calcular o custo final de aquisição de madeira, na forma de cavacos, pelo consumidor:

1) Compra da madeira obtida da árvore em pé, por metro cúbico, e a contratação dos serviços de colheita, transporte e processo de produção de cavacos por parte da indústria consumidora, sendo o pagamento efetuado por tonelada de cavacos;

2) Compra dos cavacos, a preço de mercado, considerando a entrega na indústria consumidora realizada por conta do fornecedor (*cost, insurance and freight* - CIF).

Ao considerar o pressuposto que a indústria consumidora consiga contratar os serviços de colheita e transporte pelos mesmos valores praticados pelos produtores, sem ganhos de escala ou custos adicionais de transação, a estratégia de compra da madeira obtida da árvore em pé e contratação da colheita e transporte permitiria ao

consumidor obter uma economia de 18,9% no custo da madeira no SPM do DF, e de 16,4% no SPM do GO (Tabela 14).

Tabela 12. Demandas anuais de insumos para atender à demanda de 100 mil Gcal ano⁻¹ por meio de florestas de eucalipto estabelecidas nos sistemas de produção modais (SPMs) do Distrito Federal e em Goiás.

Grupo	Fator de produção	Unidade	Demanda	
			DF	GO
Defensivos	Cupinicida	kg	4,67	6,23
	Flumizyn	kg		37,37
	Fordor	kg	18,68	24,91
	Formicida granulado a base de sulfuramida	kg	2.615,30	4.235,44
	Glifosato	l	1.618,99	934,29
Fertilizantes	Adubo MAP	kg	62,27	62,29
	Calcário	t	249,08	249,14
	NPK 05-25-15	kg	39.229,48	12.457,17
	NPK 06-30-06 + Zn, Cu, B	kg	6.849,59	24.914,34
	NPK 20-00-20 + B	kg	37.984,10	49.828,67
Mudas	Mudas	unidade	78.281,00	80.971,00
Água	Água	l	82.444,17	377.140,78

Valores para uma floresta plantada em ordenamento perfeito.

Tabela 13. Preços, custos e volumes utilizados para o cálculo do custo anual de obtenção de madeira, na forma de cavacos, no Distrito Federal e em Goiás.

Painel	Preço da madeira da árvore em pé	Preço CIF ⁽¹⁾	Custo de colheita	Custo de transporte	Volume anual	Volume anual
	(R\$ m ⁻³)		(R\$ t ⁻¹)		(m ³)	(t)
DF	101,00	400,00	118,22	75,00	46.079,07	35.546,71
GO	150,00	490,00	120,00	95,00	46.079,07	35.546,71

⁽¹⁾ CIF é a sigla para “*cost, insurance and freight*”, que significa custo, seguro e frete por conta do fornecedor. Cavaco CIF com teor de umidade de 30% base úmida.

Tabela 14. Custos anuais e unitários de aquisições da madeira na forma de cavacos, para atender à demanda energética de 100 mil Gcal ano⁻¹, de acordo com as estratégias utilizadas no Distrito Federal e em Goiás.

Painel	Estratégia de aquisição do cavaco	Custo anual (R\$)	Custo unitário (R\$ Gcal ⁻¹)
DF	Comprando a madeira da árvore em pé e contratando a colheita e o transporte	11.522.186,20	115,22
	Comprando cavaco CIF	14.218.683,35	142,19
GO	Comprando a madeira da árvore em pé e contratando a colheita e o transporte	14.554.402,26	145,54
	Comprando cavaco CIF	17.417.887,10	174,18

Nos cenários analisados, os custos da madeira na forma de cavacos para atender à demanda energética de 100 mil Gcal variam de R\$ 115,22 a R\$ 174,19 por giga caloria a ser produzida. Como o coque de petróleo tem um rendimento energético de 8,73 Gcal t⁻¹ (Empresa de Pesquisa Energética, 2022), tais custos equivalem ao preço variando de R\$ 971,30 a R\$ 1.520,59 por tonelada de coque de petróleo entregue na indústria, para um mesmo rendimento energético. Além disso, a biomassa florestal apresenta vantagens ambientais, especialmente relacionadas à redução da pegada de carbono para a indústria.

Considerações finais

As análises dos SPMs do DF e de GO evidenciam as boas condições para uso da madeira como uma fonte de energia renovável para a indústria cimenteira na Ride. Entretanto, é necessário considerar fatores importantes como a produtividade média de madeira dos plantios, os custos de produção e colheita, a logística de transporte da madeira, além dos modelos de parceria entre produtores e consumidores industriais.

Os SPMs revelaram diferenças importantes em termos de produtividade de madeira, custos operacionais e tipo de manejo adotado.

No DF, a produtividade esperada é $740 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em um ciclo de 14 anos com duas rotações. Em GO, a produtividade é a mesma, porém esta ocorre em um ciclo de produção menor de 12 anos, também com duas rotações, resultando em um maior IMA médio (16,67%) que, juntamente com os melhores preços pagos ao produtor, obteve um melhor retorno financeiro (96% a mais no VAE com terra para comercialização do metro estéreo de madeira da árvore em pé).

Os custos dos procedimentos técnico-operacionais também variaram entre os SPMs. No DF, o custo total da produção silvicultural em 14 anos é R\$ 14,1 mil por hectare (duas rotações), enquanto que, em GO, o custo aumenta para R\$ 25,2 mil por hectare, em um ciclo de 12 anos (duas rotações). Essa diferença está associada ao manejo adotado em GO, sobretudo relacionado a uma adubação mais equilibrada entre as rotações e um controle mais intensivo de formigas cortadeiras. Mesmo com os custos operacionais mais elevados em GO, o seu retorno financeiro é maior, justamente pela maior produtividade estimada de madeira, associada com o maior preço recebido pelo produtor.

Dessa maneira, como forma de aumentar a competitividade da produção florestal no DF, foi proposto um ajuste em seu SPM. As principais alterações envolveram aprimoramento na adubação e no controle de formigas cortadeiras. Buscou-se uma melhor distribuição de nutrientes ao longo do ciclo produtivo, sobretudo entre as rotações, além de intensificar os combates às formigas. Apesar do impacto financeiro nas mudanças sugeridas, a sua implementação promove uma redução nos riscos de perda de produtividade de madeira e, evidentemente, aproxima os coeficientes técnicos do SPM do DF daqueles do SPM goiano, promovendo maior competitividade no contexto produtivo regional.

Adicionalmente, uma estratégia que se mostra interessante para melhor otimização dos custos é a compra da madeira em pé e a contratação direta dos serviços de colheita, transporte e produção de cavacos por conta do consumidor. Isso possibilita uma melhor negociação em razão da escala e, consequentemente, um menor custo unitário da biomassa. Nesse contexto, é importante levar em

consideração os aspectos relacionados à logística. Polos produtivos situados em menores distâncias das unidades consumidoras se tornam mais atrativos, justamente por reduzir significativamente os custos de transporte, promovendo maior viabilidade da biomassa de eucalipto.

Os custos considerados nos SPMs resultaram em custos de energia renovável entre R\$ 115,00 e R\$ 175,00 por giga caloria. Esses valores são bastante competitivos quando comparados ao coque de petróleo, que gera aproximadamente 8,7 gigacaloria por tonelada e cujos custos oscilam entre R\$ 970,00 e R\$ 1.520,00 por tonelada, resultando em um custo de energia entre R\$ 111,49 e R\$ 174,71 reais por gigacaloria. Além do aspecto econômico, a biomassa de eucalipto se destaca como uma alternativa sustentável, contribuindo para melhorar a pegada de carbono na indústria cimenteira, um fator cada vez mais valorizado no atual cenário de transição energética.

A implementação de um planejamento estratégico para o estabelecimento de programas de fomento florestal, aliada aos investimentos em infraestrutura logística e inovação tecnológica, é fundamental para consolidar o uso da madeira como fonte de biomassa energética. O estabelecimento de parcerias entre as indústrias e os produtores rurais pode gerar benefícios econômicos e ambientais, além de favorecer a inclusão de pequenos e médios produtores na cadeia produtiva. Assim, a integração de práticas alinhadas aos princípios ESG (*Environmental, Social and Governance*) representa uma oportunidade para fortalecimento da competitividade e sustentabilidade do setor industrial cimentício.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL.

Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://www.abdi.com.br>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Decreto nº 7.469, de 4 de maio de 2011. Regulamenta a Lei Complementar nº 94, de 19 de fevereiro de 1998, que autoriza o Poder Executivo a criar a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno - RIDE e instituir o Programa Especial de Desenvolvimento do Entorno do Distrito Federal.

Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 85, s. 1, p. 4-5, 5 maio 2011. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=05/05/2011&jornal=1&pagina=4&totalArquivos=136>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CARVALHO, P. S. L. de; MESQUITA, P. P. D.; MELO, L. P. D. **Panoramas setoriais: mudanças climáticas.** Rio de Janeiro: BNDES, 2016. 71 p.

Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7158/2/Panoramas%20setoriais_mudan%c3%a7as%20clim%c3%a1ticas_2016_P_BD.pdf. Acesso: 14 mar. 2025.

CHAVES, G. de L. D.; SIMAN, R. R.; RIBEIRO, G. M.; CHANG, N. B. Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: a case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 288, e112401, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112401>.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENNAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach.** New York: Wiley, 1983. 333 p.

CUNHA, T. Q. G.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETTE JUNIOR, C. R. *Eucalyptus* expansion in Brazil: energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, 105900, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>.

DE ZEN, S.; PERES, F. C. Painel agrícola como instrumento de comunicação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 40, Passo Fundo, 2002. **Anais** [...]. Brasília, DF: SOBER, 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco energético nacional**: manual metodológico. Brasília: DF, 2022. 93 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-578/BEN%20_%20Manual%202022.pdf. Acesso: 14 mar. 2025.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual**. Brasília, DF, 2024. 98 p. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2025.

IBGE. **Sistema de Recuperação Automática 2024**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>. Acesso: 27 mar. 2025.

KUSUMA, R. T.; HIREMATH, R. B.; RAJESH, P.; KUMAR, B.; RENUKAPPA, S. Sustainable transition towards biomass-based cement industry: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, 112503, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112503>.

MASSUQUE, J.; MANJATE, M. J.; dos SANTOS, E. V.; MATAVEL, C. E.; PROTÁSIO, T. de P.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Combustion and energy performance of non-commercial *Corymbia* and *Eucalyptus* wood for use in cogeneration systems in Brazil. **Energy** **360**, v. 1, 100004, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.100004>.

MIRANDA, M. A. da S.; RIBEIRO, G. B. de D.; VALVERDE, S. R.; ISBAEX, C. *Eucalyptus* sp. woodchip potential for industrial thermal energy production. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, e410604, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000600004>.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; REIS, C. A. F.; SANTOS, A. M. **Análise da viabilidade econômica da produção de eucalipto para energia no Distrito Federal e Entorno**. Colombo: Embrapa Florestas, 2025a. 51 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 401). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1177619/1/EmbrapaFlorestas-2025-Documentos401.pdf>.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; SANTOS, A. M.; REIS, C. A. F. **Análise da viabilidade econômica da produção de eucalipto para energia no estado de Goiás**. Colombo: Embrapa Florestas, 2025b. 56 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 402). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1177499/1/EmbrapaFlorestas-2025-Documentos402.pdf>.

OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 1160 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1131510/1/Livro-Eucalipto.pdf>. Acesso: 14 mar. 2025.

PROJETO MAPBIOMAS. Coleção 9 da Série Annual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2024.
DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/XXUKA8>.

REIS, C. A. F.; MORAES, A. da C.; PEREIRA, A. V.; AGUIAR, A. V. de; SOUSA, V. A. de; BORGES, H. M. D. **Diagnóstico do setor de florestas plantadas no Estado de Goiás**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 139 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138630/1/Diagnostico-do-Sector-de-Florestas-Plantadas.pdf>. Acesso: 14 mar. 2025.

REIS, C. A. F.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; SANTOS, A. M.; MORAES, A. da C. **Diagnóstico da produção de eucalipto no Distrito Federal e em Goiás**. Colombo: Embrapa Florestas, 2024. 62 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 398). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169661/1/EmbrapaFlorestas-2024-Documentos398.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.

RESENDE, R. T.; BORÉM, A.; LEITE, H. G. **Eucalipto: do plantio à colheita**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. 286 p.

REVISTA OPINIÕES. **Sobre o fomento florestal**, jun-ago. 2006. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/leitura/online/o-fomento-florestal-brasileiro/>. Acesso: 14 mar. 2025.

RIBEIRO, A. B.; MIRANDA, G. de M. Estudo descritivo de programas de fomento em empresas florestais. **Revista Ambiência**, v. 5. n.1, p. 49-66, 2009. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/228/295>. Acesso: 14 mar. 2025.

SCHUMACHER, M. V.; VIEIRA, M. (ed.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Santa Maria, RS: Editora UFSM, 2015. 307 p.

VALE, A. B. do; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. de P. (ed.). **Eucaliptocultura no Brasil**: silvicultura, manejo e ambiência. Viçosa, MG: SIF, 2013. 551 p.

