

Produtividade total dos fatores e emissões de gases de efeito estufa: Uma análise para a agropecuária da Amazônia Legal

Janaína Alves de Lima¹  | Cassiano Bragagnolo² 

¹ Doutoranda em Desenvolvimento Econômico, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, E-mail: j289243@dac.unicamp.br

² Professor do Departamento de Economia da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar - campus Sorocaba, E-mail: cassiano@ufscar.br

RESUMO

O desmatamento na Amazônia Legal é um dos principais impulsionadores das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) na região. A redução do desmatamento e, conseqüentemente, das emissões pode ser alcançada por meio de uma produção agropecuária mais eficiente. Este artigo visa medir a variação da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na agricultura da Amazônia Legal, comparando medidas que consideram as emissões de GEEs com medidas que não consideram. Foram calculados e comparados os índices de Malmquist e de Malmquist generalizado, que não levam em conta subprodutos, com os de Malmquist-Lundemberg e Malmquist-Lundemberg generalizado, que consideram a existência de subprodutos. Os resultados demonstraram que os índices que levam em consideração as emissões de GEEs apresentaram um crescimento menor em comparação aos índices tradicionais e que 56% dos municípios da Amazônia Legal dão maior ênfase ao crescimento econômico em detrimento do controle das emissões de GEEs.

PALAVRAS-CHAVE

Amazônia Legal, PTF, Índice de Malmquist

Total factor productivity and greenhouse gas emissions: An analysis for agriculture in the Legal Amazon

ABSTRACT

Deforestation in the Brazilian Amazon, known as the Legal Amazon, is one of the main drivers of greenhouse gas (GHG) emissions in the region. Reducing deforestation and subsequent emissions can be achieved through more efficient agricultural production. This article measures the variation in Total Factor Productivity (TFP) in the Legal Amazon's agriculture, comparing methods that include GHG emissions with those that do not. We calculated and compared the Malmquist and generalized Malmquist indices, which ignore by-products, with the Malmquist-Lundberg and generalized Malmquist-Lundberg indices, which account for by-products. Results show that indices considering GHG emissions exhibited lower growth compared to traditional indices. Additionally, 56% of municipalities in the Legal Amazon prioritize economic growth over GHG emissions control.

KEYWORDS

Legal Amazon, TFP, Malmquist Index

CLASSIFICAÇÃO JEL

Q10, Q53, O13

1. Introdução

Desde a segunda metade da década de 1980 discute-se a sustentabilidade do desenvolvimento da Amazônia Legal. Essas discussões aconteceram devido às cobranças realizadas pela comunidade nacional e internacional, que a partir dessa época, passaram a se preocupar com as consequências das mudanças climáticas globais e suas causas e efeitos (Andersen et al., 2002; Serra e Fernandez, 2004).

Segundo Andersen et al. (2002), a partir da década de 1960, a expansão da fronteira agrícola em direção à Amazônia tornou-se um objetivo geopolítico de desenvolvimento brasileiro. Alguns projetos foram fundamentais para possibilitar a expansão da região amazônica, como a construção de estradas que unificaram o território às demais regiões do país e a criação da Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA), em 1953, destinada a ser uma agência regional para acompanhar o desenvolvimento local. Para que a agência pudesse acompanhar os trabalhos realizados no território amazônico, o governo brasileiro criou a definição de “Amazônia Legal”, sendo este, portanto, um termo determinado não apenas geograficamente, mas também geopoliticamente (Serra e Fernandez, 2004). A Amazônia legal é composta por 772 municípios em nove estados (Amazonas, Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará, Roraima, Rondônia, Tocantins e parte do Maranhão), estendendo-se por cerca de 5 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 59% do território nacional (IBGE, 2021).

Além da expansão da atividade agropecuária, na década de 1960, ocorreu também um significativo aumento populacional na região, motivado por políticas públicas que buscavam promover o desenvolvimento. Entretanto, esses incentivos, ao mesmo tempo em que proporcionaram desenvolvimento e crescimento econômico para a região, também geraram exploração dos recursos naturais, desmatamento e desigualdades sociais, devido à precária infraestrutura dos municípios (West e Fearnside, 2021; Hall, 1991; Margulis, 1990; Serra e Fernandez, 2004).

No Brasil, uma das maiores fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) é o desmatamento em larga escala associado à expansão da atividade agropecuária no território amazônico (Nobre, 2001). De forma geral, destaca-se que entre 90% e 99% do desmatamento tropical é impulsionado pela agropecuária (SEEG, 2023). Esse processo acelerou-se a partir da década de 1960, devido à integração da região por meio da Rodovia Transamazônica (West e Fearnside, 2021).

No entanto, a exportação de produtos agropecuários e suas atividades afins são fundamentais para a balança comercial brasileira, tendo atingido em 2023 um total de US\$ 166,6 bilhões. Conforme dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), os principais produtos exportados são a soja, a carne bovina, o açúcar de cana, a celulose, o milho, a carne de frango, o café e o algodão (CNA, 2023). Segundo estudo divulgado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA (2024), a participação do setor agropecuário no PIB brasileiro também é relevante,

tendo sido de 23,8% em 2023.

Diante das elevadas emissões de GEEs do setor agropecuário e das cobranças nacionais e internacionais, em 2009, o governo brasileiro passou voluntariamente a buscar alternativas para reduzir as emissões. Esse esforço começou na 15ª Conferência das Partes (COP 15), em Copenhague, quando o Brasil passou a buscar a redução de emissões de GEEs (Conceição et al., 2017). Posteriormente, o governo brasileiro, na COP 21, realizada em Paris no ano de 2015, comprometeu-se a recuperar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas até 2030, reduzir as emissões de GEEs em 37% até 2025 e 43% até 2030 em relação ao nível de emissões de 2005 (Conceição et al., 2017).

Destaca-se que a conservação dessas áreas com mata nativa pode ser alcançada por meio de uma produção agropecuária mais intensiva, diminuindo a demanda por novas áreas produtivas e o conseqüente desmatamento (Nascimento et al., 2019). A intensificação no uso da terra visando ao aumento da produção pode ocorrer por meio do ganho de produtividade advindo da introdução de tecnologias, geralmente como resultado de investimentos em pesquisa e desenvolvimento como novas cultivares, melhores práticas agrícolas, melhores práticas gerenciais entre outras (Byerlee et al., 2014).

Tendo em vista a importância da produção agropecuária para a economia brasileira e as potenciais externalidades negativas oriundas dessa produção, o objetivo deste artigo é calcular a mudança na Produtividade Total dos Fatores (PTF), por meio de índices do tipo Malmquist comparando os resultados de cálculos tradicionais da PTF com cálculos que considerem a geração de subprodutos indesejáveis no processo de produção. Mais especificamente, serão consideradas as emissões de GEEs nos cálculos.

O cálculo da PTF visa medir a eficiência com que os fatores e insumos de produção são combinados por meio de tecnologias e práticas agropecuárias. Para contabilizar os índices de produtividade foram calculados os índices de Malmquist tradicional (M) (Färe et al., 1994a) e de Malmquist generalizado (GM) (Pastor e Lovell, 2005). Para o cálculo dos índices que consideram as emissões de GEEs foram utilizados os índices de Malmquist-Lundemberg (ML) (Chung et al., 1997) e de Malmquist-Lundemberg generalizado (GML) (Oh, 2010, 010b).

Concomitantemente, os resultados obtidos nos cálculos da PTF tradicional são comparados com os da PTF que levam em consideração a geração de subprodutos indesejáveis. Essa comparação é feita por meio de uma classificação dos estados da Amazônia Legal em "verdes" e "amarelos", conforme metodologia proposta por Oh (2010, 010b). No procedimento realizado, avalia-se se os índices tradicionais (GM ou M) apresentam um crescimento da PTF maior ou menor do que os índices que consideram os subprodutos indesejáveis (GML ou ML). Se o crescimento for maior nos índices tradicionais (GM ou M), o local é classificado como "amarelo", indicando

que a região prioriza o crescimento econômico em detrimento das emissões de GEEs. Por outro lado, se o crescimento for menor nos índices tradicionais (GM ou M), o local é classificado como "verde", indicando que a região equilibra o crescimento econômico com as emissões de GEEs.

A hipótese a ser avaliada neste estudo é se existe ênfase no crescimento econômico em detrimento das emissões de GEEs para a produção agropecuária da Amazônia Legal. Alternativamente, o crescimento econômico pode ocorrer simultaneamente à diminuição das emissões de GEEs. Destaca-se que, até o presente momento, não foram encontrados na literatura estudos dedicados a explorar o tema abordado na região em questão, utilizando a base de dados proposta e empregando metodologia similar.

Além desta breve introdução, este trabalho é composto de outras cinco seções. Nas seções 2 e 3, são apresentados os trabalhos relacionados disponíveis na literatura. Na seção 4, apresenta-se a metodologia empregada nos cálculos. Na seção 5, apresentam-se os resultados obtidos e, na última seção, a seção 6, apresentam-se as conclusões.

2. Produtividade Total dos Fatores na agricultura brasileira

De acordo com Barros (1999), o conceito de PTF é relativamente simples. A PTF representa a variação na parte do crescimento do produto que não é explicada pela variação na quantidade de insumos, de forma que alterações no produto gerado por uma atividade podem ser atribuídas a duas fontes principais: variações nas quantidades empregadas de fatores ou mudanças na PTF.

Embora seja um conceito simples, a mensuração da PTF exige cautela, pois existe uma dificuldade em relacionar a teoria econômica, o processo de alocação mais eficiente dos recursos e o avanço tecnológico. Os avanços tecnológicos que geram aumentos na produtividade pecuária resultam de avanços em nutrição e melhoramento genético, manejo animal, qualidade das pastagens e inovações na gestão. Na agricultura, ocorre pelo avanço da biotecnologia, pelo uso de insumos estratégicos, pelas técnicas de fertilização e correção de solos, pela modernização de máquinas e melhorias nos processos produtivos (Euclides Filho, 2008; Ferreira e Vieira Filho, 2024; Martha Júnior et al., 2012; Vieira Filho, 2016)

No Brasil, alguns autores têm realizado estudos para mensurar a PTF na produção agropecuária, por meio de diversos métodos, bases de dados e períodos. Machado et al. (2020) realizaram uma revisão sistemática dos estudos que calcularam a PTF da agropecuária brasileira. Os autores se propuseram a discutir a evolução da produtividade da agricultura, especialmente para o Brasil, por diferentes óticas. Como resultado, a pesquisa confirma a tendência de crescimento da PTF da agricultura brasileira, embora diagnosticando a divergência em valores absolutos desse crescimento de acordo com o período analisado, o método empregado e os dados utilizados.

O estudo de Bragagnolo e Tateishi (2021), além de estimar a produtividade total dos fatores (PTF) para a agricultura (lavouras permanentes e temporárias) brasileira por meio de uma função de produção translog com dados em painel para o período 1995 a 2017, sintetiza os resultados obtidos por estudos que calcularam o crescimento da PTF para a agropecuária brasileira, cujos períodos de análise, bases de dados e metodologias utilizadas diferem.

No Quadro 1 é apresentada uma síntese dos trabalhos citados nos estudos de Machado et al. (2020); Bragagnolo et al. (2021) e Bragagnolo e Tateishi (2021). Os resultados apresentados por esses autores foram complementados com outros mais recentes.

Quadro 1. Trabalhos selecionados de estimativa da PTF para regiões do Brasil

Autores	Abrangência	Método	Período	Cresc. anual da PTF (%)	Dados
Bonelli e Fonseca (1998)	Brasil	Contabilidade do Crescimento	1975-1996	0,85	Setores econômicos de 1985 a 1996
Fulginiti e Perrin (1998)	Painel de países	Função Paramétrica e índice Malmquist	1961-1985	-0,03	18 países em desenvolvimento em 1961-1985
Pereira et al. (2002)	Brasil e UFs	Índice de Malmquist	1970-1980, 1970-1996	3,22, 1,90	Censo Agropecuário para 1970-1996
Nin et al. (2003)	Brasil	Índice de Malmquist	1961-1985	-0,18	FAO Stat
Vicente (2004)	Brasil e UFs	Índice de Malmquist	1970-1995	1,62	Censo Agropecuário e preços da FGV e IEA
Bravo-Ortega e Lederman (2004)	Painel de países	Fronteira Estocástica com Função Translog	1960-2000	1,93	Painel de países para 1960-2000
Fuglie (2008)	Painel de países	Função de Produção Cobb-Douglas estimada para Dados em Painel	1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2006	-0,54, 3,13, 3,00, 3,66	Diversos países para 1970-2006
Gasques et al. (2009)	Brasil e UFs	Índice Tornqvist	1975-2008, 2000-2008	3,66, 4,98	Índice Tornqvist para as UFs brasileiras 1975-2008
Mendes et al. (2009)	Painel de países	Dados em Painel com Efeitos Fixos e uma Função de Produção Cobb-Douglas com Retornos Constantes de Escala	1985-1994, 1995-2004	1, 1,06, 1,03	Anuários Estatísticos, Ipea, Embrapa e Censo para as UFs brasileiras para 1985-2004
Rada et al. (2009)	Brasil	Fronteira Estocástica	1995-2006	0,35	Censo agropecuário
Avila e Even-son (2010)	Painel de países	Contabilidade do Crescimento	1961-1980, 1981-2001, 1961-2001	0,49, 3,22, 1,86	FAO Stat para países selecionados para 1961-2001
Avila et al. (2010)	Brasil	Resíduo	1970-1995	3,54	Censo agropecuário
Bragagnolo et al. (2010)	Brasil, UFs e municípios	Fronteira Estocástica com Função Translog	1975-1985, 1985-1995, 1995-2006, 1975-2006	1,6, 2,2, 5,8, 3,2	Censo Agropecuário
					(continua)

Quadro 1. Trabalhos selecionados de estimativa da PTF para regiões do Brasil

					(conclusão)
Ludena (2010)	Painel de países	Índice de Malmquist	1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2007, 1961-2007	-0,6, 1,5, 3,4, 2,4, 2,8, 1,8	FAO Stat para 1961-2007
Brigatte e Teixeira (2011)	Brasil	Resíduo	1977-2005	0,47	Ipea Data, FGV, IBGE, Anfavea
Gasques et al. (2009)	Brasil e UFs	Índice Tornqvist	1970-2006	3,44	Censo Agropecuário
Rada e Buccola (2012)	Brasil e microrregiões do IBGE	Fronteira de Distância de Insumos Agrícolas com Função Cobb-Douglas Generalizada	1985-2006	2,62	558 microrregiões brasileiras
Gasques et al. (2014, 2016)	Brasil e UFs	Índice Tornqvist	1975-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2014, 1975-2014	3,18, 2,28, 2,98, 3,96, 4,03, 3,53	PAM e Censo Agropecuário (IBGE) para as UFs brasileiras
Helfand et al. (2015)	Painel de países	Fronteira Estocástica com Função de Produção	1985-2006	1,74	Censo agropecuário e FGV para o Brasil, calculado de acordo com a escala de área
Ferreira et al. (2016)	Painel de países	Fronteira Estocástica	1961-2010	0,08	Dados da <i>Penn World Table</i> para países da América Latina
International Food Policy Research Institute - IFRI (2018)	Painel de países em desenvolvimento	Índice Tornqvist para um Painel	1991-2000, 2001-2010, 2011-2014	1,4, 3,1, 0,6	Países em desenvolvimento
Santos e Spolador (2018)	Brasil	Resíduo de Solow	1981-2013	2,1	Ministério de Minas e Energia e Pnad
Lázari e Magalhães (2019)	Região Sudeste	Fronteira Estocástica com Função Translog	1985-2006	3,12	Sudeste, calculado de acordo com a escala de área
Bragagnolo et al. (2021)	Regiões Sudeste, Sul e Centro-oeste	Fronteira Estocástica com Função Translog	1995-2006, 2006-2017, 1995-2017	2,33, 3,73, 3,03	Censo Agropecuário
Ferreira e Vieira Filho (2024)	Painel de países	Índice de Tornqvist	1990-2018	3,7	FAO Stat para 10 países

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do estudo realizado por Machado et al. (2020); Bragagnolo et al. (2021); Bragagnolo e Tateishi (2021)

3. Produtividade Total dos Fatores e subprodutos indesejáveis

Vários estudos têm levado em consideração a existência de subprodutos indesejáveis, insumos indesejáveis ou o setor de energia nas medidas apresentadas com abordagens bastante variadas (Emrouznejad e Yang, 2018; Li et al., 2017; Shen et al., 2017; Shi e Li, 2019; Song et al., 2012; Sueyoshi et al., 2017; Zhou et al., 2008).

Os estudos de Chung et al. (1997) e Hailu e Veeman (2001) levam em consideração

insumos de energia e vários poluentes ambientais para estimar uma medida de PTF que leva em consideração subprodutos indesejáveis para os setores industriais sueco e canadense, respectivamente.

Kumar (2006) estima a PTF de países em desenvolvimento e desenvolvidos, por meio do índice de Malmquist (M) e de Malmquist-Luenberger (ML), incorporando insumos de energia e emissões de dióxido de carbono. Em trabalhos relacionados, Bragagnolo e Tateishi (2021); Myeki et al. (2023) e Ait Sidhoum (2023) estimaram a PTF por meio do índice de Malmquist e suas variações, comparando medidas de PTF tradicionais com outras que levam em consideração subprodutos gerados no processo de produção.

Mahlberg et al. (2011) examinaram as forças motrizes das mudanças “verdes” da PTF levando em consideração os GEEs. Os autores encontraram um crescimento de 22% na produtividade verde para o período de 1995 a 2004.

Alguns estudos apresentam análises voltadas para a China. Chen e Golley (2014) e Li e Lin (2015) mediram a PTF levando em consideração subprodutos indesejáveis para setores industriais chineses. Tian e Lin (2017) calcularam a PTF levando em consideração subprodutos indesejáveis para as exportações industriais chinesas. Liu e Feng (2019) realizaram uma medida da PTF que leva em consideração os subprodutos indesejáveis para o setor agrícola chinês.

Para o caso brasileiro, Bragagnolo e Tateishi (2021) estimaram a PTF e a sua relação com as emissões de dióxido de carbono na agricultura brasileira por meio do método de Malmquist e suas variações. Como resultado o estudo apontou que o crescimento da produtividade, da eficiência técnica e da mudança tecnológica contabilizados por meio dos índices que levam em consideração a existência de emissões de dióxido de carbono no setor são sensivelmente inferiores aos valores dos índices que não levam em consideração a existência destes subprodutos. O estudo indicou também que é possível aumentar a PTF agrícola sem elevar as emissões.

Em estudo que também inclui o caso brasileiro, Ferreira e Vieira Filho (2024) utilizaram dois índices comparativos de sustentabilidade produtiva na agricultura: um que considera o crescimento da PTF, incluindo as emissões de GEEs, e outro que avalia o efeito da poupança florestal. A análise foi realizada para as dez principais economias agroexportadoras do mundo nos últimos dez anos: Estados Unidos, Holanda, Brasil, Alemanha, França, Espanha, China, Itália, Canadá e Bélgica. Os resultados indicaram que é possível aumentar a produtividade agrícola e reduzir as emissões de GEEs, protegendo florestas. No período de 1990 a 2018, a PTF brasileira cresceu 3,1%, e a taxa de PTF por emissões totais aumentou 3,7%. Embora o crescimento da PTF por emissões do setor agropecuário tenha sido menor que o crescimento da PTF, o Brasil liderou o crescimento do índice de PTF por emissões de GEEs, tanto nas emissões totais quanto no setor agropecuário (Ferreira e Vieira Filho, 2024).

O Quadro 2 sintetiza as principais informações dos estudos dos autores Chung

Quadro 2. Trabalhos selecionados que incluem a geração de subprodutos indesejáveis no cálculo da PTF

Autores	Setor	Local	Período	Método	Cresc. em %
Chung et al. (1997)	Industrial - papel e celulose	Suécia	1986-1990	Malmquist (M), Malmquist-Luenberger (ML)	0,997%, 1,039%
Hailu e Veeman (2001)	Industrial - papel e celulose	Canadá	1959-1994	DEA com subprodutos	3,9%, 2,1%
Kumar (2006)	Toda a economia	41 países em desenvolvimento e desenvolvidos	1971-1992	Malmquist (M), Malmquist-Luenberger (ML)	0,9998%, 1,0002%
Mahlberg et al. (2011)	Toda a economia	14 países da União Europeia	1995-2004	DEA com subprodutos	1,2%, 1,23%
Zhang et al. (2011)	Industrial	China	2001-2008	Malmquist (M), Malmquist-Luenberger (ML)	1,048%, 1,025%
Chen e Golley (2014)	Industrial	China	1980-2010	Distância Direcional (DDF), Malmquist-Luenberger (ML)	2,4% (DDF), 2,5 (ML)%
Li e Lin (2015)	Industrial	China	1998-2011	Malmquist (M), Malmquist-Luenberger (ML)	10,03%, 2,66%-3,18%
Tian e Lin (2017)	Exportações industriais	China	1997-2002, 2002-2007, 2007-2012	Malmquist-Luenberger (ML)	1,169%, 1,123%, 1,089%
Liu e Feng (2019)	Agrícola	China	2005-2010, 2011-2016	DEA global com subprodutos	0,579%, 0,449%
Bragagnolo e Tateishi (2021)	Agrícola	Municípios brasileiros	2006-2017	Malmquist (M), Malmquist Global (GM), Malmquist-Luenberger (ML), M-Luenberger Global (GML)	5,13%, 5,10%, 0,63%, 0,40%
Myeki et al. (2023)	Agrícola	49 países africanos	2000-2019	Malmquist global (GM), Malmquist-Luenberger	0,90%, 0,60%
Ait Sidhoum (2023)	Agrícola	Catalunha - região nordeste da Espanha	2011-2015	Malmquist (M), Malmquist-Luenberger (ML)	0,998%, 0,027%
Ferreira e Vieira Filho (2024)	Agropecuária	Brasil e mais 9 países	1990-2018	Índice de Tornqvist - PTF por emissões	3,1%*

* Resultado para o Brasil.

Fonte: Elaboração própria com base em Bragagnolo e Tateishi (2021).

et al. (1997), Hailu e Veeman (2001), Kumar (2006), Mahlberg et al. (2011), Chen e Golley (2014), Li e Lin (2015), Li et al. (2017), Yang et al. (2017), Zhang et al. (2011), Li e Lin (2016), Song et al. (2018), Wang e Feng (2015), Tian e Lin (2017), Liu e Feng (2019), Bragagnolo e Tateishi (2021), Myeki et al. (2023), Ait Sidhoum (2023) e Ferreira e Vieira Filho (2024).

4. Metodologia e bases de dados

4.1 Metodologia

O Índice de Malmquist (1953), concebido para avaliar a variação da produtividade ao longo do tempo, ganhou destaque por meio de Caves et al. (1982b,a). Em trabalhos subsequentes, de acordo com as análises de Coelli et al. (1998), o índice passou a ser

aplicado no cálculo da Produtividade Total de Fatores (PTF), utilizando o conceito de função distância. Nessa abordagem, são comparadas medidas realizadas em dois períodos distintos, o período inicial (t) e o período final ($t+1$). A eficiência é então calculada com base na tecnologia de um dos dois períodos, podendo ser medida com orientação pelo insumo ou pelo produto.

Coelli et al. (1998) esclarecem que a orientação pelo produto mensura o quanto o produto pode ser aumentado proporcionalmente ao manter constante a quantidade de insumos utilizados. Em contrapartida, a orientação pelo insumo indica o quanto os insumos podem ser proporcionalmente reduzidos sem que haja uma diminuição correspondente na produção.

Segundo Chung et al. (1997), o índice de Malmquist é um índice de PTF que requer apenas informações sobre quantidades de fatores de produção e produtos. Em contrapartida, os índices de Fisher e Tornqvist, além dos dados de quantidade, requerem informações sobre preços dos fatores de produção e dos produtos. Isto torna esses índices inadequados para medir a produtividade na presença de bens não comercializáveis, como é o caso dos produtos indesejáveis aqui considerados.

Conforme Färe et al. (1994a,b), as funções de distância podem ser definidas como interpretações de funções de tecnologia de múltiplos produtos e/ou múltiplos insumos. O índice de Malmquist pode ser calculado por meio de um modelo de programação linear do tipo análise envoltória de dados (DEA). A função distância de Shephard, utilizada por Malmquist (1953), pode ser definida de acordo com a expressão (1) Färe et al. (1989); Färe et al. (1994a,b).

$$D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}) = \inf \left\{ \theta : \left(x^{t+1}, \frac{y^{t+1}}{\theta} \right) \in S^t \right\} \quad (1)$$

Em que $D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})$ mede a eficiência técnica de uma unidade de produção no período $t+1$ ao usar os fatores y para produzir x , e S^t é o conjunto de possibilidades de produção no período $t+1$.

De acordo com Färe et al. (1994b), a função distância mede a mudança proporcional máxima do produto necessária para tornar o par ordenado de produtos e fatores de produção (x^{t+1}, y^{t+1}) viável em relação à tecnologia disponível em t . Färe et al. (1989); Färe et al. (1994a,b) definem a mudança no índice de produtividade de Malmquist baseada no produto com a média geométrica de dois índices de produtividade de Malmquist conforme definido por Caves et al. (1982b,a) e que é representado pelas Expressões (2) e (3). As Expressões (4) e (5) apresentam a estimativa para a mudança na eficiência técnica (EC) e para a mudança tecnológica (TC).

$$M^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \left[\frac{(D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}))}{(D_0^t(x^t, y^t))} \cdot \frac{(D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}))}{(D_0^{t+1}(x^t, y^t))} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$M^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = EC_M^{t,t+1} \times TC_M^{t,t+1} \quad (3)$$

$$EC_M^{t,t+1} = \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \quad (4)$$

$$TC_M^{t,t+1} = \left[\frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \cdot \frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Na qual $M^{t,t+1}$ representa o índice de produtividade de Malmquist para o crescimento no período t para $t + 1$, a equação $EC_M^{t,t+1}$ é a mudança na eficiência técnica do período t para $t + 1$ e a equação $TC_M^{t,t+1}$ é a mudança tecnológica para o índice de Malmquist do período t para $t + 1$.

O índice de Malmquist Global (GM), desenvolvido por Pastor e Lovell (2005), baseia-se em uma tecnologia de produção que considera o progresso tecnológico acumulado ao longo do tempo, sendo considerado um índice circular por sua capacidade de comparar diretamente a produtividade em múltiplos períodos. Isso o diferencia do índice de Malmquist tradicional (M), que avalia a produtividade dentro do contexto tecnológico do período em análise, sem considerar o progresso tecnológico acumulado e focando em períodos consecutivos. Pastor e Lovell (2005) afirmam que o índice de Malmquist tradicional pode gerar sinais conflitantes e não ser adequado para análises de longo prazo. Em contraste, o índice de Malmquist Global (GM) fornece medidas consistentes da mudança de produtividade.

Ambos os índices comparam x^{t+1}, y^{t+1} a x^t, y^t , mas usam referências diferentes. Pastor e Lovell (2005) definiram a tecnologia de referência global como $T_C^G = \text{conv}\{T_C^1 \cup \dots \cup T_C^T\}$ e a tecnologia de referência contemporânea, com retornos constantes de escala (c), como $T_C^t = \{(X^t, Y^t) \mid X^t\}$. Os autores definem a função de distância com retornos constantes à escala (CRS) de acordo com a Expressão (6).

$$D^G(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \min \left\{ \theta > 0 \mid \frac{(x, y)}{\theta} \in T_C^G \right\} \quad (6)$$

Seguindo a proposta de Pastor e Lovell (2005), o índice de Malmquist Global $GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1})$ para um produto com a tecnologia T_C^G do período t para $t + 1$ pode ser representado de acordo com as duas primeiras equações, as Expressões (7) e (8). As Expressões (9) e (10) correspondem à: mudança na eficiência ($EC_{GM}^{t,t+1}$) do período t para $t + 1$; e à mudança tecnológica ($BPC_{GM}^{t,t+1}$) do período t para $t + 1$, respectivamente.

$$GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{D^G(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^G(x^t, y^t)} \quad (7)$$

$$GM^{t,t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = EC_{GM}^{t,t+1} \times \frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} = EC_{GM}^{t,t+1} \times TC_{GM}^{t,t+1} \quad (8)$$

$$EC_{GM}^{t,t+1} = \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \quad (9)$$

$$BPC_{GM}^{t,t+1} = \left(\frac{D^G(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \left(\frac{D^t(x^t, y^t)}{D^G(x^t, y^t)} \right) \quad (10)$$

O índice de produtividade de Malmquist-Luenberger (ML), que foi desenvolvido por Chung et al. (1997), inclui no cálculo da produtividade os subprodutos indesejáveis gerados nos processos produtivos. Para tanto, os autores passam a usar uma função de distância direcional (DDF) do produto ao invés da distância de Shephard. O modelo com subprodutos indesejáveis é calculado assumindo-se retornos constantes de escala (CRS). Formalmente, de acordo com Chung et al. (1997), a DDF é definida de acordo com a Expressão (11).

$$\vec{D}_0(x, y, b; g) = \sup \{ \beta \mid (y, b) + \beta g \in P(x) \} \quad (11)$$

O índice de produtividade Malmquist-Luenberger (ML) orientado para a produção, com a inclusão de produtos indesejáveis, bem como, a mudança na eficiência técnica (EC) e a mudança tecnológica (TC) para este modelo, são apresentadas nas Expressões (12), (13), (14) e (15).

$$ML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \left[\left(\frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \times \left(\frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$ML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = EC_{ML}^{t,t+1} \times TC_{ML}^{t,t+1} \quad (13)$$

$$EC_{ML}^{t,t+1} = \frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \quad (14)$$

$$TC_{ML}^{t,t+1} = \left[\frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t, -b^t)} \times \frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, -b^{t+1})} \right]^{1/2} \quad (15)$$

Na qual $ML^{t,t+1}$ representa a variação no índice de produtividade Malmquist-Luenberger

do período t para $t + 1$. O índice $EC_{ML}^{t,t+1}$ representa a mudança na eficiência técnica do período t para $t + 1$ para o índice de Malmquist-Luenberger. Caso $EC_{ML}^{t,t+1} > 1$, (ganho de eficiência) ou $EC_{ML}^{t,t+1} < 1$ (perda de eficiência), indica-se a diferença em relação à fronteira tecnológica de referência. O índice $TC_{ML}^{t,t+1}$ representa a mudança tecnológica para o índice de Malmquist-Luenberger do período t para $t + 1$. Se uma fronteira tecnológica de referência contemporânea muda na direção de mais (menos) produto desejável e menos (mais) produto indesejável, então $TC_{ML}^{t,t+1} > 1$ ($TC_{ML}^{t,t+1} < 1$). A mudança no índice de produtividade, por sua vez, é determinada pelo efeito simultâneo destas duas mudanças.

Oh (2010, 010b) propôs uma alteração nos modelos apresentados anteriormente, o modelo conhecido como índice de produtividade Global Malmquist-Luenberger (GML), que também busca identificar os subprodutos indesejáveis, mas agora no contexto de uma tecnologia de produção global. Assim como no índice GM, para definir o índice GML, consideram-se duas tecnologias de referência: a tecnologia de referência contemporânea e a tecnologia de referência global. Na tecnologia de referência contemporânea, o conjunto de produção é construído exclusivamente em um único período t . A tecnologia de referência global, por sua vez, incorpora informações para todos os períodos ($t = 1, \dots, T$) disponíveis na amostra de dados em painel para o problema em questão. Neste modelo, o índice GML incorpora as heterogeneidades ex-ante entre os grupos no cálculo do crescimento da produtividade do índice. De acordo com Oh (2010, 010b), se uma atividade de produção gera mais (ou menos) produtos desejáveis e menos (ou mais) subprodutos indesejáveis, o resultado poderá ser o valor maior (ou menor) do que 1, mostrando ganho (ou perda) de produtividade. O índice GML, a mudança na eficiência técnica (EC) e a mudança tecnológica (BPC) para o modelo proposto por Oh (2010, 010b) são definidas de acordo com as Expressões (16), (17), (18) e (19).

$$GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (16)$$

$$GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{TE^{t+1}}{TE^t} \times \frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} = EC_{GML}^{t,t+1} \times TC_{GML}^{t,t+1} \quad (17)$$

$$EC_{GML}^{t,t+1} = \frac{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (18)$$

$$BPC_{GML}^{t,t+1} = \frac{\frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}}{\frac{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}} \quad (19)$$

Na qual a função de distância direcional

$$D^G(x, y, b) = \max\{\beta \mid (y + \beta y, b - \beta b) \in P^G(x)\},$$

é definida no conjunto de tecnologia global P^G . TE^{t+1} é a eficiência técnica e $EC_{GML}^{t,t+1}$ é a mudança de eficiência. A expressão $BPG^{t,t+1}$ é o intervalo para a melhor prática entre uma fronteira de tecnologia contemporânea e uma fronteira de tecnologia global ao longo do tempo na direção (y^s, b^s) . Portanto, $BPC_{GML}^{t,t+1}$, é o intervalo com relação à melhor prática entre os dois períodos, ou seja, a expressão (19) mede a mudança tecnológica entre os dois períodos. De acordo com Oh (010b), se uma atividade de produção gera mais (ou menos) produtos desejáveis e menos (ou mais) subprodutos indesejáveis, então o valor de $GML^{t,t+1}$ pode ser maior (ou menor) do que 1, indicando ganho (ou perda) de produtividade.

Oh (010b) apresenta uma classificação de acordo com um código de cores, na qual: i) se um local apresenta índices de crescimento da produtividade ambientalmente sensíveis (GML ou ML) maiores do que os índices de crescimento da produtividade típicos (GM ou M), o crescimento econômico ocorre simultaneamente à diminuição das emissões (Oh, 010b) e o local é classificado como “verde”; ii) se, por outro lado, o índice de crescimento da produtividade ambientalmente sensível de um país for menor do que o índice de crescimento da produtividade típica, existe uma ênfase no crescimento econômico em detrimento das questões ambientais e o país é classificado como “amarelo”.

Seguindo a lógica proposta por Oh (010b), neste estudo os municípios analisados serão classificados em dois grupos: um grupo como o primeiro descrito, que convencionou-se chamar de municípios “verdes” e um segundo grupo como o descrito posteriormente, que convencionou-se chamar de municípios “amarelos”.

4.2 Base de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa compreendem informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG.

Como *proxy* para a produção agropecuária, optou-se por utilizar o Produto Interno Bruto (PIB) agropecuário, a preços de 2010, de cada município analisado nos anos de 2005 e 2017 que são divulgados pelo IBGE e disponibilizados pelo IPEA (2020). Destaca-se que em 2006 ocorreu uma significativa quebra na safra, resultando em uma acentuada redução no PIB do setor, especialmente no estado do Mato Grosso que teve seu PIB agropecuário reduzido pela metade. Para minimizar o efeito dessa quebra e evitar possíveis distorções na estimativa, foram empregados dados do PIB Agropecuário referentes ao ano de 2005.

Foram utilizados dados dos Censos Agropecuários do IBGE de 2005/2006 e de

2017 para mensurar o trabalho na agropecuária. Adotou-se como proxy para o trabalho, a variável pessoal ocupado com e sem laço de parentesco com o produtor.

No que tange a mensuração do capital, também foram utilizados dados dos Censos Agropecuários do IBGE de 2005/2006 e de 2017 (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009, 2019). As *proxies* utilizadas foram o número de tratores para a agricultura e o número de cabeças de gado para a pecuária.

Para a variável terra, empregou-se como *proxy* a área plantada em hectares para lavouras temporárias e permanentes, extraídas da Produção Agrícola Municipal – PAM, divulgada pelo IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019) para os anos de 2006 e 2017. Já para a pecuária, a *proxy* adotada foi a área de pastagem em hectares, utilizando também dados dos Censos Agropecuários e para os mesmos anos.

Complementarmente, foram empregados dados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2022) para os anos de 2006 e 2017, expressos em dióxido de carbono equivalente (CO_2e)¹ e calculados pela métrica de Potencial de Aquecimento Global (GWP)².

Com o objetivo de captar de forma mais abrangente e precisa a variabilidade tecnológica na produção agropecuária da Amazônia Legal, optou-se por empregar dados a nível municipal em vez de dados estaduais agregados. No processo de construção da base de dados, alguns dos 772 municípios que compõem a Amazônia Legal foram excluídos da base devido à indisponibilidade de pelo menos uma das informações necessárias para o cálculo do modelo proposto em um dos anos. Dessa forma, a amostra final utilizada abrange dados de 647 municípios da região para os anos de 2006 e 2017, resultando em um painel composto por 1.294 observações. O Anexo A apresenta as estatísticas descritivas das variáveis empregadas no cálculo do modelo.

5. Resultados e discussão

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados para as taxas de crescimento dos índices de produtividade, mudança na eficiência técnica (EC) e mudança tecnológica (TC e BPC) para a agropecuária na Amazônia Legal. Elas apresentam, respectivamente, a média ponderada pelo PIB Agropecuário e a média simples para os estados analisados.

Com base nos resultados desses índices, pode-se concluir que houve crescimento positivo da produtividade na Amazônia Legal. Isso significa que o valor calculado por meio dos índices de produtividade para todos os modelos é superior a um, tanto

¹O dióxido de carbono equivalente CO_2e é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de diversos GEE pelo seu potencial de aquecimento global (GWP), proporcionando comparar as emissões desses diversos GEE (Observatório do clima, 2023).

²Dois métricas são usualmente mais utilizadas para determinar o impacto dos GEEs: o GWP (Global Warming Potential) e o GTP (Global Temperature Change Potential). O primeiro considera a influência desses gases na alteração do balanço energético da Terra e, o segundo considera sua influência no aumento de temperatura. Ambos são medidos para um prazo de cem anos e expressam seus resultados em uma unidade comum, o equivalente de CO_2 (CO_2e); entretanto, o GWP é a abordagem mais utilizada e a considerada nesse estudo (Observatório do clima, 2023).

para a média ponderada quanto para a média simples, o que condiz com os estudos apresentados na seção 2 e é congruente com o padrão de crescimento da PTF esperado para a agricultura brasileira.

Entretanto, ao examinar os índices agregados por estado, constata-se que alguns são exceção a esse crescimento positivo. Tanto pela média ponderada quanto pela média simples, os estados do Acre, do Amapá, do Maranhão e de Roraima apresentaram diminuição nos índices GML e ML. Em relação aos índices GM e M, apenas o estado do Acre apresentou decréscimo. Por outro lado, para todos os índices calculados, o estado com o maior ganho de produtividade no período analisado foi o Amazonas.

Percebe-se também que os índices que incorporam as emissões (GML e ML) apresentaram crescimento inferior aos índices que não consideram as emissões, o que é consistente com os estudos apresentados na seção 3. Esses resultados confirmam que o crescimento da PTF tende a ser menor quando as emissões de GEEs são consideradas no cálculo.

Em relação à mudança na eficiência técnica (EC), os índices que levam em consideração as emissões (ML e GML), novamente, apresentaram menor crescimento em relação aos que não consideram (M e GM). Os estados do Acre, do Amapá, do Maranhão, de Rondônia e de Roraima tiveram crescimento negativo para os índices ML e GML e apenas o estado do Acre apresentou decréscimo para os índices M e GM. No que tange a mudança na eficiência técnica (EC), o estado do Amazonas apresentou o maior ganho de eficiência, com uma diferença considerável em relação ao estado de Rondônia que teve a segunda maior eficiência para ambos os índices.

Para a mudança tecnológica (TC e BPC), observa-se crescimento positivo para todos os índices calculados. Com relação à mudança tecnológica (BPC) para os índices que consideram as emissões de GEEs (ML e GML), o estado do Mato Grosso apresentou decréscimo para o índice ML e crescimento positivo para o índice GML. Os demais estados apresentaram crescimento positivo para a mudança tecnológica (BPC) para ambos os índices (ML e GML). Com relação à mudança tecnológica (TC) para os índices que não consideram os GEEs (M e GM), apenas o estado do Mato Grosso teve crescimento negativo para o índice GM, e os estados do Mato Grosso e do Pará para o índice M.

De forma geral, a PTF, medida pelos índices propostos, apresentou crescimento positivo para a Amazônia Legal no período analisado, de 2006 a 2017. Os resultados apontam que esse crescimento se deve principalmente a melhorias na eficiência técnica, em vez de avanços tecnológicos. Entretanto, os resultados são heterogêneos entre os estados. Mato Grosso e Pará destacaram-se por apresentarem mudanças superiores na eficiência técnica em relação à mudança tecnológica.

Tabela 1. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal calculadas pelas médias ponderadas pelo produto para os índices GML, ML, GM e M – 2006 a 2017

UF	GML			ML			GM			M		
	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	TC	Prod.	EC	TC
AC	0,9968	0,9764	1,0222	0,9942	0,9764	1,0188	0,9460	0,8056	1,2067	0,8965	0,8056	1,1386
AM	1,2699	1,2440	1,0317	1,3332	1,2440	1,0647	2,9247	2,9386	1,0178	3,0500	2,9386	1,0291
AP	0,8916	0,8839	1,0076	0,9080	0,8839	1,0296	1,2702	1,1601	1,0522	1,3210	1,1601	1,1074
MA	0,9888	0,9791	1,0137	0,9829	0,9791	1,0024	1,1756	1,1165	1,0561	1,1642	1,1165	1,0170
MT	1,0297	1,0266	1,0051	1,0182	1,0266	0,9918	1,2832	1,3208	0,9957	1,3230	1,3208	0,9926
PA	1,0246	1,0110	1,0255	1,0460	1,0110	1,0269	1,6714	1,6033	1,0427	1,6281	1,6033	0,9849
RO	1,0069	0,9977	1,0096	1,0062	0,9977	1,0081	1,9676	1,7316	1,1423	1,9465	1,7316	1,1175
RR	0,9946	0,9783	1,0188	0,9886	0,9783	1,0071	1,2975	1,1769	1,0821	1,2660	1,1769	1,0600
TO	1,0088	1,0034	1,0082	1,0065	1,0034	1,0006	1,7495	1,7019	1,0339	1,7463	1,7019	1,0129
Total	1,0235	1,0112	1,0158	1,0315	1,0112	1,0167	1,5873	1,5061	1,0700	1,5935	1,5061	1,0511

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 2. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal calculadas pelas médias simples pelo produto para os índices GML, ML, GM e M – 2006 a 2017

UF	GML			ML			GM			M		
	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	TC	Prod.	EC	TC
AC	0,9965	0,9754	1,0230	0,9936	0,9754	1,0192	0,9409	0,7979	1,2136	0,8902	0,7979	1,1431
AM	1,2507	1,2303	1,0289	1,3156	1,2303	1,0627	2,9267	2,9493	1,0154	3,0783	2,9493	1,0352
AP	0,9454	0,9366	1,0087	0,9607	0,9366	1,0271	1,3642	1,2482	1,0415	1,4093	1,2482	1,0808
MA	0,9837	0,9791	1,0136	0,9828	0,9791	1,0023	1,1789	1,1199	1,0557	1,1674	1,1199	1,0164
MT	1,0299	1,0268	1,0051	1,0183	1,0268	0,9917	1,2836	1,3218	0,9952	1,3234	1,3218	0,9920
PA	1,0250	1,0117	1,0254	1,0470	1,0117	1,0271	1,6800	1,6113	1,0432	1,6388	1,6113	0,9888
RO	1,0069	0,9977	1,0096	1,0061	0,9977	1,0080	1,9729	1,7359	1,1428	1,9514	1,7359	1,1175
RR	0,9936	0,9766	1,0196	0,9867	0,9766	1,0066	1,2697	1,1486	1,0828	1,2371	1,1486	1,0599
TO	1,0899	1,0034	1,0082	1,0064	1,0034	1,0006	1,7527	1,7057	1,0334	1,7496	1,7057	1,0123
Total	1,0203	1,0115	1,0134	1,0226	1,0115	1,0079	1,5456	1,4936	1,0447	1,5465	1,4936	1,0182

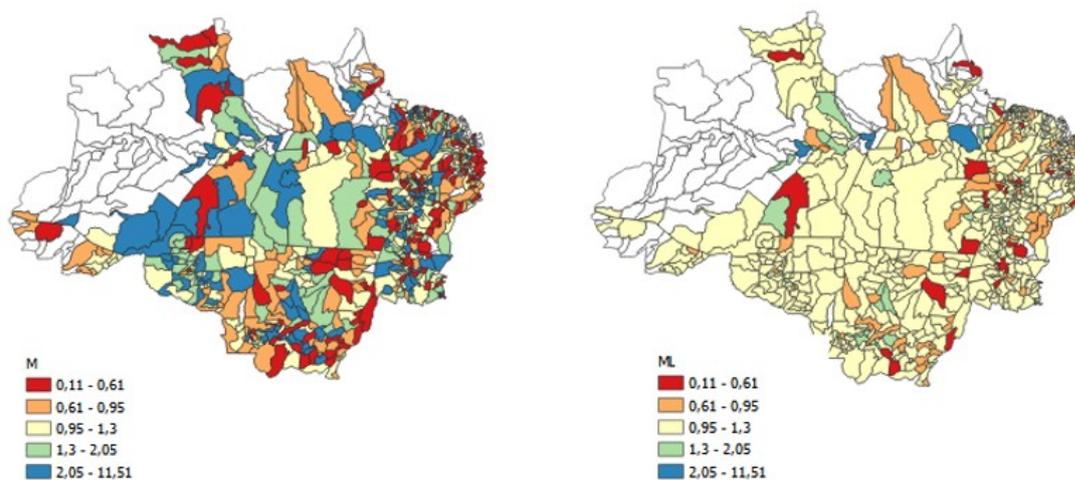
Fonte: Resultados da pesquisa.

Para uma melhor compreensão dos resultados, a Figura 1 apresenta a distribuição espacial do crescimento da PTF com classes definidas a partir dos quintis da variável e calculada pelos índices M e ML para os municípios da amostra para o período de 2006 a 2017.

A Figura 2 ilustra a distribuição espacial do crescimento da PTF entre 2006 e 2017 nos municípios da amostra avaliada, utilizando classes definidas pelos quintis, por meio dos índices que consideram a tecnologia global, GM e GML.

A Tabela 3 apresenta o número de municípios e o percentual de municípios “verdes” para cada estado da Amazônia Legal Brasileira. Conforme apresentado na seção de metodologia, se os resultados da produtividade para o índice GML ou ML forem

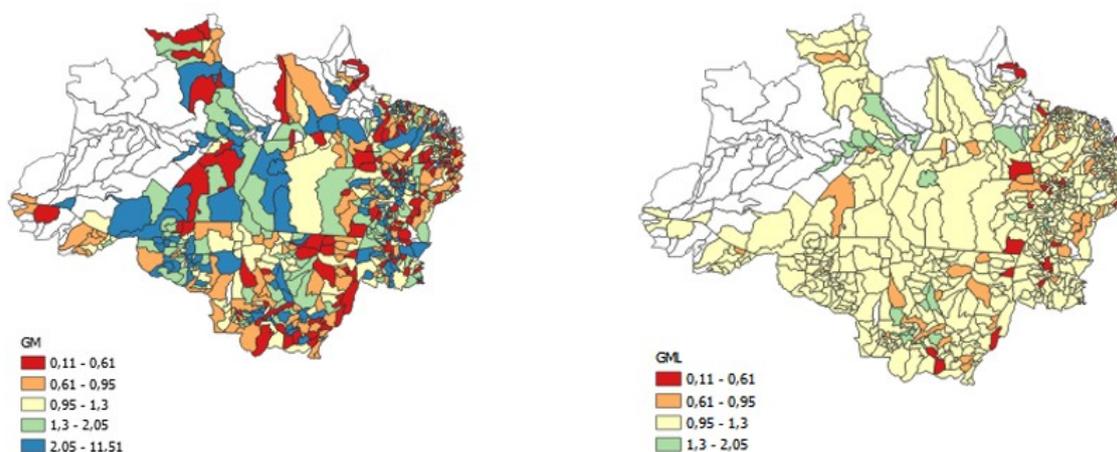
Figura 1. Crescimento anual da PTF nos municípios da Amazônia Legal entre os anos de 2006 e 2017 - índice de Malmquist tradicional (M), que não considera as emissões de CO2 equivalente, e índice de Malmquist-Lundemberg (ML), que considera as emissões de CO2 equivalente



Fonte:

Resultados da pesquisa.

Figura 2. Crescimento da PTF nos municípios da Amazônia Legal entre os anos de 2006 e 2017 – índice de Malmquist Generalizado (GM), que não considera as emissões de CO2 equivalente, e índice de Malmquist-Lundemberg Generalizado (GML), que considera as emissões de CO2 equivalente



Fonte: Resultados da pesquisa.

maiores que os resultados dos índices GM ou M, considera-se que há crescimento da PTF com diminuição das emissões, portanto o município é “verde”. Alternativamente, se os índices GML ou ML apresentarem valores menores do que os índices GM ou M, isso indica que há ênfase no crescimento econômico em detrimento das questões ambientais e, portanto, o município é classificado como “amarelo”.

Tabela 3. Número de municípios “verdes” e percentual de municípios “verdes” para os estados da Amazônia Legal comparando-se os resultados das produtividades para os índices ML e M e os índices GML e GM

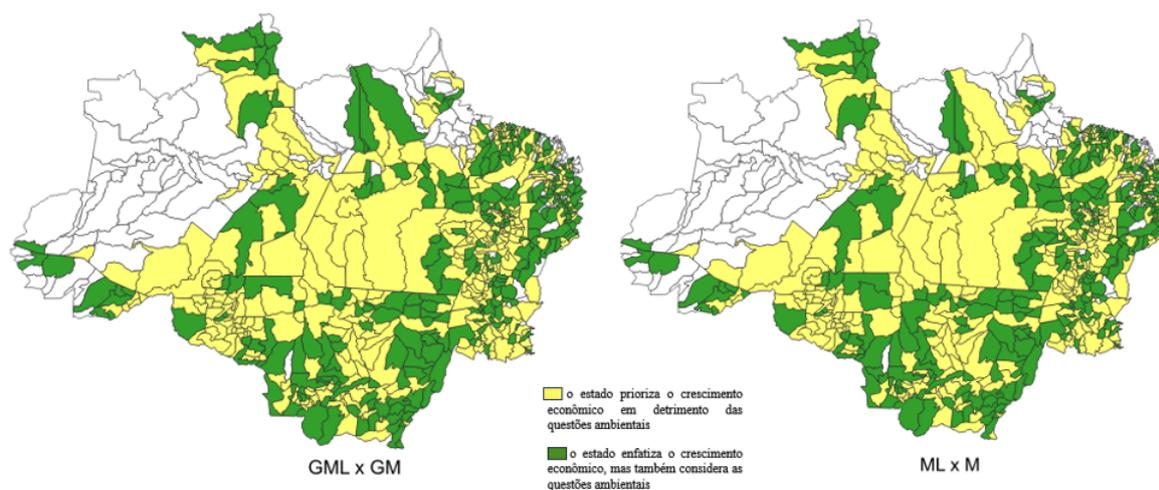
UF	Quantidade de Municípios	Quantidade de municípios “verdes”		Percentual de municípios “verdes”	
		GML vs. GM	ML vs. M	GML vs. GM	ML vs. M
AC	13	8	9	62%	69%
AM	26	4	4	15%	15%
AP	7	3	3	43%	43%
MA	142	78	75	55%	53%
MT	140	72	73	51%	52%
PA	121	57	62	47%	51%
RO	52	10	11	19%	21%
RR	14	9	9	64%	64%
TO	132	45	47	34%	36%
Total	647	286	293	44%	45%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados mostram que Roraima tem o maior percentual de municípios “verdes”, com 64% para os índices GML e GM. Dos quatorze municípios analisados para o estado, nove possuem classificação “verde”. Para a comparação dos índices ML e M, o estado do Acre teve o maior percentual de municípios “verdes”, com 69%. Dos treze municípios analisados, nove foram considerados “verdes”.

Para a Amazônia Legal como um todo, 44% dos municípios foram considerados “verdes” na comparação entre os índices GML e GM, totalizando 286 dos 647 municípios. Na comparação entre os índices ML e M, 45% dos municípios foram classificados como “verdes”, correspondendo a 293 dos 647 municípios analisados. A Figura 3 apresenta a distribuição geográfica da comparação dos resultados entre os índices GML e GM, bem como ML e M, por meio da classificação usando o código de cores.

Figura 3. Resultados das relações entre as produtividades calculadas por meio dos índices GML x GM e ML x M para os municípios da Amazônia Legal entre 2006 e 2017



Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados indicam que os índices de PTF que consideram subprodutos indesejáveis tendem a apresentar um crescimento menor em comparação aos índices tradi-

cionais de PTF. Esse padrão também foi identificado em estudos internacionais. Myeki et al. (2023) analisaram o setor agrícola de 49 países africanos usando os índices de Malmquist (M) e Malmquist-Luenberger (ML), encontrando resultados semelhantes. Ait Sidhoum (2023) utilizou os mesmos índices para avaliar o setor agrícola da Catalunha, na região nordeste da Espanha, e obteve conclusões equivalentes. Estudos de Li e Lin (2015) e Zhang et al. (2011) também observaram menor crescimento da PTF ao incorporar subprodutos indesejáveis na análise de setores industriais na China.

Na década de 1990, o monitoramento realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicou que o desmatamento na Amazônia Legal estava concentrado em poucas regiões, com 76% dos novos desmatamentos ocorrendo na área que passou a ser denominada de "Arco do Desmatamento". Em 1998, quase 80% do desmatamento concentrava-se nos estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia (Margulis, 1990).

A Figura 3 mostra que os municípios localizados nessa região tendem a ser classificados como "verdes". Isso pode estar relacionado ao fato de que o desmatamento, e a consequente emissão de GEEs provenientes desse desmatamento, ocorreram nesses municípios antes do período analisado, ou seja, antes de 2005/06. No período posterior ao início da análise, foram implementadas políticas públicas que conceberam e delinearam uma série de programas destinados a conter o desmatamento e promover o desenvolvimento sustentável, sob a perspectiva da conservação da floresta na Amazônia Legal. Essas políticas proporcionaram reforço e melhorias nos sistemas de monitoramento, como o Sistema de Vigilância Ambiental (SIVAM) e o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) (Andersen et al., 2002).

Além disso, dois acontecimentos contribuíram para a redução do desmatamento na Amazônia Legal em 2007, no início do período analisado. O primeiro foi o cenário econômico que resultou na queda nos preços dos principais produtos de exportação da região, a soja e a carne bovina. Nesse período, houve um aumento de 80% no valor do Real em comparação com o Dólar norte-americano, tornando as exportações menos rentáveis para a agropecuária, que tinha suas despesas em moeda nacional e receitas provenientes de exportações em Dólares (Fearnside, 2001).

O segundo acontecimento está relacionado a iniciativas da agroindústria, que realizou duas ações para diminuir a taxa de desmatamento, complementando as medidas do governo e respondendo à pressão de organizações ambientais internacionais e de consumidores preocupados com o meio ambiente. A primeira ação foi a "moratória da soja", em 2006, que excluiu da compra pelas indústrias toda a soja plantada em áreas desmatadas após essa data. Esta ação serviu de modelo para a "moratória da carne" de 2009, implementada pelos quatro maiores frigoríficos da época, que excluía de compra o gado proveniente de áreas desmatadas após a moratória (Macedo et al., 2012).

Essas medidas desaceleraram o desmatamento e parecem ter impactado mais as

áreas que já haviam sido desmatadas do que as áreas ainda não desmatadas, resultando em uma desaceleração na abertura de novas áreas no "Arco do Desmatamento".

6. Considerações finais

O desmatamento na região da Amazônia Legal é considerado um importante contribuinte para as emissões brasileiras de gases de efeito estufa. A minimização dessas emissões pode ser alcançada por meio de um uso mais eficiente das áreas destinadas à agropecuária na região. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na região da Amazônia Legal utilizando métodos de medida da PTF que contemplam a geração da emissão de gases de efeito estufa (GEEs) na produção (Malmquist-Luenberger – ML e Malmquist-Luenberger generalizado – GML) comprando-os com métodos que não contemplam (Malmquist – M e Malmquist generalizado – GM).

Os resultados apontaram para um crescimento da produção agropecuária, entre os anos de 2006 e 2017, para todas as variáveis, sendo que as variáveis para o capital na agricultura e na pecuária, medidas por meio das proxies tratores e cabeça de gado, respectivamente, apresentaram os crescimentos mais relevantes. As medidas de PTF por meio dos índices GML e ML, que levam em consideração a emissão de GEEs, comparada com as medidas de PTF que não consideram a presença de subproduto, calculadas pelos índices GM e M, indicam que os primeiros retratam um crescimento da produtividade, da eficiência técnica e da mudança tecnológica inferiores aos índices tradicionais GM e M. Isso indica que o crescimento dessas variáveis é inferior quando são consideradas no cálculo as emissões de GEEs.

Os resultados também demonstraram que pela comparação dos métodos GML e ML para os 647 municípios, 286 podem ser considerados “verdes”, o que equivale a cerca de 44% da amostra. Este resultado é similar ao obtido na comparação entre os métodos GM e M, na qual 293 municípios ou cerca de 45% do total podem ser considerados “verdes”. Assim, para a Amazônia Legal, no período entre 2005 e 2017, para pouco menos da metade dos municípios, os considerados “verdes”, o crescimento econômico da agropecuária ocorreu simultaneamente à diminuição das emissões de GEEs e, portanto, para a maioria dos municípios, os considerados “amarelos”, houve ênfase no crescimento econômico em detrimento da conservação ambiental.

Destaca-se que a implementação de políticas públicas abrangentes e integradas é crucial para combater o desmatamento na Amazônia Legal e reduzir as emissões de GEEs na região. O fortalecimento da fiscalização e o monitoramento, a regularização fundiária sustentável, o estímulo a práticas agropecuárias sustentáveis e o desenvolvimento de cadeias produtivas responsáveis têm papel fundamental nesse processo. A educação ambiental e o engajamento comunitário, aliados a restrições ao uso de recursos naturais, contribuem para uma abordagem mais abrangente para o problema. Incentivos à recuperação de áreas degradadas, cooperação internacional, fomento de

alternativas econômicas sustentáveis e criação e reforço de unidades de conservação compõem um conjunto de medidas essenciais para preservar a rica biodiversidade amazônica e assegurar o almejado equilíbrio entre o desenvolvimento de atividades econômicas e a conservação ambiental.

Ressalta-se a dificuldade encontrada na análise devido à heterogeneidade da Amazônia Legal, que abrange áreas com características socioeconômicas e territoriais diversas. Destaca-se também a necessidade de exclusão de um número significativo de municípios da base de dados, já que 125 dos 772 municípios que compõem a Amazônia Legal foram excluídos da base de dados devido à indisponibilidade de pelo menos uma das informações necessárias para o cálculo dos índices. Apesar de os municípios excluídos representarem apenas 16,2% do total de municípios da Amazônia Legal, é importante notar que eles estão geograficamente concentrados. A maioria desses municípios está situada em quatro estados: Amazonas, Acre, Roraima e Pará, todos localizados na porção Noroeste da Amazônia Legal.

Por fim, pesquisas futuras que consigam captar a heterogeneidade da Amazônia Legal com mais detalhes podem proporcionar resultados complementares aos aqui apresentados. Esses resultados podem ajudar na formulação de políticas públicas mais eficazes para promover o crescimento econômico da agropecuária e ao mesmo tempo contribuir para a redução das emissões de GEEs na região.

Referências

- Ait Sidhoum, A. (2023). Measuring farm productivity under production uncertainty. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 67(4):672–687.
- Andersen, L. E., Granger, C. W. J.; Reis, E. J., Weinhold, D., e Wunder, S. (2002). *The Dynamics of Deforestation and Economic Growth in the Brazilian Amazon*. Cambridge University Press.
- Avila, A., Romano, L., e Garagorry, F. (2010). Agricultural productivity in latin america and the caribbean and sources of growth. In: Evenson, R.; Pingali, P., editor, *Handbook of Agricultural Economics*, volume 4, Página 3713–3768. Elsevier, Burlington.
- Avila, A. F. D. e Evenson, R. E. (2010). Total factor productivity growth in agriculture. the role of technological capital. In: J. Arrow, K. M. D. I., editor, *Handbook of Agricultural Economics*, volume 4, Página 3769–3822. 1 edition.
- Barros, A. L. M. D. (1999). *Capital, produtividade e crescimento da agricultura: o Brasil de 1970 a 1995*.
- Bonelli, R. e Fonseca, R. (1998). Ganhos de produtividade e eficiência: novos resultados para a economia brasileira. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, 28(02):273–314.

- Bragagnolo, C., Spolador, H. F., e Barros, G. d. C. (2010). Regional brazilian agriculture tfp analysis: a stochastic frontier analysis approach. *Revista Economia*, 11(4):217–242.
- Bragagnolo, C., Spolador, H. F. S., e Barros, G. S. C. (2021). Produtividade total dos fatores na agricultura brasileira: resultados atualizados a partir do censo 2017. *Revista de Política Agrícola*, 30.
- Bragagnolo, C. e Tateishi, H. R. (2021). Produtividade total dos fatores e emissões de dióxido de carbono na agricultura brasileira: Uma medida de ptf ambientalmente sensível. Texto para discussão, ANPEC.
- Bravo-Ortega, C. e Lederman, D. (2004). Agricultural productivity and its determinant : revisiting international experiences. *Estudios de Economía*, 31:133–163.
- Brigatte, H. e Teixeira, E. (2011). Determinantes de longo prazo do produto e da produtividade total dos fatores da agropecuária brasileira no período 1974-2005. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 49:815–836.
- Byerlee, D., Stevenson, J., e Villoria, N. (2014). Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation? *Global Food Security*.
- Caves, D. W., Christensen, L. R., e Diewert, W. E. (1982a). The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, Página 1393–1414.
- Caves, D. W., Christensen, L. R., e Diewert, W. E. (1982b). Multilateral comparisons of output, input, and productivity using superlative index numbers. *The Economic Journal*, 92(365):73.
- CEPEA, C. D. E. A. E. E. A. (2024). Desempenho das exportações do agronegócio. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indices-de-exportacao-do-agronegocio.aspx>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Chen, S. e Golley, J. (2014). "green" productivity growth in china's industrial economy. *Energy Economics*, 44:89–98.
- Chung, Y. H., Färe, R., e Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*.
- CNA, C. D. A. E. P. (2023). Balança comercial do agronegócio brasileiro. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Coelli, T., Rao, D. S. P., e Battese, G. E. (1998). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Springer US, [s.l.].
- Conceição, M. C. G. D., Matos, E. S., Bidone, E. D., Rodrigues, R. D. A. R., e Cordeiro, R. C. (2017). Changes in soil carbon stocks under integrated crop-livestock forest system in the brazilian amazon region. *Agricultural Sciences*, 08(09):904–913.

- Emrouznejad, A. e Yang, G. L. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in dea: 1978–2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61:4–8.
- Euclides Filho, K. (2008). Bovinos de corte. In: Albuquerque, A. C. S.; Silva, A. G., editor, *Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas*, volume 1, Página 907–944. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. K., e Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The review of economics and statistics*, Página 90–98.
- Fearnside, P. M. (2001). Land-tenure issues as factors in environmental destruction in brazilian amazonia: The case of southern para. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/worlddev>. Acesso em: 11 fev. 2022.
- Ferreira, C. B., Araujo, J. A., Tabosa, F. J. S., e De Lima, J. R. F. (2016). Produtividade agrícola nos países da américa latina. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 54(3):437–458.
- Ferreira, Z. R. e Vieira Filho, J. E. R. (2024). *Sustentabilidade produtiva e efeito poupa-florestas na agricultura: um comparativo internacional*. Ipea, Rio de Janeiro. Texto para Discussão, n. 2980.
- Fuglie, K. O. (2008). Is a slowdown in agricultural productivity growth contributing to the rise in commodity prices? *Agricultural Economics*, 39(SUPPL. 1):431–441.
- Fulginiti, L. E. e Perrin, R. K. (1998). Agricultural productivity in developing countries. *Agricultural Economics*, 19(1–2):45–51.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lindgren, B., e Roos, P. (1994a). *Productivity Developments in Swedish Hospitals: A Malmquist Output Index Approach*. Springer Science+Business Media, New York, 1 edition.
- Färe, R., Grosskopf, S., e Norris, M. (1994b). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *The American Economic Review*, 84(1):66–83.
- Gasques, J., Bacchi, M. R. P., Rodrigues, L., Bastos, E. T., e Valdes, C. (2016). Produtividade da agricultura brasileira: a hipótese da desaceleração. In: Filho, J. E. R. V. e Gasques, J. G., editores, *Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade*, Página 142–163. IPEA, Brasília.
- Gasques, J. G., Bastos, E. T., e Bacchi, M. R. P. (2009). *Produtividade e fontes de crescimento da agricultura*. Brasília.
- Gasques, J. G., Bastos, E. T., Valdes, C., e Bacchi, M. R. P. (2014). Productivity in agriculture: results for brazil and selected brazilian states. *Revista de Política Agrícola*, 23(3):87–98.

- Hailu, A. e Veeman, T. S. (2001). Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the canadian pulp and paper industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 83(3):605–616.
- Hall, A. (1991). *Amazônia - desenvolvimento para quem? Desmatamento e conflito social no Programa Grande Carajás (PGC)*.
- Helfand, S. M., Magalhães, M. M., e Rada, N. E. (2015). Brazil's agricultural total factor productivity growth by farm size. *Inter-American Development Bank Working Paper*, 609(September):71.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2009). Censo agropecuário 2006.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). Censo agropecuário 2017: resultados definitivos.
- IBGE, I. B. D. G. E. E. (2021). Amazônia legal.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). Produção agrícola municipal - pam.
- International Food Policy Research Institute - IFPRI (2018). Agricultural total factor productivity (tfp), 1991-2014: 2018 global food policy report annex table 5.
- IPEA, I. D. P. E. A. (2020). Ipeadata. Acesso em: 1 ago. 2022.
- Kumar, S. (2006). Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using malmquist-luenberger index. *Ecological Economics*, 56(2):280–293.
- Li, K. e Lin, B. (2015). Measuring green productivity growth of chinese industrial sectors during 1998–2011. *China Economic Review*, 36:279–295.
- Li, K. e Lin, B. (2016). Impact of energy conservation policies on the green productivity in china's manufacturing sector: Evidence from a three-stage dea model. *Applied Energy*, 168:351–363.
- Li, L. B., Liu, B. L., Liu, W. L., e Chiu, Y. H. (2017). Efficiency evaluation of the regional high-tech industry in china: A new framework based on meta-frontier dynamic dea analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*, 60:24–33.
- Liu, Y. e Feng, C. (2019). What drives the fluctuations of “green” productivity in china's agricultural sector? a weighted russell directional distance approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 147:201–213.
- Ludena, C. E. (2010). Agricultural productivity growth, efficiency change and technical progress in latin america and the caribbean. *SSRN Electronic Journal*, 61:38.
- Lázari, N. C. D. e Magalhães, M. M. D. (2019). Crescimento da ptf segundo tamanho de estabelecimentos rurais na região sudeste, de 1985 a 2006. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 57(2):198–214.

- Macedo, M. N., Defries, R. S., Morton, D. C., Stickler, C. M., Galford, G. L., e Shimabukuro, Y. E. (2012). Decoupling of deforestation and soy production in the southern amazon during the late 2000s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(4):1341–1346.
- Machado, G. C., Bacha, C. J. C., e Johnston, F. L. (2020). Revisão sistemática dos trabalhos que calculam a ptf da agropecuária brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 29(1):82–93.
- Mahlberg, B., Luptacik, M., e Sahoo, B. K. (2011). Examining the drivers of total factor productivity change with an illustrative example of 14 eu countries. *Ecological Economics*, 72:60–69.
- Malmquist, S. (1953). Index number and indifference surfaces. *Trabajos de Estadística*, 4:209–242.
- Margulis, S. (1990). *O desempenho do governo brasileiro e do Banco Mundial em relação à questão ambiental do Projeto de Ferro Carajás*. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
- Martha Júnior, G. B., Alves, E., e Contini, E. (2012). Land-saving approaches and beef production growth in brazil. *Agricultural Systems*, (110):173–177.
- Mendes, S. M., Teixeira, E. C., e Salvato, M. A. (2009). Investimentos em infraestrutura e produtividade total dos fatores na agricultura brasileira: 1985-2004. *Revista Brasileira de Economia*, 63(2):91–102.
- Myeki, L. W., Matthews, N., e Bahta, Y. T. (2023). Decomposition of green agriculture productivity for policy in africa: An application of global malmquist-luenberger index. *Sustainability (Switzerland)*, 15(2):1–17.
- Nascimento, N., West, T. A. P., Börner, J., e Ometto, J. (2019). What drives intensification of land use at agricultural frontiers in the brazilian amazon? evidence from a decision game. *Forests*, 10(6).
- Nin, A., Arndt, C., e Preckel, P. (2003). Is agricultural productivity in developing countries really shrinking? new evidence using a modified nonparametric approach. *Journal of Development Economics*, 71:395–415.
- Nobre, C. A. (2001). Modelos e cenários para a amazônia: o papel da ciência. Acesso em: 1 dez. 2022.
- Observatório do clima (2023). SEEG. Gases de efeito estufa.
- Oh, D.-h. (2010). A metafrontier approach for measuring an environmentally sensitive productivity growth index. *Energy Economics*, 32(1):146–157.
- Oh, D. h. (2010b). A global malmquist-luenberger productivity index. *Journal of Productivity Analysis*, 34(3):183–197.

- Pastor, J. T. e Lovell, C. A. K. (2005). A global malmquist productivity index. *Economics Letters*, 88(2):266–271.
- Pereira, M. F., Silveira, J. S. T. Da; Lanzer, E. A., e Samohyl, R. W. (2002). Productivity growth and technological progress in the brazilian agricultural sector. *Pesquisa Operacional*, 22(2):133–146.
- Rada, N., Buccola, S., e Fuglie, K. (2009). Brazil's rising agricultural productivity and world competitiveness. In: *Proceedings of the AAEA & ACCI Joint Annual Meeting*, Milwaukee.
- Rada, N. E. e Buccola, S. T. (2012). Agricultural policy and productivity: Evidence from brazilian censuses. *Agricultural Economics (United Kingdom)*, 43(4):355–367.
- Santos, P. F. A. e Spolador, H. F. S. (2018). Produtividade setorial e mudança estrutural no brasil: Uma análise para o período 1981 a 2013. *Revista Brasileira de Economia*, 72(2):217–248.
- SEEG (2022). Emissões por setor - agropecuária. <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/agropecuaria>. Acesso em: 22 jul. 2022.
- Serra, M. A. e Fernandez, R. G. (2004). Perspectivas de desenvolvimento da amazônia: motivos para o otimismo e para o pessimismo. *Economia e Sociedade*, 2(2):107–131.
- Shen, Z., Boussemart, J. P., e Leleu, H. (2017). Aggregate green productivity growth in oecd's countries. *International Journal of Production Economics*, 189:30–39.
- Shi, X. e Li, L. (2019). Green total factor productivity and its decomposition of chinese manufacturing based on the mml index:2003–2015. *Journal of Cleaner Production*, 222:998–1008.
- Song, M., An, Q., Zhang, W. And Wang, Z., e Wu, J. (2012). Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Song, M., Peng, J., Wang, J., e Zhao, J. (2018). Environmental efficiency and economic growth of china: A ray slack-based model analysis. *European Journal of Operational Research*, 269(1):51–63.
- Sueyoshi, T., Yuan, Y., e Goto, M. (2017). A literature study for dea applied to energy and environment. *Energy Economics*, 62:104–124.
- Tian, P. e Lin, B. (2017). Promoting green productivity growth for china's industrial exports: Evidence from a hybrid input-output model. *Energy Policy*, 111:394–402.
- Vicente, J. R. (2004). Mudança tecnológica, eficiência e produtividade total de fatores na agricultura brasileira, 1970-95. *Economia Aplicada*, 8(4):729–760.

- Vieira Filho, J. E. R. (2016). A fronteira agropecuária brasileira: redistribuição produtiva, efeito poupa-terra e desafios estruturais logísticos. In: VIEIRA FILHO, J. E. R. e GASQUES, J., editores, *Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade*, Página 25–50. Ipea, Brasília.
- Wang, Z. e Feng, C. (2015). Sources of production inefficiency and productivity growth in china: A global data envelopment analysis. *Energy Economics*, 49:380–389.
- West, T. A. P. e Fearnside, P. M. (2021). Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in amazonia. *Land Use Policy*, 100.
- Yang, Z., Fan, M., Shao, S., e Yang, L. (2017). Does carbon intensity constraint policy improve industrial green production performance in china? a quasi-did analysis. *Energy Economics*, 68:271–282.
- Zhang, C., Liu, H., Bressers, H. T. A., e Buchanan, K. S. (2011). Productivity growth and environmental regulations - accounting for undesirable outputs: Analysis of china's thirty provincial regions using the malmquist-luenberger index. *Ecological Economics*, 70(12):2369–2379.
- Zhou, p., Ang, b. w., e Poh, k. L. (2008). A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European Journal of Operational Research*.

Apêndice:

A.1. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal calculadas pelas médias ponderadas pelo produto para os índices GML, ML, GM e M – 2006 a 2017

UF	GML			ML			GM			M		
	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	TC	Prod.	EC	TC
AC	0,9968	0,9764	1,022	0,9942	0,9764	1,0188	0,9460	0,8056	1,2067	0,8965	0,8056	1,1386
AM	1,2699	1,2440	1,0317	1,3332	1,2440	1,0647	2,9247	2,9386	1,0178	3,0502	2,9386	1,0291
AP	0,8916	0,8839	1,0076	0,8908	0,8839	1,0080	1,1621	1,0522	1,1320	1,1610	1,0522	1,1039
MA	0,9838	0,9791	1,0137	0,9829	0,9791	1,0024	1,1756	1,1165	1,1164	1,1756	1,1165	1,1049
MT	1,0297	1,0266	1,003	1,0264	1,0266	1,0003	1,2983	0,9937	1,3072	1,2983	1,3072	0,9926
PA	1,1060	1,1055	1,0460	1,1091	1,1055	1,0674	1,6234	1,6281	1,6743	1,6231	1,6281	1,0035
RO	1,0069	0,9977	1,0092	1,0062	0,9977	1,0015	1,7316	1,1423	1,9465	1,7316	1,1423	1,1775
RR	0,9946	0,9783	1,0188	0,9968	0,9783	1,0187	1,2975	1,1796	1,0998	1,2975	1,1796	1,0281
TO	1,0888	1,0034	1,0852	1,0864	1,0034	1,1067	1,7495	1,1019	1,7439	1,7495	1,1019	1,0673
Total	1,0235	1,0112	1,0158	1,0315	1,0112	1,0167	1,5873	1,5061	1,7001	1,5935	1,5061	1,0511

Fonte: Resultados da pesquisa.

A.2. Índice de crescimento da produtividade, mudança na eficiência técnica e mudança tecnológica para a agropecuária na Amazônia Legal calculadas pelas média simples pelo produto para os índices GML, ML, GM e M – 2006 a 2017

UF	GML			ML			GM			M		
	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	BPC	Prod.	EC	TC	Prod.	EC	TC
AC	0,9965	0,9754	1,0230	0,9936	0,9754	1,0192	0,9490	0,7979	1,2136	0,8902	0,7979	1,1431
AM	1,2507	1,2303	1,0289	1,3156	1,2303	1,0627	2,9267	2,9493	1,0154	3,0783	2,9493	1,0352
AP	0,9454	0,9366	1,0087	0,9607	0,9366	1,0261	1,3642	1,2482	1,1827	1,4093	1,2482	1,1290
MA	0,9837	0,9791	1,0136	0,9828	0,9791	1,0023	1,1789	1,1199	1,0557	1,1674	1,1199	1,1049
MT	1,0299	1,0268	1,0051	1,0183	1,0268	0,9917	1,2386	0,9952	1,2434	1,3218	0,9902	1,3331
PA	1,0250	1,0157	1,0290	1,0502	1,0157	1,0169	1,6710	1,6300	1,6713	1,6310	1,6300	0,9838
RO	1,0069	0,9977	1,0096	1,0061	0,9977	1,0080	1,7392	1,1428	1,5241	1,7359	1,1428	1,1175
RR	0,9936	0,9766	1,0198	0,9867	0,9766	1,0103	1,2940	1,1468	1,1281	1,2934	1,1468	1,1279
TO	1,0899	1,0034	1,0852	1,1064	1,0034	1,1067	1,7527	1,1057	1,7439	1,7527	1,1057	1,0703
Total	1,0203	1,0115	1,0134	1,0226	1,0115	1,0079	1,5456	1,4936	1,0447	1,5456	1,4936	1,0182

Fonte: Resultados da pesquisa.