

Publicação da Secretaria de Política Agrícola
do Ministério da Agricultura e Pecuária,
editada pela Embrapa

e-ISSN 2317-224X
ISSN 1413-4969
Página da revista: www.embrapa.br/rpa

Luis Eduardo Pacifici Rangel 
Ministério da Agricultura e Pecuária,
Brasília, DF, Brasil
E-mail: luiseduardorangel76@gmail.com
 Autor correspondente

Tarik Tanure 
Universidade Estadual de Campinas, Núcleo Interdisciplinar
de Planejamento Energético,
Campinas, SP, Brasil
E-mail: tariktanure@gmail.com

Marcelo Fernandes Guimarães 
Ministério da Agricultura e Pecuária,
Brasília, DF, Brasil
E-mail: marcelo.guimaraes@agro.gov.br

Eduardo Mello Mazzoleni 
Ministério da Agricultura e Pecuária,
Brasília, DF, Brasil
E-mail: eduardo.mazzoleni@agro.gov.br

Recebido
30/11/2025

Aceito
26/02/2026

Como citar
RANGEL, L.E.P.; TANURE, T.; GUIMARÃES, M.F.; MAZZOLENI,
E.M. Indicadores ambientais para avaliação de políticas
agropecuárias. *Revista de Política Agrícola*, v.35, e02089,
2026. DOI: <https://doi.org/10.35977/2317-224X.rpa2026.v35.02089>.

Artigo

Indicadores ambientais para avaliação de políticas agropecuárias

Resumo – Este artigo avaliou a adequação dos indicadores de produtividade agrícola utilizados no Plano Plurianual (PPA) 2024–2027, com ênfase na razão entre produtividade total dos fatores (PTF) e emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com base em dados secundários de 2012 a 2024, aplicou-se o índice global Malmquist-Luenberger (GML) com orientação direcional (DDF) e a incorporação explícita de *outputs* indesejados. Os resultados mostram que a métrica PTF/GEE, embora simples e intuitiva, não captura a dinâmica da fronteira tecnológica nem as diferenças de eficiência ambiental entre regiões e cadeias produtivas. O GML, por sua vez, oferece medida mais robusta ao integrar simultaneamente insumos, produção e externalidades negativas. Conclui-se que indicadores baseados em modelos produtivos são mais adequados para orientar políticas públicas, monitorar sustentabilidade e permitir comparações internacionais. Recomendam-se avanços na integração institucional das bases de dados e no aprimoramento da governança estatística, com vistas ao fortalecimento do uso de métricas consistentes no planejamento governamental.

Palavras-chave: políticas públicas, produtividade total dos fatores (PTF), sustentabilidade agropecuária.

Environmental indicators for agricultural policy assessment

Abstract – This article evaluated the suitability of agricultural productivity indicators adopted in Brazil's Multi-Year Plan (PPA) 2024–2027, with emphasis on the ratio between total factor productivity (TFP) and Greenhouse Gas (GHG) emissions. Using secondary data for 2012–2024, we apply the Global Malmquist-Luenberger (GML) index with a Directional Distance Function (DDF), which explicitly incorporates undesirable outputs. The results show that the simplified TFP/GHG metric, while intuitive, does not capture shifts in the technological

frontier nor the regional and sectoral differences in environmental efficiency. The GML index provides a more robust measure by jointly integrating inputs, production, and negative externalities. We conclude that productivity indicators grounded in production-theory models are more appropriate for guiding public policies, monitoring sustainability, and enabling consistent international comparisons. We recommend strengthening institutional data integration and statistical governance to improve the consistency and timeliness of indicators used in the federal planning cycle.

Keywords: public policies, total factor productivity (TFP), agricultural sustainability.

Introdução

A mensuração da produtividade na agropecuária brasileira tem historicamente ignorado os custos ambientais associados ao processo produtivo, o que compromete a acurácia dos indicadores utilizados em políticas públicas. Nos últimos anos, especialmente com o avanço das agendas climáticas e o fortalecimento dos compromissos de descarbonização, cresceu o interesse na integração de variáveis ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa (GEE), às métricas tradicionais de produtividade. Nesse contexto, o índice de produtividade total dos fatores (PTF) surge como uma ferramenta-chave, embora sua aplicação convencional ainda esteja limitada à relação entre *outputs* econômicos e insumos produtivos.

O Plano Plurianual (PPA 2024–2027) do governo federal, por exemplo, adota uma forma simplificada de monitoramento da sustentabilidade agropecuária, que consiste no uso da razão direta entre a PTF e as emissões de GEE como indicador estratégico. Essa abordagem, embora intuitiva e de fácil comunicação, incorre em limitações metodológicas importantes. O tratamento das emissões como mera variável divisora compromete a capacidade de compreensão de sua natureza como um “produto indesejado” (*bad output*), que surge endogenamente do processo produtivo. Essa limitação pode induzir a interpretações equivocadas e comprometer o desenho de políticas públicas ambientais mais eficientes (Brasil, 2024b).

A literatura científica já oferece alternativas mais robustas para a incorporação da dimensão ambiental à análise de produtividade. Estudos como o de Bragagnolo & Tateishi (2022) e o da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2022) apontam que o uso de métodos baseados em fronteira eficiente – como o modelo *directional distance function* (DDF) ou o índice global Malmquist-Luenberger (GML) – permite avaliar simultaneamente os “bons” e os “maus” produtos gerados, respeitando-se as relações tecnológicas envolvidas na produção agropecuária. Nesses mo-

delos, as emissões de GEE não são tratadas como um insumo, mas como um *output* negativo, cuja redução desejável deve ser compatibilizada com o aumento da produção.

Diante disso, o objetivo deste artigo é demonstrar as vantagens do uso do modelo GML com base na DDF para mensurar a produtividade ambientalmente ajustada da agropecuária brasileira entre 2012 e 2024. Para isso, comparam-se os resultados da aplicação do índice GML com os da razão simplificada PTF/GEE adotada oficialmente, com a utilização de dados reais de produção, insumos e emissões. Entende-se que, somente por meio de abordagens como essa, é possível alinhar corretamente as métricas de produtividade com os compromissos ambientais do Brasil e garantir maior coerência técnica ao monitoramento de políticas públicas.

Revisão de literatura

Da produtividade convencional à produtividade ambiental

A PTF tem sido amplamente utilizada como um indicador-chave do desempenho econômico no setor agropecuário, medindo a eficiência com que insumos são convertidos em produto. Segundo a OECD (2022), a PTF convencional representa um avanço importante em relação a métricas unidimensionais de produtividade, mas possui limitações significativas quando aplicada à avaliação da sustentabilidade, uma vez que são ignoradas as externalidades ambientais negativas.

Nos últimos anos, estudos vêm propondo ajustes metodológicos para a incorporação de aspectos ambientais à análise de produtividade. Em especial, Bragagnolo & Tateishi (2022) destacam a importância do tratamento das emissões de GEE como *bad outputs* (produtos indesejáveis), integrando-os ao modelo de fronteira estocástica ou à Análise Envoltória de Dados (DEA) via orientação DDF. Essa abordagem permite capturar simultanea-

mente ganhos em produção e reduções em impactos ambientais.

A literatura evidencia também que o uso de modelos simplificados, como índices de razão direta entre produção e emissões (PTF/GEE), pode suscitar interpretações equivocadas. Isso ocorre porque tais razões não respeitam os fundamentos da teoria da produção nem distinguem variações em eficiência técnica e mudanças estruturais. Como mostram Han et al. (2018), análises mais robustas exigem que se considerem múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs* – desejáveis e indesejáveis – em modelos de produtividade verde (Ferreira & Vieira Filho, 2024; Lima & Bragagnolo, 2024).

Nesse sentido, a substituição de indicadores simplistas por métricas baseadas em DEA-GML ou índices Tornqvist ajustados para impactos ambientais emerge como uma tendência metodológica mais adequada. Tais modelos oferecem uma representação mais fiel da realidade agroambiental e possibilitam análises dinâmicas da eficiência ecológica, favorecendo melhores decisões políticas.

Modelos DEA e a fronteira de eficiência verde

A DEA, sobretudo na versão orientada à DDF, tem sido amplamente aplicada na literatura recente para medir a PTF ajustada a fatores ambientais. Liu et al. (2025) demonstram que o índice GML é capaz de avaliar variações na eficiência total ao longo do tempo, abrangendo tanto o progresso tecnológico quanto a eficiência técnica em relação a produtos indesejáveis, como emissões de GEE.

O GML é particularmente adequado para políticas públicas, pois permite o acompanhamento da evolução da sustentabilidade da produção agropecuária em painéis temporais e comparações entre países ou regiões. A OECD (2022) reforça esse ponto ao recomendar que indicadores de desempenho da agropecuária sejam ajustados por externalidades ambientais, especialmente em contextos de reporte de compromissos climáticos internacionais, como os da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

No Brasil, o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) iniciou a aplicação dessa metodologia para avaliar a produtividade agropecuária sob a ótica da sustentabilidade, mostrando que ganhos de produtividade podem coexistir com reduções nas emissões de GEE – desde que orientados por

políticas apropriadas e tecnologias de baixo carbono. Esses estudos têm influenciado inclusive a incorporação de métricas híbridas em instrumentos como o Plano ABC+ (Brasil, 2022a).

Além disso, a literatura aponta que a integração entre DEA e variáveis ambientais permite uma decomposição dos efeitos de eficiência e progresso técnico, o que é essencial para se compreender se os avanços decorrem de melhorias gerenciais (eficiência pura) ou de inovação tecnológica. Isso é particularmente útil para o desenho de políticas públicas mais eficazes, direcionadas à promoção de práticas sustentáveis e à superação de ineficiências estruturais no setor agropecuário (Kuo et al., 2014; Fusco, 2023; Hafezi et al., 2025).

Parâmetros e indicadores do desenvolvimento sustentável

A mensuração do desempenho ambiental da agropecuária brasileira é elemento central para a formulação de políticas públicas eficazes, especialmente em um cenário de crescente pressão internacional por descarbonização das cadeias produtivas. De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o setor agropecuário respondeu, em 2022, por aproximadamente 27% das emissões brutas do País (Brasil, 2022b).

Dos 27% do setor agropecuário, 78% das emissões são atribuídas à cadeia da carne bovina, majoritariamente da fermentação entérica e das emissões de metano (CH₄), gás com potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao dióxido de carbono (CO₂) (Brasil, 2022b). Esse dado reforça a urgência de políticas voltadas à modernização e transição sustentável da pecuária, por meio de tecnologias que promovam o aumento da produtividade com menor intensidade de emissões.

O compromisso brasileiro com a redução de emissões, estabelecido em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), prevê uma série de ações setoriais, sendo a agropecuária contemplada com o Plano ABC+, cujo objetivo é reduzir 1,076 gigatonelada de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) até 2030, com a adoção em larga escala de sistemas e práticas sustentáveis (SPS) (Brasil, 2022a). Para alcançar essa meta, o maior potencial identificado está na capacitação técnica, na transferência de tecnologia e na ampliação da assistência técnica e extensão rural – pilares fundamentais da transformação da intenção política em mudança concreta nos sistemas produtivos (Reis et al., 2025).

Além dessas ações estruturais, a efetividade da transição sustentável depende de instrumentos econômicos complementares, como o crédito rural orientado à sustentabilidade, o mercado de carbono, os pagamentos por serviços ambientais (PSA) e a diferenciação tributária para práticas sustentáveis. Esses mecanismos atuam como incentivos para a adoção de tecnologias de baixa emissão e devem estar articulados ao monitoramento de desempenho ambiental (Távora et al., 2018).

Nesse sentido, o Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene), gerido pelo MCTI, tem papel crucial na produção de inventários nacionais e no acompanhamento do desempenho dos setores econômicos. Em 2022, o setor agropecuário registrou 617,2 milhões de toneladas de CO₂eq, superando em 3,2% o total de 2021 (598,3 Mt CO₂eq), o maior aumento percentual desde 2004 (Brasil, 2022b). Esse volume de emissões supera o de países inteiros, como a África do Sul, o que evidencia a responsabilidade climática da agropecuária brasileira.

Especificamente na agricultura, as emissões permaneceram estáveis em 2022, com 121,2 Mt CO₂eq, uma leve queda de 0,3% em relação ao ano anterior. A principal fonte de emissão foi o uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, responsável por 37,3 Mt CO₂eq. A redução de 5% no uso desses

insumos em 2022 contribuiu para a leve retração das emissões, ainda que compensada parcialmente pelo aumento de 4,2% no uso de calcário agrícola, que, por sua vez, gerou 27,1 Mt CO₂eq (Brasil, 2022b).

O PPA 2024–2027 e os compromissos com a transição ecológica na agropecuária

O PPA 2024–2027, instrumento constitucional de planejamento de médio prazo do governo federal, estrutura-se em três eixos estratégicos¹. O eixo de desenvolvimento econômico e sustentabilidade socioambiental e climática articula políticas voltadas à promoção do crescimento econômico com justiça social, baseado em padrões de produção e consumo sustentáveis. Seu propósito central é fomentar uma economia inclusiva, verde e descarbonizada, articulando os desafios da competitividade com a redução das desigualdades regionais e sociais (Brasil, 2024b).

A vinculação entre os objetivos do PPA e os programas e ações sob responsabilidade do MAPA materializa-se em um conjunto de iniciativas estruturantes (Tabela 1), como o Plano ABC+, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), a Política Nacional de Agroecologia e Produção

Tabela 1. Conexões dos objetivos estratégicos do Eixo 2 do PPA 2024–2027 com as ações e programas correlacionados com o tema nas secretarias do MAPA.

Objetivo: transição energética e ecológica	Indicador	Ação/programa	Responsável
Para uma agropecuária sustentável	“conservar, restaurar e usar de forma sustentável o meio ambiente”	Plano ABC+ (Decreto nº 10.606/ 2021)	Secretaria de Desenvolvimento Rural (SDR)
	“ampliar as capacidades de prevenção, gestão de riscos e resposta a desastres e adaptação às mudanças climáticas”	Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático – Zarc (Decreto nº 9.841/2019)	Secretaria de Política Agrícola (SPA)
	“fortalecer a agricultura familiar, o agronegócio sustentável”	Programa Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (Decreto nº 7.794/2012)	Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA)
Para uma agropecuária e mineração sustentável	“promover a industrialização em novas bases tecnológicas”	Plano Nacional de Fertilizantes – PNF (Decreto nº 11.518/2023)	Secretaria Executiva (SE)
Para uma indústria mais verde	“promover a industrialização em novas bases tecnológicas e a descarbonização da economia”	Programa Nacional de Bioinsumos (Decreto nº 11.940/2024)	Secretaria de Desenvolvimento Rural (SDR)

Fonte: Brasil (2023a, 2024b).

¹ Desenvolvimento social e garantia de direitos; desenvolvimento econômico e sustentabilidade socioambiental e climática; e defesa da democracia e reconstrução do Estado e da soberania.

Orgânica (Pnapo), o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) e o Programa Nacional de Bioinsumos. Em conjunto, esses instrumentos traduzem os objetivos do PPA em políticas setoriais voltadas à produtividade, à sustentabilidade e à adaptação climática (Brasil, 2012, 2019, 2021, 2023b, 2024a).

Apesar do protagonismo potencial da agropecuária na estratégia de desenvolvimento sustentável, observa-se, no Anexo do PPA 2024–2027, uma presença limitada de indicadores específicos para o setor. O único indicador diretamente relacionado à atividade agropecuária é a “razão entre PTF e emissões na agricultura” (Figura 1), cujo valor de referência para 2021 é de 1,09, com meta de 1,35 até 2027. (Brasil, 2024b). Esse indicador busca capturar o desempenho relativo do setor ao relacionar o crescimento da produtividade com a intensidade de emissões de GEE.

A ausência de memória de cálculo e metodologia explícita no documento principal do PPA 2024–2027 é parcialmente compensada por documentos técnicos complementares, que explicam que o índice é considerado melhor quanto maior for seu valor. Na Figura 1, a linha de base de 2012 é igual a 1, e os cenários projetados até 2027 se dividem entre resultados-base – marcados por baixo crescimento da produtividade e aumento das emissões – e resultados desejáveis, que pressupõem crescimento anual composto (CAGR) da produtividade de 10% e redução das emissões de 10% (Brasil, 2024b).

Com base na revisão realizada, verifica-se que a métrica PTF/GEE adotada no PPA 2024–2027, embora de cálculo acessível, apresenta limitações conceituais significativas diante dos modelos de fronteira que tratam explicitamente as emissões como *bad outputs*. Portanto, para atingir o objetivo de avaliar criticamente a adequação desse indicador, este trabalho aplicará o índice GML com DDF, metodologia consolidada na literatura, para medir a produtividade verde.

Metodologia

Selecionaram-se variáveis representativas da produtividade, do uso de insumos e dos fatores de produção da agropecuária brasileira para o período analisado. A Tabela 2 mostra os dados utilizados e suas respectivas fontes e unidades de medida.

As variáveis foram organizadas em dois grupos: i) *inputs*, que incluem terra, trabalho, capital, fertilizantes e agrotóxicos; e ii) *outputs*, com o valor bruto da produção (VPB) como *output* desejável, e as emissões de GEE como *output* indesejável, tratadas posteriormente no modelo de fronteira.

A variável “área agrícola” foi extraída do projeto MapBiomass (2026), compreendendo as classes de uso do solo agrupadas nessa categoria, enquanto os dados referentes ao trabalho foram obtidos no Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea, 2026). Por sua vez, a variável “capital agrícola” foi levantada no sistema Sicor (BCB, 2026) e o VPB foi

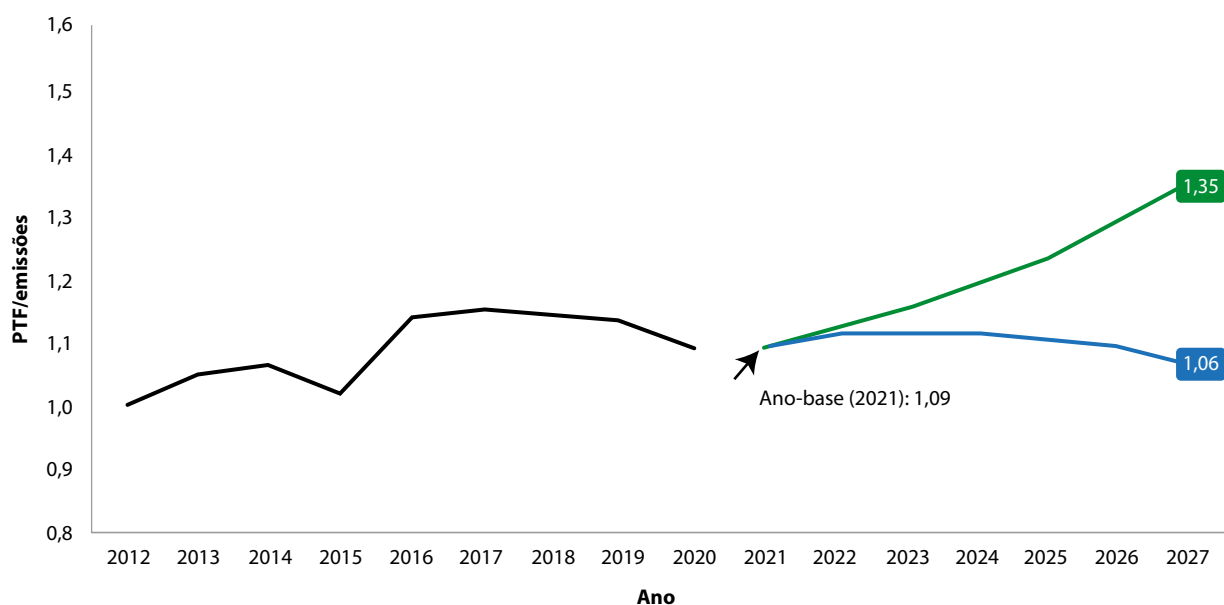


Figura 1. Razão entre a PTF e as emissões na agricultura.

Fonte: Brasil (2024b).

Tabela 2. Fontes de dados secundários e processamento das variáveis para a modelagem GML.

Variável	Fonte	Unidade	Observações
Agrotóxicos	Ibama	t mil	Total comercializado
Fertilizantes	Anda	t mil	Total entregue ao setor agropecuário
Capital agrícola	Sicor/MAPA	R\$ bilhão (corrente)	Deflacionados para valores de 2023
Área agrícola	MapBiomass	ha mil	Uso e cobertura agrícola
Trabalho rural	Ipea/IBGE	Pessoas (mil)	Empregados no setor agropecuário
VPB	MAPA	R\$ bilhão (corrente)	Deflacionados para valores de 2023
Emissões GEE	Sirene/MCTI	t CO ₂ eq	Dados disponíveis até 2022, imputados como tendência até 2024

Fonte: elaborado com dados de Anda (2026), BCB (2026), Brasil (2026a, 2026b), Ibama (2026), IBGE (2026b), Ipea (2026) e Mapbiomas (2026).

coletado no Ministério da Agricultura e Pecuária (Brasil, 2026a). Ambos os indicadores monetários foram deflacionados pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (IBGE, 2026a) para valores constantes de 2023, assegurando a comparabilidade intertemporal dos dados de capital e produto.

Quanto aos insumos químicos, os dados de fertilizantes foram obtidos na Associação Nacional para Difusão de Adubos (Anda, 2026), ao passo que as informações sobre agrotóxicos foram extraídas dos registros anuais de comércio do Ibama (2026).

As variáveis foram padronizadas para as mesmas unidades de análise: área e insumos em milhares de hectares e de toneladas, respectivamente; variáveis monetárias (capital e produto) em bilhões de reais; e trabalho em milhares de pessoas. Essa compatibilização de escalas viabilizou a subsequente aplicação dos modelos econométricos e de fronteira.

O índice de PTF ajustado ambientalmente foi estimado por meio do modelo GML, conforme proposto por Oh (2010), que incorpora *outputs* indesejáveis (como as emissões de GEE) no cálculo da eficiência intertemporal. Diferentemente das versões tradicionais do índice Malmquist, o GML combina a estrutura intertemporal de dados em painel com a modelagem de *outputs* indesejáveis, permitindo a mensuração simultânea de variações de eficiência técnica e progresso tecnológico quando há emissão de poluentes.

Em termos formais, o índice GML é definido a partir das DDFs globais, que avaliam o desempenho relativo de uma unidade de decisão diante de uma tecnologia global – isto é, o conjunto formado pela união de todas as tecnologias observadas ao longo dos períodos t e $t+1$. Essa abordagem elimina as in-

consistências de circularidade do índice Malmquist convencional, pois todas as comparações são feitas em relação a uma única fronteira de produção global.

A formulação base do índice GML entre os períodos t e $t+1$, considerada a orientação direcional do vetor g , é dada por

$$GML^{t \rightarrow t+1} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 + D_0^t(x^t, y^t, b^t, g)}{1 + D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g)} + \frac{1 + D_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, g)}{1 + D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, g)} \right] \quad (1)$$

em que:

x representa os vetores de *inputs* (terra, trabalho, capital, fertilizante, agrotóxico);

y denota o *output* desejável (VPB real);

b corresponde ao *output* indesejável (GEE);

D é a função de distância direcional baseada no modelo DEA; e

g representa o vetor direcional definido, que busca aumentar o *output* desejável e reduzir o indesejável.

Essa formalização permite a captura não apenas dos ganhos de eficiência técnica e tecnológica, mas também dos efeitos ambientais associados à produção agropecuária ao longo do tempo. Diferentemente de índices simplificados, como a razão Y/B (PTF/GEE), o GML incorpora explicitamente a estrutura de insumos e a fronteira tecnológica, fornecendo uma métrica mais consistente e teoricamente fundamentada de sustentabilidade produtiva.

Embora a DEA seja tradicionalmente aplicada à comparação de múltiplas unidades decisórias

(DMUs), o modelo Malmquist-Luenberger – e sua extensão GML – permite a reinterpretação das observações temporais de uma mesma economia como “DMUs intertemporais”. Nesse caso, cada período t representa uma configuração distinta da fronteira tecnológica nacional, definida pelos vetores de insumos, produtos e emissões observados naquele ano.

Conforme Oh (2010), o GML combina todas as observações do período analisado para formar uma tecnologia global (G), que abrange os conjuntos de produção de todos os anos. Essa formulação garante que cada par temporal seja comparado a uma única fronteira comum, evitando o problema de não circularidade do índice Malmquist tradicional.

Os dados foram estruturados em planilhas e processados no ambiente de desenvolvimento *Google Colab*, utilizando-se a linguagem *Python* com o suporte das bibliotecas *pandas*, *numpy*, *matplotlib* e *statsmodels*. As estimativas GML e da DDF foram realizadas por meio de rotinas próprias de programação, fundamentadas na metodologia DEA. A escolha por essa plataforma justifica-se por assegurar transparência, replicabilidade e agilidade na atualização anual dos resultados, requerendo apenas a substituição das séries históricas no arquivo de entrada.

Resultados e discussão

A mensuração da PTF ajustada aos impactos ambientais é central para a construção de indicadores agropecuários compatíveis com a sustentabilidade. A relação PTF/GEE adotada nos documentos de planejamento do governo brasileiro ampara-se na ideia de que ganhos de produtividade estariam associados a uma menor pressão sobre os recursos naturais. No entanto, esse indicador é simplificado e não capta a complexidade da produção agropecuária nem a natureza multidimensional dos impactos ambientais.

A relação PTF/emissões sustenta-se ainda na ideia de que o aumento da produtividade contribui para a redução da pressão sobre o uso da terra, tornando-se, assim, um indicador *proxy* de sustentabilidade produtiva. Ainda que esse parâmetro esteja longe de captar todas as externalidades ambientais do setor, seu uso é justificado por sua padronização internacional e pela facilidade de monitoramento via inventários de emissões (OECD, 2022). No Brasil, o

Ipea apresentou proposta metodológica para mensuração desse indicador, posteriormente incorporada às simulações do Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO) (Brasil, 2024b).

Deve-se levar em consideração a PTF e sua abordagem mais recente, na qual se propõe incluir os *bad outputs* eventuais relacionados aos impactos ambientais da agropecuária. O tema vem sendo alvo de discussões no âmbito da OECD e será orientador de modelos para a comparação da evolução da agropecuária sustentável entre países e ao longo de suas séries históricas, por meio da medição de seu desempenho em um balanço entre produtividade e impacto ambiental (OECD, 2022).

A Tabela 3 mostra as estatísticas anuais das variáveis utilizadas para o cálculo da produtividade e das emissões. Todas as variáveis econômicas foram deflacionadas para valores reais de 2023.

Os resultados evidenciam diferenças significativas entre as trajetórias estimadas pelos dois indicadores de produtividade ambiental. A razão PTF/GEE exibiu um crescimento acumulado mais acentuado em 2012–2027, com variação de 1,00 para 1,35 no cenário projetado, enquanto o índice GML mostrou uma elevação mais moderada, de 1,00 para 1,26 no mesmo intervalo. Essa divergência confirma que o uso de índices simplificados, baseados apenas na razão entre produção e emissões, tende a superestimar o desempenho produtivo quando não se considera a estrutura tecnológica subjacente e os efeitos de eficiência técnica. A Tabela 4 resume esses resultados, que estão em consonância com Bragagnolo & Tateishi (2022), que encontraram comportamento semelhante ao comparar a PTF da agricultura brasileira medida por índices convencionais (Malmquist e GM) e ambientalmente ajustados (Malmquist-Luenberger e GML). Em sua análise, os autores verificaram que o crescimento anual da PTF ambientalmente sensível é, em média, de quatro a cinco vezes menor que o das medidas tradicionais e que a mudança tecnológica explica a maior parte dos ganhos de produtividade, ao passo que a eficiência técnica tende a decrescer quando as emissões são incorporadas ao modelo.

Segundo essas simulações, o valor da razão PTF/emissões permaneceu estável em 1,09 entre 2020 e 2021, com projeções de crescimento modesto até 2023 e aceleração gradual a partir de 2024, atingindo a meta de 1,35 em 2027 no cenário desejável. Esse desempenho sugere que a produtividade

Tabela 3. Dados agregados da agropecuária brasileira em 2012–2024.

Ano	Produção agropecuária (R\$ bilhão)	Emissões GEE (t CO ₂ eq)	Terra (ha milhão)	Trabalho (pessoas)	Capital (R\$ bilhão)	Fertilizantes (t)	Agrotóxico (t)
2012	603,7	539,92	246,1	10.090	244,97	29.500.000	495.765
2013	667,3	544,72	248,1	10.198	274,50	30.700.397	495.765
2014	688,0	550,23	249,7	9.246	243,52	32.209.066	508.557
2015	672,0	555,69	251,5	9.169	168,21	30.201.998	521.525
2016	693,9	567,15	252,9	8.764	224,79	34.083.415	541.861
2017	683,5	565,12	254,1	8.339	235,83	34.438.840	539.945
2018	674,5	564,40	255,2	8.355	225,00	35.506.322	549.280
2019	702,6	568,29	257,4	8.324	250,30	36.238.381	620.538
2020	903,1	583,74	259,6	8.500	344,20	40.564.138	685.746
2021	1.159,1	600,47	262,6	8.881	387,15	45.855.071	719.507
2022	1.205,4	622,01	265,8	8.448	409,91	41.077.519	800.652
2023	1.190,8	610,51 ⁽¹⁾	269,4	7.986	406,22	45.825.687	755.489
2024	1.153,9	611,43 ⁽¹⁾	272,0	7.324	393,63	45.615.968	787.979

⁽¹⁾ Dados estimados com base na tendência histórica observada por extrapolação linear do software Excel.
Fonte: elaborado com dados de Anda (2026), BCB (2026), Ibama (2026), IBGE (2026b), Ipea (2026), Mapa (Brasil, 2026a), MapBiomass (2026) e Sirene (Brasil, 2026b).

Tabela 4. Estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil – MCTI⁽¹⁾.

Ano	Série histórica	Projeções		Série histórica	Projeções	
	PTF/GEE	Resultado-base	Resultado desejável	GML	Resultado-base	Resultado desejável
2012	1,00			1,00		
2013	1,05			1,0534		
2014	1,06			1,1854		
2015	1,02			1,0757		
2016	1,14			1,0439		
2017	1,15			1,0560		
2018	1,14			1,0347		
2019	1,13			1,0629		
2020	1,09			1,1854		
2021		1,09	1,09	1,1854		
2022		1,11	1,12	1,1854		
2023		1,11	1,15	1,1854		
2024		1,11	1,19	1,1854		
2025		1,10	1,23		1,1969	1,2379
2026		1,09	1,29		1,2084	1,2494
2027		1,06	1,35		1,2199	1,2609

⁽¹⁾ Projeções elaboradas pelo MPO com base em simulações do MAPA e valores calculados e simulados com o índice GML.

de tem crescido a uma taxa superior à das emissões, embora ainda haja espaço para melhorar a intensidade ambiental da produção agropecuária.

A análise comparativa entre os índices PTF/GEE e GML revela trajetórias próximas, mas com inflexões importantes ao longo do período analisado, especialmente entre 2015 e 2016, quando o indicador simplificado (PTF/GEE) exhibe crescimento, de 1,02 para 1,14, enquanto o índice GML registra redução, de 1,08 para 1,04 (Figura 2). Esse movimento em direções opostas é ilustrativo das limitações dos indicadores de razão direta: embora o aumento da PTF/GEE sugira ganho de produtividade relativa às emissões, o GML mostra que esse crescimento não se traduz em melhoria de eficiência ambiental.

Fenômenos semelhantes foram observados em Bragagnolo & Tateishi (2022), cujos resultados apontam que, em diversos estados brasileiros, o crescimento da PTF tradicional coincidiu com o aumento das emissões de GEE, indicando uma divergência entre índices convencionais e ambientalmente ajustados. Segundo os autores, o crescimento ambientalmente sensível é substancialmente menor (0,4% ao ano, em média) do que o observado nos modelos que ignoram as emissões (3% a 5% ao ano). A explicação, também confirmada neste estudo, é de que os ganhos aparentes de produtividade derivam de expansão da fronteira de produção sem redução proporcional dos subprodutos indesejáveis.

Para facilitar a interpretação e a comparação com índices simplificados, construiu-se um índice acumulado GML com base 100 no ano inicial. Esse índice foi comparado com um indicador mais comum e restritivo, que relaciona diretamente o valor da produção ao volume de emissões (PTF/GEE), sem considerar os insumos nem a fronteira tecnológica. Como mostrado na Tabela 4 e nas Figuras 1 e 2, a trajetória do GML acumulado revela padrões distintos, refletindo variações tanto na eficiência técnica quanto nas condições de uso de insumos e intensificação produtiva ao longo do tempo – aspectos que são ignorados no indicador simplificado.

A comparação entre os dois índices revela diferenças metodológicas importantes. A razão PTF/GEE sugere uma tendência à estabilidade entre 2020 e 2024, enquanto o GML reflete ganhos consistentes de produtividade ajustada ambientalmente. Essa diferença decorre da capacidade do GML de considerar simultaneamente os efeitos da eficiência técnica, dos insumos utilizados e das emissões geradas, produzindo uma medida mais robusta.

A repetição de valores do índice $GML_{t,t+1}$ em determinados anos reflete a estabilidade da eficiência ambiental ajustada, uma vez que diferentes períodos podem ocupar a mesma posição relativa na fronteira tecnológica global, incluindo o pico de 2014, a estabilidade entre 2016 e 2019 e o crescimento contínuo pós-2020. Esse comportamento é típico do modelo de DEA com tecnologia global, quando o crescimento da produção e das

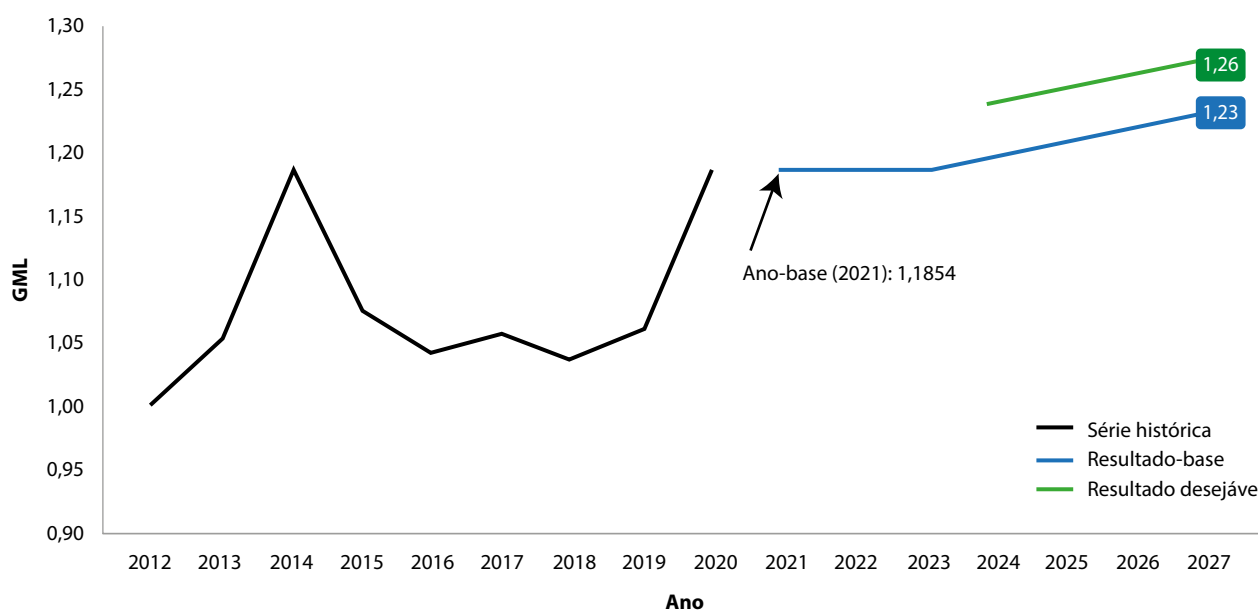


Figura 2. Indicador GML e suas projeções, consideradas as mesmas tendências de expectativa do PPA 2024–2027.

emissões ocorre de forma proporcional aos insumos utilizados (Chung et al., 1997; Oh, 2010; Zhang et al., 2021).

A análise da trajetória histórica do índice GML revela três momentos distintos. O primeiro é o pico observado em 2014 (GML = 1,1854), que pode ser atribuído à elevação expressiva do VPB, sem aumento proporcional nos insumos ou nas emissões de GEE. Em seguida, observa-se queda em 2015, associada possivelmente à elevação nos custos de produção e à oscilação cambial, que reduziu a eficiência ambiental sem ganho compensatório em produtividade (Ogino & Vieira Filho, 2022; Tanahashi & Silva, 2025).

O segundo momento, entre 2016 e 2019, caracteriza-se por estabilidade nos índices de produtividade ajustada ambientalmente, refletindo uma fase de estagnação técnica ou de baixo dinamismo na fronteira tecnológica. Por fim, 2020 marca um novo crescimento no GML, sinalizando possíveis ganhos de eficiência técnica combinados com melhor desempenho ambiental, em parte impulsionados por práticas conservacionistas ou efeitos transitórios da pandemia de Covid-19 sobre a atividade agrícola e as emissões (Gasques et al., 2022).

Para aprofundar a interpretação, foram empregados modelos GML com os dados transformados, e os resultados mostraram alto ajuste do modelo para a produção (pseudo $R^2 = 0,9999$) e para as emissões (pseudo $R^2 = 1,0000$). A Tabela 5 mostra os coeficientes estimados.

Tabela 5. Resultados do GML (variáveis log-transformadas).

Variável	Produção agropecuária (good output)	Emissões de GEE (bad output)
Intercepto	-11,5851 (0,854)	-3,1715 (0,717)
log(terra)	+1,0470 (0,778)	+0,3736 (0,468)
log(trabalho)	-0,0205 (0,658)	-0,0047 (0,467)
log(capital)	+0,3165 (0,139)	+0,0020 (0,946)
log(fertilizante)	+0,0740 (0,900)	-0,0122 (0,881)
log(agrotóxico)	+0,6980 (0,267)	+0,1873 (0,032)
Pseudo R^2 (CS)	0,9999	1,000
Deviance	0,0495	0,000955
Iterações IRLS	3	3

O resultado mais inesperado foi a significância estatística do uso de agrotóxicos como determinante positivo das emissões de GEE ($p < 0,05$). Essa

associação requer interpretação cautelosa, pois os agrotóxicos não são diretamente responsáveis pelas emissões, mas podem estar correlacionados com sistemas de produção mais intensivos, como o plantio direto ou cultivos em grande escala. O GML, ao isolar os efeitos marginais dos insumos, revela relações estruturais que podem demandar estudos mais aprofundados (Maraseni & Cockfield, 2011).

No plano internacional, a OCDE vem discutindo formas de ajustar a PTF aos desafios ambientais, embora com dificuldades metodológicas para incorporar variáveis como biodiversidade e serviços ecossistêmicos (OECD, 2022). No Brasil, Ferreira & Vieira Filho (2024) já propuseram abordagens que tratam as emissões como um *input* negativo, o que reforça a utilidade da razão PTF/emissões como métrica de sustentabilidade relativa. Ferreira & Vieira Filho (2024) identificaram que, entre 2010 e 2018, as taxas de crescimento anual da PTF foram de 2,6%, enquanto a razão PTF por emissões totais cresceu 7,4% e a razão PTF por emissões agropecuárias subiu 2,5%.

Entende-se, portanto, que o GML é especialmente adequado para avaliar a sustentabilidade da agropecuária, pois permite estimar o crescimento da produtividade com base, simultaneamente, nos ganhos econômicos e nos impactos ambientais, como as emissões de GEE (Chung et al., 1997).

Em síntese, o PPA 2024–2027 incorpora um arcabouço inicial para conectar produtividade agrícola e sustentabilidade climática, mas ainda carece de maior detalhamento metodológico e de um conjunto mais robusto de indicadores. O avanço nessa direção requer a ampliação do sistema de monitoramento, a transparência nos critérios de cálculo e o alinhamento das políticas setoriais com os compromissos ambientais nacionais e internacionais.

A mensuração da PTF ajustada aos impactos ambientais exige modelos que reconheçam simultaneamente os *outputs* desejáveis e os indesejáveis, bem como os insumos utilizados na produção. Neste estudo, adota-se o índice GML conforme proposto por Oh (2010), que expande o índice de Malmquist tradicional ao incorporar emissões de GEE como *outputs* indesejados, usando a DDF e o conceito de tecnologia global. Essa abordagem permite estimar o crescimento da produtividade ajustada ambientalmente, considerando a eficiência relativa entre unidades (anos, neste caso) e as restrições impostas pelo uso de insumos.

Conclusões

Este estudo avaliou criticamente a relação entre produtividade agropecuária e sustentabilidade ambiental, investigando o uso da PTF ajustada às emissões de GEE como instrumento para avaliar a eficácia das políticas públicas brasileiras. Demonstrou-se que, embora o PPA 2024–2027 e o Plano Safra 2023/2024 incorporem diretrizes voltadas à transição ecológica, a métrica simplificada baseada na razão PTF/GEE – apesar de intuitiva – carece de sofisticação técnica para captar adequadamente os *trade-offs* entre desempenho produtivo e impactos ambientais.

Em síntese, a adoção do índice GML com DDF demonstrou ser uma alternativa superior à razão PTF/GEE, ao integrar de forma robusta insumos, produtos e emissões em sua análise. Essa metodologia não só captura o crescimento da produtividade, mas também a eficiência no uso de recursos em relação aos impactos ambientais, oferecendo uma métrica mais alinhada com os princípios da OCDE e as demandas de uma política agrícola sustentável. Os resultados confirmam que o GML possui maior capacidade explicativa e sensibilidade para retratar a dinâmica real do setor.

Contudo, a implementação plena de métricas avançadas como o GML esbarra em limitações críticas de dados. A infraestrutura de monitoramento nacional possui lacunas significativas, com registros de emissões, agrotóxicos e fertilizantes frequentemente desatualizados, incompletos ou dependentes de bases privadas não padronizadas. Além disso, o modelo ainda não consegue incorporar outras externalidades ambientais cruciais – como a perda de biodiversidade e a degradação do solo –, em virtude da ausência de séries históricas consistentes, o que restringe a abrangência das avaliações de sustentabilidade.

Para superar essas barreiras, é imperativo o fortalecimento institucional dos sistemas de dados agroambientais, promovendo uma governança interinstitucional e atualização regular. Políticas públicas, como o Plano Safra e o PPA, devem priorizar a transição de indicadores simplificados para métricas fundamentadas na teoria da produção e na sustentabilidade intertemporal. Apenas com dados confiáveis e modelos analíticos robustos será possível orientar a agropecuária brasileira rumo ao desenvolvimento verdadeiramente sustentável, em linha com os compromissos climáticos internacionais.

Referências

- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes**. Disponível em: <<https://anda.org.br/>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BCB. Banco Central do Brasil. **Sistema de Operações do Crédito Rural e do Proagro (SICOR)**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRAGAGNOLO, C.; TATEISHI, H.R. Produtividade total dos fatores e emissões de dióxido de carbono na agricultura brasileira: uma medida de PTF ambientalmente sensível. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 49., 2021, on-line. **Anais**. [São Paulo]: Anpec, 2022. Disponível em: <https://www.anpec.org.br/encontro/2021/submissao/files_l/i11-ada5869d9745aab6993443767485980e.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 10.606, de 22 de janeiro de 2021. Institui o Sistema Integrado de Informações do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura e o Comitê Técnico de Acompanhamento do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. **Diário Oficial da União**, 22 jan. 2021. Seção1, p.2. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=25/01/2021&jornal=515&pagina=2&totalArquivos=162>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRASIL. Decreto nº 11.332, de 1 de janeiro de 2023. Aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções de Confiança do Ministério da Agricultura e Pecuária e remaneja cargos em comissão e funções de confiança. **Diário Oficial da União**, 1 jan. 2023a. Seção1, p.56-66. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=01/01/2023&jornal=701&pagina=56&totalArquivos=310>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRASIL. Decreto nº 11.518, de 4 de maio de 2023. Altera o Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022, que institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022- 2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. **Diário Oficial da União**, 5 maio 2023b. Seção1, p.3. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=05/05/2023&jornal=515&pagina=3&totalArquivos=354>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRASIL. Decreto nº 11.940, de 7 de março de 2024. Altera o Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, que institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. **Diário Oficial da União**, 8 mar. 2024a. Seção1, p.4. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=08/03/2024&jornal=515&pagina=4&totalArquivos=102>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRASIL. Decreto nº 7.794, de 20 de agosto de 2012. Institui a Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica. **Diário Oficial da União**, 21 ago. 2012. Seção1, p.4-5. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/08/2012&jornal=1&pagina=4&totalArquivos=176>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRASIL. Decreto nº 9.841, de 18 de junho de 2019. Dispõe sobre o Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático. **Diário Oficial da União**, 19 jun. 2019. Seção1, p.4. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=19/06/2019&jornal=515&pagina=4&totalArquivos=78>>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Valor Bruto da Produção Agropecuária (VBP)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/valor-bruto-da-producao-agropecuaria-vbp>>. Acesso em: 2 jun. 2026a.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 471, de 10 de agosto de 2022. Institui, no âmbito do Ministério da

Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária - ABC+ para o período 2020-2030. **Diário Oficial da União**, 11 ago. 2022a. Seção1, p.10-11. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=11/08/2022&jornal=515&pagina=10&totalArquivos=175>>. Acesso em: 2 jun. 2026.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 6.ed. Brasília, 2022b. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>>. Acesso em: setembro de, 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Sistema de Registro Nacional de Emissões – SIRENE**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/sistema-de-registro-nacional-de-emissoes-sirene>>. Acesso em: 20 jun. 2026b.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento. **PPA 2024–2027**. Brasília: MPO, 2024b. Disponível em: <<https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/plano-plurianual/paginas/paginas-ppa-2024-2027/lei-do-ppa>>. Acesso em: 30 set. 2025.

CHUNG, Y.H.; FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. **Journal of Environmental Management**, v.51, p.229-240, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>.

FERREIRA, Z.R.; VIEIRA FILHO, J.E.R. **Sustentabilidade produtiva e efeito poupa-florestas na agricultura: um comparativo internacional**. Rio de Janeiro: Ipea, 2024. (Ipea. Texto para discussão, 2980). DOI: <https://doi.org/10.38116/td2980-port>.

FUSCO, G.; CAMPOBASSO, F.; LAURETI, L.; FRITTELLI, M.; VALENTE, D.; PETROSILLO, I. The environmental impact of agriculture: an instrument to support public policy. **Ecological Indicators**, v.147, art.109961, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109961>.

GASQUES, J.G.; VIEIRA FILHO, J.E.R.; BASTOS, E.T. PIB agropecuário e produtividade total dos fatores da agropecuária brasileira: análise recente e perspectivas. **Boletim de Análise do PIB Agropecuário**. Brasília: Ipea, 2022.

HAFEZI, S.M.; MUCHOVÁ, Z.; SOHEILIFARD, F.; DOHÁL, R.; MORADI, E. An integrated approach to optimizing environmental impact and crop yields in the regenerative agriculture system of Central Europe. **Science of the Total Environment**, v.999, art.180360, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180360>.

HAN, H.; ZHONG, Z.; WEN, C.; SUN, H. Agricultural environmental total factor productivity in China under technological heterogeneity: characteristics and determinants. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p.32096-32111, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3142-4>.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatórios de Comercialização de Agrotóxicos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>>. Acesso em: 2 jun. 2026.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 2 jun. 2026a.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2026b.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Ipeadata**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 2 jun. 2026.

KUO, H.-F.; CHEN, H.-L.; TSOU, K.-W. Analysis of farming environmental efficiency using a DEA model with undesirable outputs. **APCBEE Procedia**, v.10, p.154-158, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcb.2014.10.034>.

LIMA, J.A. de; BRAGAGNOLO, C. Produtividade total dos fatores e emissões de gases de efeito estufa: uma análise para a agropecuária da Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v.18, p.273-300, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54766/rberu.v18i2.1058>.

LIU, L.; ZHENG, B.; ZHAO, J.; HAO, S. Measurement and spatial evolution of green total factor productivity in China's wheat production based on the three-stage DEA-GML model. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.9, art.1615861, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1615861>.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: <<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 2 jun. 2026.

MARASENI, T.N.; COCKFIELD, G. Does the adoption of zero tillage reduce greenhouse gas emissions? An assessment for the grains industry in Australia. **Agricultural Systems**, v.104, p.451-458, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.03.002>.

OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2022: reforming agricultural policies for climate change mitigation**. Paris, 2022.

OGINO, C.M.; VIEIRA FILHO, J.E.R. Preços de fertilizantes impactando a produção agrícola brasileira. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n.27, p.151-154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.38116/brua27art11>.

OH, D.-H. A global Malmquist-Luenberger productivity index. **Journal of Productivity Analysis**, v.34, p.183-197, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11123-010-0178-y>.

REIS, C.; PONCIANO, P.; MELO, A. II. Transformações nos Sistemas Agroalimentares para um Brasil Justo, Sustentável e Desenvolvido. In: **TRANSFORMAÇÕES nos Sistemas Agroalimentares para um Brasil Justo, Sustentável e Desenvolvido**. [Rio de Janeiro]: WTT Brasil, 2025. p.27-38. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1181723>>. Acesso em: 23 out. 2025.

TANAHASHI, A.A.N.; SILVA, F.A. Efeitos das variações cambiais sobre os preços do café arábica e robusta no Brasil. **Revista Catarinense de Economia**, v.9, e09003, 2025. DOI: <https://doi.org/10.54805/RCE.2527-1180.v9.e09003>.

TÁVORA, G.S.G.; SILVA, A.S. da; TURETTA, A.P.D. Análise da política por pagamento por serviços ambientais como um instrumento para sustentabilidade socioambiental. **Geosul**, v.33, p.29-47, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n66p29>.

ZHANG, X.; CHEN, X.; LU, C.-C.; CHENG, F.-Y. A comparative analysis of slack-based green total factor productivity in China: a directional distance function. **Water, Air, & Soil Pollution**, v.232, art.466, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05373-z>.