

EXPORTAÇÕES DA AGROPECUÁRIA E AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE PARA OS MUNICÍPIOS BRASILEIROS¹

Augusta Pelinski Raiher²
Alex Sander Souza do Carmo³
Alysson Luiz Stege⁴
Luma Oliveira⁵

RESUMO: Este artigo tem como objetivo analisar o efeito das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) ao longo dos municípios brasileiros. Para isso, foram realizadas estimativas em painel de dados, visando investigar a associação existente entre as exportações da agropecuária e a EGEE, abrangendo o Brasil como todo e cada região. A investigação também incluiu as exportações da agroindústria e do agronegócio, com o intuito de ratificar os fenômenos observados *a priori*. Os resultados mostraram que o aumento da competitividade internacional da agropecuária tende a reduzir a EGEE, especialmente devido às exigências internacionais quanto à mitigação dos seus impactos ambientais. No entanto, esse aumento da competitividade pode ser impulsionado tanto pela expansão da escala de produção, com a ampliação da área explorada (efeito escala), o que, nesse caso, tem um efeito negativo na EGEE, quanto pelo avanço da produção através do aumento da produtividade por área explorada, com a introdução de tecnologias mais limpas e eficientes (efeito técnico).

Palavras-chave: Exportações; agropecuária; agroindústria; agronegócio; emissão de gases de efeito estufa.

ABSTRACT: This article aims to analyze the effect of agricultural exports on greenhouse gas emissions (GHG) across Brazilian municipalities. To achieve this, panel data estimates were conducted to investigate the association between agricultural exports and GHG emissions, encompassing Brazil as a whole and each region individually. The investigation also included agro-industrial and agribusiness exports to corroborate the initially observed phenomena. The results showed that the increase in international competitiveness of agriculture tends to reduce GHG emissions, particularly due to international demands for mitigating environmental impacts. However, this increase in competitiveness can be driven both by the expansion of production scale, with the enlargement of the cultivated area (scale effect), which in this case has a negative impact on GHG emissions, and by production advances through increased productivity per cultivated area, introducing cleaner and more efficient technologies (technical effect).

Keywords: Exports; agriculture; agro-industry; agribusiness; greenhouse gas emissions.

JEL Classification: Q01; Q17; Q56.

¹ Este artigo faz parte do Projeto “EFEITOS DAS EXPORTAÇÕES DA AGROPECUÁRIA NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: UMA ANÁLISE PARA OS MUNICÍPIOS BRASILEIROS”, financiado pelo CNPQ.

² Professora do Programa de Pós-Graduação em Economia e do curso de Economia na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Bolsista produtividade CNPQ.

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Economia e do curso de Economia na UEPG.

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Economia e do curso de Economia na UEPG.

⁵ Professora do Programa de Pós-Graduação em Economia e do curso de Economia na UEPG.

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio exerce um papel essencial na economia brasileira, representando cerca de 27% do Produto Interno Bruto (PIB) e desempenhando um papel estratégico na produção de alimentos e na geração de empregos. A sua produtividade é um elemento-chave para sua competitividade, bem como para sua atuação no mercado internacional, visto que cerca de 47% das exportações do país provêm desse setor (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023). Essa competitividade é impulsionada por diversos fatores, incluindo um clima favorável à produção agropecuária, vastas áreas de terras agricultáveis, avanços tecnológicos e um sistema agroindustrial bem estruturado.

Não obstante a sua importância para a economia brasileira, a agropecuária enfrenta críticas devido aos possíveis impactos negativos ao meio ambiente, o que prejudica sua imagem diante de mercados globais cada vez mais conscientes das questões ambientais. Até a década de 1990, a atenção dada às questões ambientais no setor agropecuário era relativamente limitada, e as práticas produtivas muitas vezes não levavam em conta os impactos ambientais de forma significativa. No entanto, a partir dos anos 2000, as preocupações quanto às restrições internacionais relacionadas às práticas ambientais na agropecuária brasileira começaram a se intensificar.

Assim, as exigências por produtos agrícolas sustentáveis têm ganhado destaque, impulsionando o setor a adotar medidas para mitigar seus impactos ambientais. Nepstad et al. (2021), por exemplo, ressaltam a crescente importância da sustentabilidade ao longo da cadeia de valor dos produtos agropecuários, de modo que empresas e consumidores têm buscado, cada vez mais, produtos provenientes de sistemas produtivos ambientalmente responsáveis. Ademais, os autores investigaram as complexas relações entre as atividades agropecuárias e as emissões de gases de efeito estufa e como a adoção de práticas sustentáveis pode ser fundamental para mitigar os impactos ambientais do agronegócio no Brasil e em escala global.

Considerando a crescente demanda por produtos sustentáveis e a significativa contribuição da agropecuária nas exportações brasileiras, questiona-se em que medida as exportações desse setor contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Ressalta-se que diversos estudos investigam o efeito das mudanças climáticas na produtividade agrícola, tanto a nível internacional quanto nacional (KUNIMITSU ET AL., 2016; KUCHARIK; SERBIN, 2008; SOUZA; HADDAD, 2022). No entanto, a investigação sobre o impacto das exportações agropecuárias nas emissões de gases de efeito estufa ainda são escassas.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) ao longo dos municípios brasileiros. Para isso, este trabalho possui duas hipóteses centrais: i) a busca pela maior inserção internacional dos produtos da agropecuária tem diminuído a EGEE, especialmente em decorrência da demanda internacional pela mitigação dos impactos ambientais; ii) a maior inserção internacional da agropecuária tem intensificado o uso dos recursos naturais, elevando a EGEE.

Ressalta-se que essas duas hipóteses podem ser constatadas ao analisar o território brasileiro. Nas regiões onde a fronteira agrícola está em expansão e a produtividade agropecuária ainda é inferior à média nacional, a busca pela competitividade com vistas à ampliação das exportações pode acarretar impactos ambientais negativos. Por outro lado, para as regiões com desenvolvimento agrícola mais consolidado e competitivo, a expansão e manutenção dos mercados internacionais podem ser alcançadas através da adoção de práticas sustentáveis de produção, resultando na melhoria das condições ambientais.

Isto posto, o presente trabalho busca contribuir com a literatura empírica em dois pontos: no recorte geográfico dos dados e no tratamento das variáveis do modelo. Não existem

trabalhos feitos para o Brasil que avaliem os efeitos das exportações agropecuárias na emissão de CO₂ utilizando dados municipais. Este recorte geográfico é importante porque permite identificar e controlar as heterogeneidades espaciais. A segunda contribuição diz respeito ao uso de variáveis específicas da agropecuária nas estimações do modelo empírico, isto é, tanto a emissão de CO₂ quanto às exportações brasileiras serão mensuradas para o setor agropecuário, o que possibilita avaliar em que medida as exportações deste setor contribuem para a poluição atmosférica, haja vista que o setor agropecuário é um dos que mais contribuem para a emissão de gases que provocam o efeito estufa.

Além da presente introdução, o trabalho possui outras quatro seções. A seção 2 aborda as evidências empíricas existentes entre as exportações agropecuárias e a degradação ambiental. A seção 3 versa sobre a metodologia que será empregada para se atingir o objetivo proposto no trabalho. A seção 4 trata da análise dos resultados, reportando as estimações obtidas dos modelos econométricos. Por fim, a seção 5 encerra o trabalho com as considerações finais da pesquisa, bem como, reporta algumas recomendações de políticas públicas.

2. EXPORTAÇÕES AGRÍCOLAS E O MEIO AMBIENTE: EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS

O debate sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) associadas às exportações agrícolas ganha relevância crucial diante das crescentes demandas globais por produtos alimentícios e bioenergéticos. Hertel et al. (2010) analisam como o comércio internacional de etanol de milho dos Estados Unidos influencia as emissões globais de GEE, revelando que o aumento na produção de biocombustíveis pode induzir mudanças significativas no uso da terra, incluindo a expansão de áreas agrícolas e o consequente desmatamento associado.

Além das conclusões de Hertel et al. (2010), outros estudos corroboram esses achados ao destacar que o incremento na produção agrícola visando atender às demandas de exportação frequentemente resulta na conversão de áreas naturais, como florestas e savanas, em terras agrícolas. Esse processo não apenas libera grandes quantidades de carbono armazenado no solo e na biomassa, mas também diminui a capacidade dessas áreas atuarem como sumidouros de carbono (PETERS et al., 2011). Pesquisas indicam que, em países como o Brasil, grande parte do desmatamento na Amazônia é impulsionado pela expansão da produção voltada para a exportação (FEARNSIDE, 2005).

Além do desmatamento, a pecuária é uma fonte significativa de emissões de metano (CH₄), um gás de efeito estufa muito mais potente que o CO₂ em termos de capacidade de aquecimento global. O metano é emitido principalmente através da fermentação entérica em ruminantes, como bovinos. De acordo com Gerber et al. (2013), a produção de carne bovina é responsável por cerca de 41% das emissões de GEE do setor agropecuário global. O aumento da demanda internacional por carne tem, portanto, um impacto direto nas emissões de metano.

O uso intensivo de fertilizantes nitrogenados na agricultura também contribui significativamente para as emissões de óxido nitroso (N₂O), outro potente GEE. Os fertilizantes são amplamente utilizados para aumentar a produtividade das culturas destinadas à exportação, como a soja e o milho. Snyder et al. (2009) destacam que a aplicação excessiva de fertilizantes resulta na liberação de N₂O para a atmosfera, exacerbando o efeito estufa.

O deslocamento de emissões é outro aspecto crítico neste processo. Muitos países importadores implementam políticas ambientais rigorosas, mas, ao importar produtos agropecuários de países com regulamentações ambientais mais brandas, acabam indiretamente contribuindo para o aumento global das emissões de GEE. Este fenômeno é evidenciado por pesquisas que mostram como a redução das emissões nos países desenvolvidos é frequentemente compensada pelo aumento das emissões nos países exportadores.

No estudo de Peters et al. (2011), são analisados 113 países e 57 setores, identificando um crescimento expressivo das emissões globais de CO₂ provenientes da produção de produtos exportados entre 1990 e 2008. As emissões decorrentes da produção desses bens representavam 20% do CO₂ global em 1990, aumentando para 26% em 2008. Esse aumento fez com que as emissões de CO₂ provenientes da produção de produtos exportados se tornassem comparáveis em magnitude às emissões resultantes do uso do solo. Segundo os autores, as mudanças na estrutura do comércio internacional e no volume de produtos exportados por cada país, especialmente após o Protocolo de Kyoto, indicam grandes mudanças regionais na localização das emissões da produção de bens e serviços e na localização do consumo.

Especificamente, os autores supracitados destacam que o crescimento das emissões de CO₂ associadas ao comércio internacional está fortemente ligado ao aumento da produção em países com regulamentações ambientais menos rigorosas. A pesquisa mostra que a produção destinada à exportação tem se deslocado significativamente para países em desenvolvimento, onde as práticas de produção são frequentemente menos eficientes em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Por outro lado, os países desenvolvidos, que importam esses bens, conseguem reduzir suas emissões domésticas de CO₂, mas às custas de um aumento nas emissões globais, já que a produção e o consumo estão geograficamente dissociados.

Há, assim, uma subestimação das emissões de GEE nos inventários nacionais dos países importadores, especialmente dos desenvolvidos, nos quais se contabiliza apenas as emissões decorrentes da produção e não do consumo. Peters e Hertwich (2008) explicam que isso ocorre devido à externalização significativa de emissões pelos países exportadores através do comércio, especialmente quando produtos intensivos em carbono são exportados para mercados exigentes, onde o consumo está associado a uma pegada de carbono maior do que se fossem produzidos localmente.

Embora haja evidências robustas de que as exportações agrícolas são nocivas ao meio ambiente, um crescente corpo de pesquisa indica que a adoção de práticas agrícolas sustentáveis pode mitigar esses efeitos adversos e, simultaneamente, aumentar a competitividade no mercado global. Autores como Tilman et al. (2011) e Pretty et al. (2006) demonstram que práticas agrícolas sustentáveis não só podem proteger o meio ambiente, mas também melhoraram a produtividade e a rentabilidade dos agricultores.

Tilman et al. (2011) examinam a crescente demanda global por alimentos e a necessidade de intensificação sustentável da agricultura para atender a essa demanda sem causar danos ambientais severos. Eles argumentam que a intensificação agrícola sustentável, por meio de práticas como rotação de culturas, uso eficiente de fertilizantes e conservação do solo, são cruciais para evitar a expansão das áreas cultivadas, reduzindo assim a destruição de *habitats* naturais e as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, destacam que a transferência de tecnologia e práticas agrícolas eficazes podem promover um abastecimento alimentar global mais equitativo e com menor impacto ambiental.

Autores como Tilman et al. (2011) e Pretty et al. (2006) complementam essa visão ao analisar 286 intervenções recentes em 57 países pobres, que resultaram em significativos aumentos na produtividade agrícola ao mesmo tempo em que melhoraram os impactos ambientais. Eles concluem que práticas agrícolas que incorporam técnicas de conservação e manejo sustentável não só protegem o meio ambiente, mas também fortalecem a competitividade dos agricultores no mercado internacional.

Portanto, ao adotar estratégias mais sustentáveis na produção agrícola, é possível, segundo estes autores, não apenas mitigar os impactos ambientais negativos das exportações agrícolas, mas também promover uma agricultura mais resiliente e competitiva globalmente. Diante dos argumentos apresentados, é possível identificar certa concordância na literatura sobre os efeitos negativos das exportações agropecuárias nas emissões de GEE, especialmente em contextos de agricultura expansionista.

No entanto, à medida que se prioriza a produtividade, especialmente de forma sustentável, esses efeitos não necessariamente se mostram negativos em termos de emissões. Portanto, é possível que a relação entre exportações de produtos agropecuários e as emissões de GEE siga um padrão de U invertido. A próxima subseção explorará mais profundamente essa relação.

2.1 Curva de Kuznets Ambiental com ênfase nas Exportações

A Curva Ambiental de Kuznets (CAK) é um conceito amplamente discutido na literatura econômica e ambiental, que sugere uma relação em forma de "U" invertido entre desenvolvimento econômico e degradação ambiental. Em seus estágios iniciais, o crescimento econômico tende a ser acompanhado por um aumento na poluição e degradação ambiental. No entanto, após atingir um certo nível de renda per capita, a tendência se inverte, e o desenvolvimento econômico adicional leva à melhoria da qualidade ambiental (GROSSMAN; KRUEGER, 1995). Esta melhoria é atribuída a fatores como a aprimoração da tecnologia, regulamentações ambientais mais rigorosas, maior conscientização pública e demanda por ambientes mais limpos entre populações mais ricas (DINDA, 2004).

Esta subseção examina a relação entre a CAK e as exportações, discutindo como o comércio internacional pode influenciar essa dinâmica. A teoria da CAK sugere que, em economias em desenvolvimento, o foco inicial está na expansão econômica rápida, frequentemente à custa do meio ambiente. Nesse contexto, as exportações desempenham um papel crucial, pois são vistas como um motor de crescimento econômico. No entanto, essas exportações, especialmente de produtos primários, muitas vezes acarretam impactos ambientais significativos, incluindo desmatamento, degradação do solo e emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com Antweiler et al. (2001), as exportações podem influenciar a curva de Kuznets ambiental de três maneiras: pelo efeito escala, pelo efeito composição e pelo efeito técnico. O efeito escala refere-se ao aumento da produção econômica que, em geral, resulta em maiores emissões de poluentes. O efeito composição ocorre quando a estrutura da economia muda com o desenvolvimento, passando de setores mais poluentes para setores menos poluentes, fenômeno que ocorre como resultado da liberalização, à medida que os países se especializam nos setores em que possuem vantagem comparativa. Finalmente, o efeito técnico envolve a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, geralmente viabilizada pelo crescimento econômico e pela abertura comercial.

Estudos empíricos têm demonstrado como essas dinâmicas se manifestam em diferentes países. Cole (2004) argumenta que, em países exportadores de *commodities*, o efeito escala tende a prevalecer nos estágios iniciais, resultando em uma piora da qualidade ambiental. No entanto, conforme esses países se desenvolvem e diversificam suas economias, o efeito composição e o efeito técnico podem levar a uma redução das emissões de GEE e a uma melhoria ambiental.

Em síntese, a Curva Ambiental de Kuznets oferece uma estrutura teórica valiosa para entender a relação entre desenvolvimento econômico e qualidade ambiental, especialmente no contexto das exportações. Enquanto as exportações podem inicialmente exacerbar a degradação ambiental, elas também podem, eventualmente, facilitar melhorias ambientais através da diversificação econômica e da adoção de tecnologias limpas. No entanto, alcançar esse equilíbrio depende de políticas eficazes e de um contexto favorável que permita que os benefícios do comércio internacional se traduzam em ganhos ambientais.

Empiricamente, diferentes trabalhos utilizaram a CAK para analisar os determinantes da degradação ambiental, incluindo as exportações como uma variável importante neste processo. No Quadro 1 tem-se um resumo das principais pesquisas que incluem as exportações (ou comércio internacional) em suas estimativas.

Quadro 1 - Resumo dos trabalhos que utilizam a CAK com a inclusão do comércio internacional.

Autor(es)	Variáveis explicativas	Metodologia	Resultados
Cole et al., (1997)	Renda*, intensidade do comércio internacional.	Mínimos Quadrados Generalizados, com a renda defasada sendo usada como variável instrumental. Período: 1970-1992 Grupo de países (7 regiões do mundo)	Confirmou U invertido. A intensidade do comércio veio com coeficiente negativo, entretanto não foi estatisticamente significativa para nenhum dos indicadores ambientais. Os autores justificaram tal resultado em decorrência das diferenças específicas de país/região na intensidade do comércio que provavelmente tenham sido capturadas pelos efeitos fixos.
Antweiler et al. (2001)	Renda média per capita*; Renda/KM ² ; razão K/L*; intensidade de comércio [(X+M)/PIB], etc.	Modelo de Efeito Fixo. A variável Renda média per capita foi defasada em três anos. Período 1976 a 1991. Grupo de países pobres e ricos.	A maior abertura comercial se apresentou benéfica para o meio ambiente. Concluem que o comércio pode ter um impacto positivo na redução da poluição ao promover a transferência de tecnologias limpas e aumentar a eficiência econômica.
Poon et al. (2006)	PIB per capita*; número de veículos; consumo total de energia; exportações per capita.	Painel Espacial. Regiões da China. Período: 1998 a 2004	Confirmou U invertido. O efeito das exportações nos indicadores de degradação ambiental é negativo, ou seja, maior inserção internacional melhora a qualidade ambiental, os modelos de dependência espacial indicam uma melhoria nos níveis de poluição com maiores exportações per capita. A abertura comercial parece ter promovido o surgimento de indústrias mais limpas na China.
Cole (2003)	PIB per capita*; K/L*, Intensidade do comércio internacional; interação entre a intensidade e o PIB* e entre o K/L*	Painel de dados – Efeito fixo e aleatório Período: 1975 a 1995 32 países desenvolvidos e em desenvolvimento	Resultado ambíguo para o U invertido. Efeito do comércio internacional depende da vantagem comparativa na produção de bens que afetam mais ou menos o meio ambiente.
Carvalho e Almeida (2010)	PIB*; dummy para países que ratificaram Protocolo de Kyoto; X/POP; Energia/POP	Econometria Espacial. 187 países. Período: 2004	Relação positiva entre exportações e emissões de CO ₂ .
López e Galinato (2005)	PIB per capita*; área de cultivo; área de estrada; índice para abertura comercial; índice para democracia.	Painel de Efeito Fixo. Países: Brasil Indonésia, Malásia e Filipinas. Período: 1970 a 1995	Efeito da abertura comercial na cobertura de florestas: Brasil e Filipinas é positivo; Malásia e Indonésia: Efeito é negativo.
Morais (2019)	PIB*; VBT industrial, agropecuária e produção energética; comércio internacional (X+M) POP; consumo de energia elétrica; densidade POP	Painel de dados. Estados e Distrito Federal. Período: 1991 e 2016	Efeito positivo do comércio internacional na degradação ambiental. Assim, a globalização do mercado internacional voltado à exportação pode gerar uma elevação no nível da taxa de poluição.

Fonte: lista construída pelos autores com base nos trabalhos consultados na pesquisa.

Nota: *Forma funcional quadrática ou cúbica; X: exportações; M: Importações; K: capital; L: trabalho; PIB: Produto Interno Bruto; POP refere-se à população; VBT é o valor bruto de produção.

Em geral, os estudos indicam que uma maior integração internacional tende a melhorar os níveis de degradação ambiental. No entanto, Cole (2003) identificou a insignificância dessa relação em seu estudo. Segundo o autor, se o aumento do comércio internacional alterar a vantagem comparativa de um país ou região a favor da produção mais limpa, é possível que se tenha uma redução nos impactos ambientais. Por outro lado, se a liberalização do comércio fazer com que um país ou uma região se torne mais intensivo em capital do que em trabalho, dado que atividades intensivas em capital tendem a ser mais poluentes, espera-se maior impacto negativo ao meio ambiente.

Na mesma perspectiva, López e Galinato (2005), ao analisar quatro países, encontram resultados variados na relação entre a abertura comercial e a cobertura florestal. Para o Brasil e Filipinas, a abertura comercial teve um efeito positivo na cobertura florestal. Em contraste, na Indonésia e na Malásia, a relação encontrada foi negativa. Os autores atribuem essa diferença principalmente à expansão agrícola, a qual se apresentou negativa no Brasil e nas Filipinas, enquanto na Indonésia e na Malásia, foi positiva.

Ademais, os autores reforçam que essa diferença está ligada aos padrões de comércio agrícola do período investigado: na Indonésia e na Malásia, a agricultura que compete com a floresta era impulsionada pelas exportações, enquanto no Brasil era orientada para a substituir importação e, só mais recentemente, algumas culturas voltadas à exportação (como a soja) começaram a avançar. Nas Filipinas, a agricultura concorrente da floresta era voltada para o mercado interno.

Assim, no Brasil e nas Filipinas, a abertura comercial reduziu os incentivos para a expansão agrícola concorrente da floresta, diferentemente da Indonésia e da Malásia. Portanto, para López e Galinato (2005) o impacto da liberalização do comércio internacional no meio ambiente varia de país para país, dependendo se possuem ou não vantagem comparativa na produção intensiva em degradação ambiental.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o efeito das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) ao longo dos municípios brasileiros. Para isso, foram estimados modelos em painel de dados, utilizando informações das seguintes fontes: Censos Agropecuários de 1995/1996, 2006 e 2017; Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG); Ministério do Desenvolvimento, Indústria Comércio e Serviços (MDIC); e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

É importante destacar que, ao longo dos anos, o número de municípios no Brasil aumentou consideravelmente, o que torna a análise de dados regionais ao longo do tempo mais complexa. Por conta disso, a pesquisa requereu a compatibilização dos municípios existentes em diferentes períodos, para garantir a consistência dos dados. Para esse propósito, foi utilizado o estudo de IBGE (2011), que fornece uma visão detalhada da evolução histórica dos municípios brasileiros e permite identificar aqueles que foram desmembrados ou criados ao longo do tempo. Com base nessa compatibilização, foram incluídos 4.980 municípios na análise, resultando na formação de um painel de dados balanceado com 14.940 observações.

Além de estimar um modelo econométrico para todos os municípios brasileiros, subdividiu-se os dados por regiões, dada a heterogeneidade existente no que se refere à EGEE e às exportações. Na sequência será apresentado o modelo empírico que foi utilizado, bem como as especificações das estimativas econométricas.

3.1 Modelo Empírico

O modelo aplicado neste trabalho é expresso pela equação (1), sendo baseado em Cole (2003), com adaptações específicas para o setor agropecuário, onde i refere-se aos municípios do Brasil e t é o ano:

$$Eagro_{i(t+1)} = \beta_0 + \beta_1 PIB_{it} + \beta_2 PIB_{it}^2 + \beta_3 M_{it} + \beta_4 M_{it}^2 + \beta_5 Xa_{it} + \beta_6 (XaM)_{it} + \beta_7 (aM)_{it}^2 + \beta_8 PECUÁRIA_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

A variável *Eagro* refere-se ao total de emissões de CO2e-GWP-AR6 em toneladas emitidos pelo setor agropecuário dividido pela área explorada (em hectares). Considerou-se como emissões CO2e-GWP-AR6 emitidos pelo setor agropecuário as emissões de metano da fermentação entérica do gado bovino, as emissões diretas de óxido nitroso (por animais em pastagem) e indiretas (por fenômenos de deposição atmosférica e lixiviação de nitrogênio). A área explorada é o somatório das áreas com lavouras permanentes e temporárias, áreas de pastagens naturais e plantada, áreas de matas e florestas naturais e plantadas (em hectares), coletadas junto aos Censos Agropecuários de 1995/1996, 2006 e 2017.

O termo CO2e-GWP-AR6 é uma referência ao uso das métricas de Potencial de Aquecimento Global (GWP) atualizadas pelo Sexto Relatório de Avaliação do IPCC para calcular as emissões equivalentes de CO2 de diferentes gases de efeito estufa. O Termo CO2 significa: "equivalente a CO2" o qual é uma forma de expressar a quantidade total de gases de efeito estufa em termos de seu impacto equivalente ao dióxido de carbono (CO2). Já o termo GWP quer dizer "Global Warming Potential" (Potencial de Aquecimento Global), sendo uma métrica usada para comparar o impacto de diferentes gases de efeito estufa com base enquanto de calor eles retêm na atmosfera em relação ao CO2. E o termo AR6 refere-se ao "Sexto Relatório de Avaliação" (Assessment Report 6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A variável CO2e-GWP-AR6 foi coletada pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) para os anos de 1999, 2008 e 2019.

A variável *PIB* refere-se ao Produto Interno Bruto do setor agropecuário (em R\$) dividido pela área explorada dos estabelecimentos agropecuários (em hectares). O PIB do setor agropecuário foi coletado para os anos de 1996, 2006 e 2017 retirados do IBGE. Essa variável representa o efeito direto da escala e técnico decorrente do crescimento da atividade produtiva.

Por sua vez a variável *M* refere-se o nível de capital aplicado na agricultura, representando o efeito direto da composição do crescimento da atividade, calculado por meio da soma de máquinas e equipamentos agrícolas ponderado pela área dos estabelecimentos agropecuários (em hectares); o quadrado do *M* foi incorporado para refletir um efeito de acumulação de capital que tende a diminuir marginalmente. Essas informações foram disponibilizadas pelo Censo Agropecuário dos anos de 1995/1996, 2006 e 2017.

Já a variável *Xa* refere-se aos valores médios das exportações da agropecuária (U\$S) dividido pela área explorada dos estabelecimentos agropecuários (em hectares). Os dados de comércio internacional foram baixados do sítio do ComexStat, considerando-se os valores médios das exportações dos biênios: 2018/2017, 2007/2006 e 1998/1997. No caso dos produtos da agropecuária se considerou as exportações das Seções I (Animais vivos e produtos do reino animal) e II (Produtos do reino vegetal).

Além de se estimar (1) usando a variável *Xa*, reestimou-o considerando a exportação dos produtos agroindustriais (*Xi*) e a exportação do agronegócio (soma da exportação dos

produtos da agropecuária e da agroindústria) (Xt). Como a agropecuária tem elevados encadeamentos, especialmente a jusante, analisou-se os produtos da agroindústria e o quanto o desenvolvimento industrial ligado a agropecuária pode interferir no meio ambiente. Essas análises extras das Xi e Xt tem como principal objetivo a validação (robustez) dos resultados encontrados para as exportações da agropecuária.

Cabe ressaltar que, no caso das exportações da agroindústria, usou-se os dados do sítio do ComexStat, das Seções: III (Gorduras e óleos animais ou vegetais; Produtos da sua dissociação; Gorduras alimentares elaboradas; Ceras de origem animal ou vegetal); IV (Produtos das indústrias alimentares; Bebidas, líquidos alcoólicos e vinagres; Tabaco e seus sucedâneos manufaturados) e; VIII (Peles, couros, peles com pelo e obras destas matérias; Artigos de correio ou de seleiro; Artigos de viagem, bolsas e artefatos semelhantes; Obras de tripa).

Em sequência, a variável *Pecuária* refere-se ao percentual da área destinado à produção que mais afeta negativamente o meio ambiente, neste caso, o total da área explorada com pastagem dos estabelecimentos agropecuários (em hectares), dividido pela área explorada total dos estabelecimentos agropecuários (em hectares), utilizando dados do Censo Agropecuário de 1995/1996, 2006 e 2017. Conforme destacado por SEEG (2023), do total de emissões da agropecuária, a pecuária representou 80% (496 milhões de toneladas de CO₂ e, com um aumento de 4% em relação a 2021). Neste sentido, justifica-se a inclusão da “pecuária” em (1).

Cole (2003) infere que a abertura comercial influencia a degradação ambiental, com a direção desse efeito variando conforme a vantagem comparativa de cada país ou região. Ele destacou que essa vantagem comparativa é determinada pelos recursos disponíveis e pelas regulamentações ambientais, que, por sua vez, são influenciadas pelo nível de renda de cada região. Nesse sentido, incorporou-se essas relações na equação (1) através da intensidade do comércio internacional, medida pela razão de exportações da agropecuária na área explorada do setor, servindo como uma medida de fricções comerciais e de competitividade internacional.

Para capturar o argumento da dotação de fatores, a intensidade do comércio internacional foi interagida com a variável de capital aplicado na agricultura. Como a vantagem comparativa é um conceito relativo, a variável de capital aplicado na agricultura de um município foi expressa em relação à média nacional. Ademais, foi aplicado um termo quadrático para a variável interagida com a intensidade do comércio internacional (XaM). Ou seja, o efeito de dotação de fatores sugere que um aumento na intensidade do comércio estaria associado a uma degradação ambiental crescente para municípios com altos níveis de capital aplicado na agricultura. A partir de um certo ponto, a intensificação de capital pode ser alocada em tecnologias mais limpas, produzindo com maior eficiência, apresentando uma relação inversa com a degradação ambiental.

Uma das críticas apresentadas por Cole (2003) em relação aos trabalhos que pesquisa nesta área, refere-se à questão da causalidade não tratada entre o PIB e as emissões, indicando a presença de simultaneidade. Outros estudos, como Cole et al. (1997) e Antweiler et al. (2001), também apontaram essa limitação e utilizaram o defasamento temporal do PIB como uma forma de mitigar a endogeneidade. Assim, no modelo (1), todas as variáveis explicativas foram estimadas considerando um período de defasagem.

Além disso, Cole (2003) criticou trabalhos que se concentraram exclusivamente em países desenvolvidos ou em desenvolvimento, sugerindo que os primeiros apresentam pontos de inflexão na Curva CAK em níveis de renda per capita mais elevados do que aqueles encontrados ao considerar dados globais. Seguindo o procedimento de Cole (2003), o estudo foi estimado usando todos os municípios brasileiros devido à significativa heterogeneidade que apresentam. Posteriormente, o modelo foi reestimado para cada região brasileira.

3.2 Modelo de dados em painel

A equação (1) foi estimada por meio de um painel de dados. Segundo Millo e Piras (2012) e Elhorst (2014), um painel de dados é um tipo de conjunto de observações repetidas ao longo do tempo, abrangendo indivíduos, grupos, países ou regiões. Como as observações utilizadas nesta pesquisa estão vinculadas a uma localização específica no espaço, foi testado se o melhor método para a equação (1) seria um painel de dados espacial. Neste tipo de método, os dados podem ser coletados em pontos específicos (por exemplo, dados habitacionais) ou agregados em áreas regulares ou irregulares (por exemplo, países, regiões, estados, condados). A interação entre cada par de unidades espaciais é representada por uma matriz de pesos espaciais.

Este método lida com a dependência espacial e a heterogeneidade espacial não observável, que se reflete nos parâmetros da regressão, incluindo os interceptos. Isso acontece porque variáveis não observadas que foram omitidas podem influenciar os interceptos, fazendo com que estes variem de acordo com a região (ALMEIDA, 2012). Nesta pesquisa, testou-se os seguintes modelos econométricos espaciais: O SAR (*Spatial Autoregressive Model*), o qual controla o efeito espacial da variável dependente; o SEM (*Spatial Error Model*), controlando o efeito espacial do resíduo; o SDM (*Spatial Durbin Model*), o qual controla o efeito espacial na dependente e nas explicativas; o SDEM (*Spatial Durbin Error Model*), controlando o efeito espacial do resíduo e das explicativas; e o SLX (*Spatial Lag of X*), cujo efeito espacial controlado está nas variáveis explicativas.

Estimou-se (1) considerando todos os modelos espaciais supracitados, entretanto, apenas para uma das estimativas (a que tem as exportações da agropecuária dividida pela área explorada) o método SLX se apresentou como o mais adequado⁶. Para essa identificação, primeiramente estimou-se (1) por Mínimos Quadrados Ordinários, e testou se havia algum padrão espacial nos resíduos (I de Moran dos resíduos). Com exceção da estimativa que utilizou como variável as exportações da agropecuária, todas as demais (para todas as regiões e para todos os municípios brasileiros), o painel a-espacial se apresentou como o mais adequado.

Quando se estima em dados em painel, deve-se decidir entre efeitos fixos (EF) e aleatórios (EA). Na estimação por EF, assume-se que as diferenças entre as unidades de análise são consideradas como mudanças paramétricas da função de produção. E o método de estimação via EA tem como suposição que a especificidade de cada unidade de análise é distribuída de forma aleatória. Neste sentido, para decidir entre efeito aleatório e fixo, utilizou-se o teste de Hausman⁷. Os resultados para cada modelo encontram-se nas tabelas de resultado da próxima seção, abaixo das estimativas econométricas.

No que se refere aos problemas econométricos, utilizou-se o teste de Wald para verificar problemas de heterocedasticidade, ressaltando que todas as estimações apresentaram esse problema, sendo estimadas pela matriz robusta de White.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A agropecuária é responsável por uma parte expressiva das emissões de gases de efeito estufa (EGEE) no Brasil, contribuindo aproximadamente com 75% do total (SEEG, 2023). Essas emissões decorrem principalmente da produção animal, do uso de fertilizantes

⁶ Para esta estimativa, a matriz de vizinhança mais adequada (medida pelo critério de informação Akaike e pela eliminação do efeito espacial dos resíduos) foi 10 vizinhos, ressaltando que outras foram testadas: rainha, torre, 1 vizinho, 5 vizinhos.

⁷ A hipótese nula subjacente a este teste é que os estimadores do modelo de efeitos fixos e do modelo de correção dos erros (EA) não diferem substancialmente, destacando que tal teste tem uma distribuição de “qui quadrado” assintótica. Se a hipótese nula for rejeitada, então o modelo de correção de erros não é adequado e é preferível empregar o modelo de efeitos fixos.

nitrogenados, das práticas de manejo do solo e da mudança no uso da terra. Paralelamente, o setor agropecuário desempenha um papel importante no dinamismo econômico do país, contribuindo de forma direta e indiretamente, respondendo por aproximadamente 22% do PIB⁸ (CEPEA, 2024) e por 48,6% das exportações do país (FERREIRA, 2024).

Entretanto, cada vez mais a competitividade internacional deste setor está atrelada a padrões de preservação ambiental. Isso pode ser ratificado pelo aumento nos requisitos ambientais presentes nos pedidos de revisão no Trade Policy Review Mechanism (TPR)⁹ e pela atual tendência de crescimento das medidas ambientais restringindo o comércio internacional (MUNHOZ et al., 2023). Assim, analisar o comportamento evolutivo das EGEE da agropecuária se torna relevante, especialmente por possibilitar diagnóstico quanto à sustentabilidade da competitividade do setor. Conforme Tabela 1, entre 1999 e 2019 a média de emissão dos gases de efeito estufa da agropecuária por área explorada se reduziu, além do que, se tornou mais homogênea a sua distribuição ao longo do país.

Essa maior homogeneidade pode decorrer de dois fatores: municípios que anteriormente não tinham alta degradação ambiental - por serem pouco explorados em termos de produção agropecuária - passaram a emitir grandes quantidades de gases de efeito estufa devido à expansão da fronteira agrícola (efeito escala da produção agropecuária sobre a EGEE), e/ou; municípios que já tinham alta emissão desses gases, visando maior inserção internacional, migraram para práticas agrícolas mais limpas e menos nocivas ao meio ambiente (efeito técnico). Antweiler et al. (2001) explicam que o efeito escala ocorre quando o aumento da produção do setor leva a maiores emissões de poluentes, enquanto o efeito técnico envolve a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, geralmente viabilizada pelo crescimento do setor e pela abertura comercial.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das EGEE da agropecuária por área explorada (ton/ha) – municípios do Brasil e regiões – 1999, 2008 e 2019.

Brasil / Região	Média	Desvio padrão	Coef. Variação (%)	% de mun. com redução da EGEE entre 2019/1999
Brasil 1999	3.0	3.0	100.8	
Brasil 2019	2.2	1.3	59.6	27
Norte 1999	1.1	0.6	57.8	
Norte 2019	1.8	1.2	67.0	25
Nordeste 1999	1.3	0.8	66.1	
Nordeste 2019	1.8	1.2	69.4	25
Sudeste 1999	6.3	8.8	140.7	
Sudeste 2019	2.6	1.5	59.9	34
Sul 1999	1.9	0.8	40.5	
Sul 2019	2.6	1.3	48.5	22
Centro-Oeste 1999	1.7	0.6	37.9	
Centro-Oeste 2019	2.2	0.8	36.1	18

Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: EGEE refere-se às emissões dos gases de efeito estufa da agropecuária (ton.) por área explorada (ha).

No caso dos municípios brasileiros, é possível inferir a presença desses dois fenômenos, dado a correlação negativa e quase perfeita (-0,997) entre as EGEE de 1999 e a variação das emissões entre 1999 e 2019. Essa correlação indica que os municípios com baixa emissão inicial apresentaram as maiores variações subsequentes, enquanto aqueles com as maiores emissões iniciais tiveram as menores variações de emissões (e vice-versa). Importante ressaltar que 27% dos municípios brasileiros conseguiram reduzir suas emissões, entretanto, a

⁸ Aqui está se considerando a contribuição total do agronegócio.

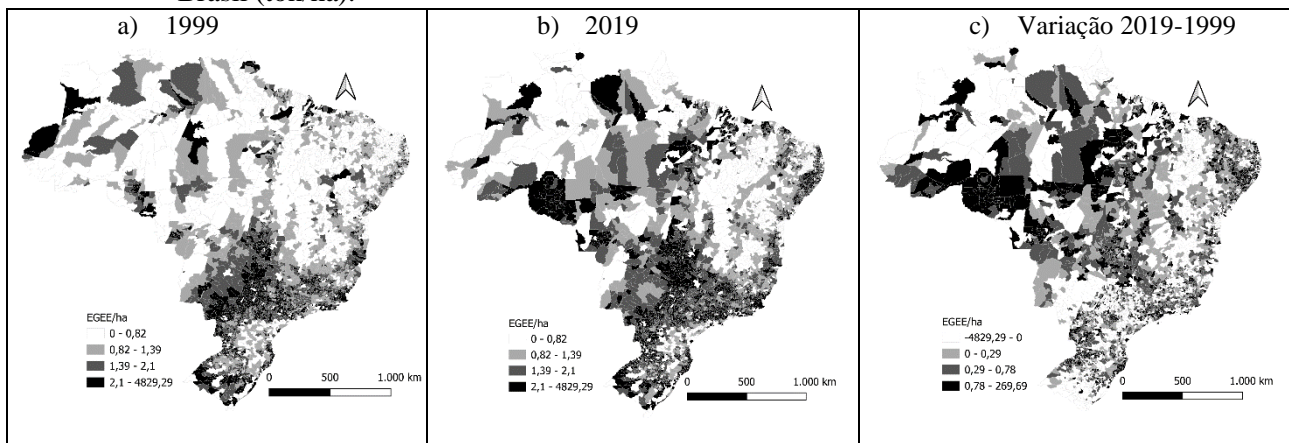
⁹ O TPR informa os membros da OMC sobre as legislações e exigências comerciais de cada país, evidenciando a interação complexa entre políticas ambientais e regulamentações globais de comércio.

análise entre as regiões evidencia diferenças importantes que podem justificar a inferência quanto à existência de um efeito escala e técnico.

Por exemplo, o Sudeste, que tinha a maior EGEE e apresentava um setor agropecuário bastante robusto quando comparado às demais regiões em 1999¹⁰, apresentou o maior percentual de municípios que diminuíram suas emissões entre 1999 e 2019 e teve maior redução da média de EGEE no período. Ao mesmo tempo, o Centro-Oeste, cuja expansão da fronteira agrícola se intensificou após os anos 1990, teve apenas 18% dos seus municípios com redução das EGEE, além de ter elevado a média das emissões entre 1999 e 2019.

Adicionalmente, o Norte, que era a região com menor emissão por hectare em 1999, também ampliou a média de EGEE. Essa dinâmica das emissões ao longo do tempo pode ser visualizada na Figura 1(c), com um alastramento das EGEE, especialmente para o Centro-Oeste, e uma redução no Sudeste. Ademais, é possível identificar um padrão de distribuição espacial em 2019, com a concentração dos maiores montantes emitidos em alguns pontos do espaço (I de Moran igual a 0,07¹¹), fenômeno menos presente em 1999 (I de Moran: 0,004, estatisticamente não significativo).

Figura 1 - EGEE da agropecuária por área explorada - 1999, 2019 e variação 2019-1999 – Municípios do Brasil (ton/ha).



Fonte: Resultado da pesquisa.

Um dos fatores que pode estar por trás dessa dinâmica de distribuição das EGEE refere-se à produção voltada para o mercado internacional. É possível que alguns municípios estejam fomentando a inserção internacional do setor da agropecuária por meio da expansão da área produzida (com desmatamento, etc), enquanto outros estejam num patamar mais avançado de desenvolvimento agrícola, com mudanças nas técnicas de produção, buscando tecnologias mais produtivas e menos nocivas ao meio ambiente. Assim, é plausível que estes últimos estejam imersos mais fortemente no mercado internacional, buscando se adequar cada vez mais às exigências de preservação ambiental dos seus parceiros comerciais.

Neste contexto, analisou-se a evolução das exportações da agropecuária, da agroindústria e do agronegócio, visando correlacioná-los, *ex post*, com as EGEE. Por meio da Tabela 2, verifica-se o intenso crescimento da exportação da agropecuária por hectare (ha) explorado, com um crescimento de aproximadamente 500% entre 1998/1997 e 2018/2017. A expansão da agroindústria também foi positiva, mas em uma magnitude menor (49%). Durante

¹⁰ Silva e Medida (1999) apresentam o Sudeste como a região mais importante na formação do Produto Interno Bruto (PIB) da agropecuária, responsável por 37%.

¹¹A matriz de vizinhança utilizada correspondeu a 1 vizinho, ressaltando que se testou outras matrizes (rainha, torre, 5 vizinhos e 10 vizinhos), mas a 1 vizinho conseguiu melhor captar o efeito espacial.

esse período, algumas regiões, como o Norte e o Centro-Oeste, ampliaram significativamente a área cultivada, o que pode ter contribuído para o aumento das exportações agropecuárias por área explorada. No entanto, o desenvolvimento das indústrias relacionadas ao setor não foi tão intenso. Isso se deve, em parte, ao fato de que, no início da ampliação da produção agropecuária, o foco tende a se dar na exportação de produtos *in natura*, com a industrialização ocorrendo em um estágio posterior. Em termos de exportação do agronegócio por área explorada, o crescimento no período foi de 226%, passando de US\$1.680 para US\$5.481.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas das exportações da agropecuária, da agroindústria e do agronegócio por área explorada – municípios do Brasil – 1998/1997 e 2017/2018.

Variáveis	Média (US\$/ha)	Desvio padrão	Coef. Variação (%)	% de municípios com crescimento das exportações entre 2017/1996
XA 1998/1997	661.9	1289.8	194.9	19
XA 2017/2018	3969.7	7684.0	193.6	
XI 1998/1997	1018.2	1975.5	194.0	16
XI 2017/2018	1511.9	2879.2	190.4	
XT 1998/1997	1680.1	3248.0	193.3	24
XT 2017/2018	5481.6	10474.9	191.1	

Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: XA refere-se às exportações da agropecuária (US\$) por área explorada (ha); XI são as exportações da agroindústria (US\$) por área explorada (ha); XT representa as exportações do agronegócio (US\$) por área explorada (ha).

No que tange às regiões brasileiras, nota-se que todas aumentaram sua inserção internacional, mas ainda se observa uma grande disparidade regional (TABELA 3). Em 2017/2018, enquanto as regiões Sudeste e Sul exportaram, respectivamente, US\$ 14.049/ha e US\$ 3.054/ha, o Centro-Oeste e o Norte exportaram apenas US\$ 178/ha e US\$ 295/ha, respectivamente. No caso do Centro-Oeste, Pires (2019) infere que, até os anos 1990, a região ainda não estava conectada ao comércio internacional, apresentando uma participação no valor total exportado inferior à das demais regiões brasileiras. A partir de 1995, um novo modelo de desenvolvimento caracterizado pela integração com o mercado internacional foi efetivado no país, conectando de fato o Centro-Oeste ao comércio internacional. Nesse sentido, embora ainda seja a região com os menores valores exportados por hectare explorado, apresentou a maior taxa de crescimento dessa inserção no período de 1998/1997 a 2018/2017, com um aumento de 2.217% nas exportações da agropecuária, 388% da agroindústria e 1.171% do agronegócio.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das exportações da agropecuária, da agroindústria e do agronegócio por área explorada (ha) - percentual de municípios que tiveram crescimento das exportações entre 1998/1997 e 2018/2017 (M.C) – municípios do Brasil – 1998/1997 e 2018/2017.

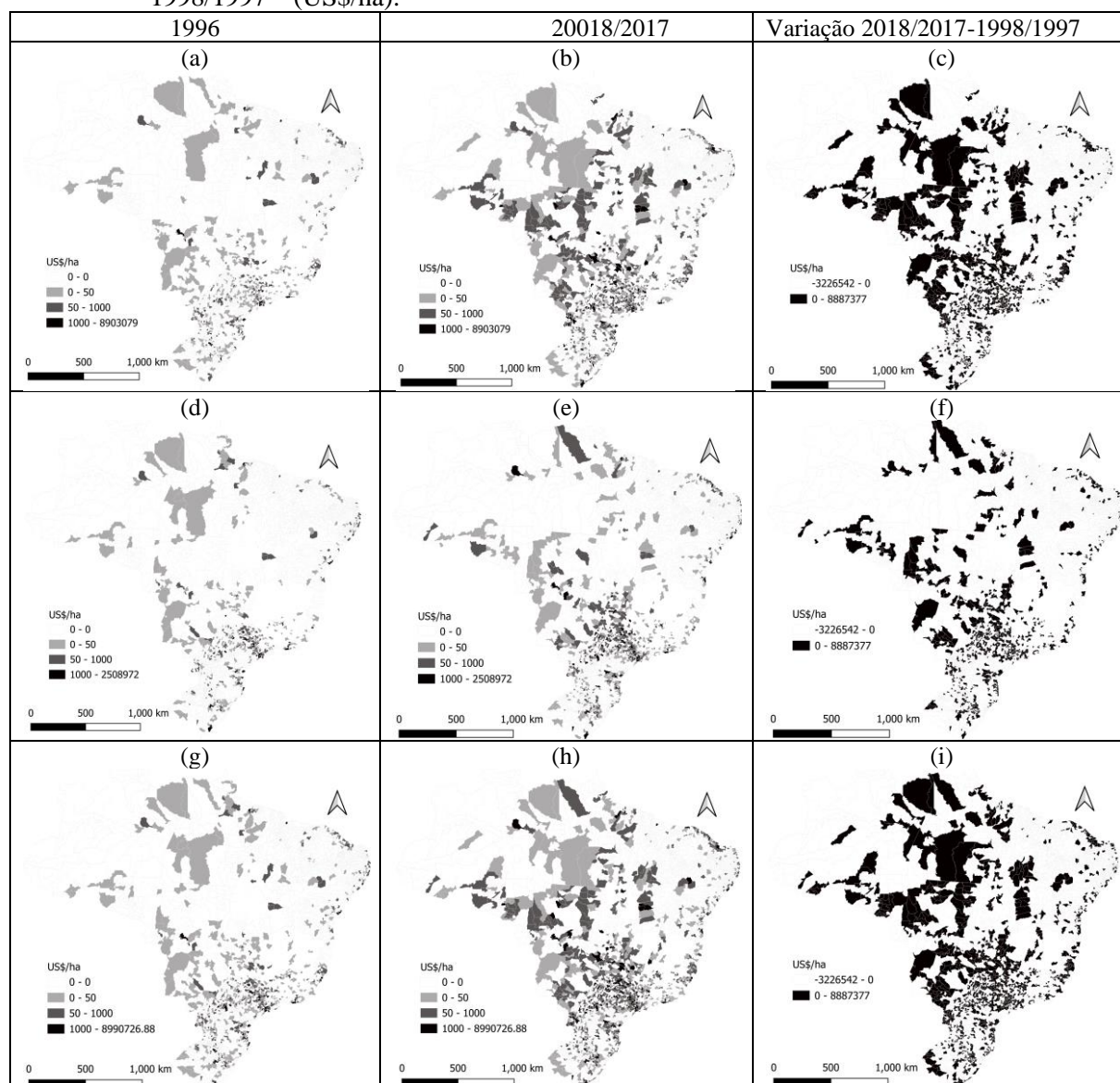
Região/ano	Xa			Xi			XT		
	Média (US\$/ha)	CV	M.C (%)	Média (US\$/ha)	CV	M.C (%)	Média (US\$/ha)	Cv	M.C (%)
Norte 1998/1997	87	196	18	24	193	12	111	193	22
Norte 2018/2017	261	182		34	189		295	181	
Nordeste 1998/1997	216	196	8	137	193	7	353	192	12
Nordeste 2018/2017	1169	197		320	193		1490	194	
Sudeste 1998/1997	1759	195	24	2279	194	21	4037	194	30
Sudeste 2018/2017	9921	194		4129	190		14049	192	
Sul 1998/1997	214	186	26	1270	191	21	1484	188	31
Sul 2018/2017	2423	187		631	182		3054	182	
Centro-Oeste 1998/1997	6	187	31	8	187	17	14	184	33
Centro-Oeste 2018/2017	139	163		39	178		178	160	

Fonte; cálculo dos autores com os dados da pesquisa.

Nota: Xa refere-se às exportações da agropecuária (US\$) por área explorada (ha); Xi são as exportações da agroindústria (US\$) por área explorada (ha); Xt representa as exportações do agronegócio (US\$) por área explorada (ha); CV refere-se ao coeficiente de variação.

Os dados analisados até o momento mostram que parte dos municípios brasileiros intensificaram a inserção internacional da agropecuária, da agroindústria e do agronegócio, e que existe certa proximidade geográfica entre os municípios exportadores, a qual se fortaleceu com o passar dos anos¹². Os dados reportados na Figura 2 evidenciam essa dinâmica.

Figura 2 - Exportação da agropecuária por área explorada (a, b, c), da agroindústria (c, d e) e do agronegócio (f, g, h) - Municípios do Brasil -1998/1997, 2018/2017 e variação 2018/2017-1998/1997 – (US\$/ha).



Fonte: Resultado da pesquisa.

Entre 1998/1997 e 2018/2017, 24% dos municípios aumentaram suas exportações do agronegócio, 19% ampliaram as exportações da agropecuária e 16% incrementaram as

¹² Isso é ratificado pelo I de Moran das exportações do agronegócio, da agroindústria e da agropecuária, o qual apresentou valores próximos de zero em 1998/1997 e de 0,06, 0,05 e 0,08, respectivamente, em 2017/2018 (matriz de vizinhança igual a 10 vizinhos).

exportações da agroindústria. Regionalmente, o Centro-Oeste destacou-se positivamente, com 33% dos municípios aumentando suas exportações do agronegócio. Nas regiões Sudeste e Sul, que já apresentavam um elevado nível de inserção internacional, 30% e 31% dos municípios, respectivamente, também registraram um crescimento nas exportações do agronegócio. Dessa forma, observa-se uma expansão das exportações do agronegócio tanto nas regiões com maior tradição no comércio internacional quanto nas novas áreas de fronteira agrícola do Brasil.

Ademais, devido às disparidades regionais, esses avanços que se teve em termos de exportação por área explorada podem estar relacionados com maiores ou menores emissões de gases de efeito estufa, conforme o raciocínio da CKA. Com efeito, ao comparar as Figuras 1 e 2 é possível identificar certa similaridade, de modo que, muitos municípios com variações positivas nas suas exportações da agropecuária/agroindústria/agronegócio tenderam a ter incrementos nas emissões, enquanto outros municípios, mesmo intensificando a sua inserção internacional, não necessariamente elevaram as suas emissões. Isso leva a crer que enquanto uns municípios aumentaram as suas produções por meio do fator escala (que leva a maiores emissões de poluentes), outros aumentaram por intermédio do fator técnico (que envolve a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes), como discutido em Antweiler et al. (2001).

Na sequência, objetivou-se analisar a relação existente entre as exportações e as emissões de gases de efeito estufa por meio de estimações dos modelos econométricos, os quais estão reportados na Tabela 4. A teoria sugere que quanto mais intenso é o comércio internacional de uma região, maior é a sua competitividade e menor tende a ser seu impacto ambiental, especialmente em decorrência das exigências internacionais quanto à preservação ambiental (Cole, 2003). Esta relação foi confirmada quando considerado todos os municípios do Brasil, obtendo um coeficiente negativo e estatisticamente significativo para a exportação da agropecuária por área explorada (Xa). Contudo, quando os dados foram desagregados por regiões, apenas o Nordeste exibiu um resultado similar, sugerindo que os municípios com maior competitividade internacional dos produtos agropecuários tendem a ter, na média, menor impacto ambiental. Nas demais regiões, a competitividade internacional do setor não se mostrou significativa na determinação das EGEE.

Basicamente, a competitividade no mercado internacional decorre de dois fatores: da expansão da produção via ampliação das áreas cultivadas (efeito escala) e/ou da intensificação de capital, com aplicação de tecnologias limpas, que resultem em maior produtividade por hectare explorado (efeito técnico). Dessa maneira, foi realizada uma análise mais detalhada sobre a origem da competitividade internacional da agropecuária ao longo dos municípios brasileiros e sua relação com a EGEE, buscando identificar se o efeito escala e/ou o efeito técnico estão relacionados às emissões do setor. Como resultado, foram obtidos coeficientes estatisticamente significativos tanto para o efeito escala quanto para o efeito técnico.

Assim, a ampliação inicial de capital na agropecuária, conjugada com a maior inserção internacional (XaM), tende a aumentar a EGEE, especialmente pela expansão da área explorada, com o desmatamento e a mecanização do solo. No entanto, essa relação positiva tende a ter um ponto de máximo, a partir do qual os incrementos de capital, associados a níveis maiores de exportação do setor (XaMQ), reduzem, na média, a EGEE. Este último efeito possivelmente decorre da adoção de tecnologias mais eficientes e de práticas agrícolas sustentáveis, que aumentam a produtividade sem a necessidade de expandir a área cultivada. Isso indica que a intensificação da competitividade internacional, aliado à intensificação de capital e inovação tecnológica, pode resultar em uma redução das emissões ambientais.

Entre as regiões, apenas o Nordeste apresentou similar resultado. Para o Sudeste, região com maior EGEE (Tabela 1), apenas o efeito “técnico” se apresentou estatisticamente significativo. Esse resultado pode decorrer do maior nível de desenvolvimento da agropecuária, com a substituição de técnicas de produção poluentes por técnicas menos agressivas à natureza, como por exemplo, a substituição da queimada na colheita da cana-de-açúcar por sua

mecanização. Com efeito, só no Estado de São Paulo, a estimativa de redução das emissões totais entre 1990 e 2015, feita por Lima et al (2016), em decorrência da redução da queima da cana de açúcar, foi de 44,3%.

Para o Centro-Oeste, as relações observadas foram contrárias às expectativas teóricas, com o coeficiente da variável XaM se apresentando negativo e o de XaMQ positivo. Conforme dados inferidos por Pires (2020), entre 1995 e 2017, a região reduziu aproximadamente em 8% a sua área dedicada à pecuária, substituindo-a por lavoura. Nesse contexto, a intensificação do capital na região, associada à maior inserção internacional, resultou em uma diminuição da área destinada à produção animal, que tende a ter um impacto maior na EGEE, favorecendo cultivos menos agressivos.

Entretanto, nem todo o aumento da área agrícola no Centro-Oeste derivou da substituição de pastagens. Parte desse aumento veio da exploração de novas áreas anteriormente não cultivadas. Assim, o avanço inicial do capital e da inserção internacional da região tendeu a mitigar a EGEE (efeito substituição pecuária-lavoura). Todavia, a partir de certo ponto, maiores incrementos desses investimentos, acompanhados de maior inserção no comércio internacional, passaram a intensificar as emissões (efeito escala, com expansão da área cultivada). Possivelmente, o Centro-Oeste se encontre em uma nova fase (efeito técnico), em que uma relação inversa entre XaM e EGEE pode se estabelecer à medida que a agropecuária avança em seu nível de desenvolvimento.

Tabela 4 - Efeito das exportações da agropecuária na EGEE da agropecuária por área explorada – municípios do Brasil e Regiões.

Variáveis explicat.	Modelos					
	Brasil (1)	Norte (2)	Nordeste (3)	Sudeste (4)	Sul (5)	Centro-Oeste (6)
Xa	-0,00005*	-0,0009	-0,00002*	0,00002	0,001	-0,00002
XaM	-0,015*	0,92	0,003*	0,0007	-0,03	-0,02*
XaMQ	-1,72e-07	-0,07	-3,38e-08*	-9,71e-08*	-4,94e-06	0,000005*
M	2,01	-3,52*	0,75	0,11	1,83	19,28
MQ	-0,91	3,38*	-0,11	-6,17	-1,31	-657,52
PIB	1,21*	0,57*	0,30*	0,35*	9,99*	0,25*
PIBQ	0,003*	-0,05**	-0,00009*	-0,0001*	-0,04*	-0,0002*
Pecuária	-0,86	0,13	-0,80	1,02*	0,50	1,29*
WM	0,12	-	-	-	-	-
WPecuária	0,24	-	-	-	-	-
WPIB	-0,02	-	-	-	-	-
WXa	0,00005*	-	-	-	-	-
WXaM	-1,93e-06	-	-	-	-	-
Hausman	92,9*	29,80*	1,32	14,85*	237,14*	2,59

Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: * significativo a 1%; ** significativo a 5%. Xa: exportações da agropecuária por hectare explorado da agropecuária; M: número de máquinas por área explorada (ha); MQ: variável M elevada ao quadrado; XaM: variável de interação entre as exportações da agropecuária com a variável M; XaMQ refere-se ao quadrado de XaM; PIB: Produto Interno Bruto da agropecuária dividido pela área explorada; PIBQ: PIB elevado ao quadrado; Pecuária: área explorada pela pecuária, ponderada pelo total da área explorada; W: defasagem espacial da variável explicativa correspondente.

É importante ressaltar que a agropecuária também influencia a economia indiretamente, impulsionando outros segmentos produtivos, especialmente as agroindústrias. E, à medida que a produção da agroindústria avança e se insere no mercado internacional, as exigências para a mitigação dos impactos ambientais da agropecuária aumentam, pois a competitividade internacional da agroindústria depende da redução do efeito ambiental do setor fornecedor de suas matérias-primas. Assim, analisou-se também a exportação da agroindústria por área explorada da agropecuária e seu efeito na EGEE, encontrando um coeficiente negativo e estatisticamente significativo (TABELA 5). Isso evidencia que, conforme os produtos processados da agropecuária são inseridos internacionalmente, diminui o seu efeito na EGEE.

De maneira mais específica (Tabela 5), analisando a dotação dos fatores de produção (XiM), identificou-se que à medida que se incrementa capital no campo e a agroindústria intensifica o comércio internacional, eleva-se a degradação ambiental. No entanto, essa relação atinge um ponto máximo, a partir do qual a associação se inverte, principalmente devido à maior inserção de tecnologias mais limpas no campo. Esse resultado ratifica o observado na Tabela 4, e se mostra mais presente quando analisado individualmente as regiões.

Tabela 5 - Efeito das exportações da agroindústria na EGEE da agropecuária por área explorada – municípios do Brasil e Regiões.

Variáveis explicat.	Modelos					
	Brasil (1)	Norte (2)	Nordeste (3)	Sudeste (4)	Sul (5)	Centro-Oeste (6)
Xi	-0,0001*	-0,00002*	-0,00005*	-0,0001*	-0,0004*	0,0001
XiM	0,007*	0,94*	-0,05*	0,002*	0,02*	-0,02
XiMQ	-6,03e-08**	-0,00005*	0,00002*	-2,14e-07*	-1,500e-07*	-0,0001
M	-1,34	-2,93*	0,08	0,43	5,32	24,12
MQ.	-0,32	2,81*	-0,01	-7,32	1,47	-795,74
PIB	1,20*	0,29*	-0,03	0,36*	10,13*	0,20*
PIBQ	-0,0003	-0,0001*	0,0002*	-0,0001*	-0,04*	-0,0002*
Pecuária	-1,67	0,57**	0,03	0,98*	1,31	1,21*
Hausman	107,6*	11,67	247,98*	58,2*	244,00*	3,10

Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: * significativo a 1%; ** significativo a 5%. Xi: exportações da agroindústria por hectare explorado da agropecuária; M: número de máquinas por área explorada (ha); MQ: variável M elevada ao quadrado; XiM: variável de interação entre as exportações da agroindústria com a variável M; XiMQ refere-se ao quadrado de XiM; PIB: Produto Interno Bruto da agropecuária dividido pela área explorada; PIBQ: PIB elevado ao quadrado; Pecuária: área explorada pela pecuária, ponderada pelo total da área explorada.

Por fim, foram consideradas as exportações tanto da agropecuária quanto da agroindústria — denominadas exportações do agronegócio — na análise da EGEE. Conforme os resultados apresentados na Tabela 6, confirmou-se as inferências feitas anteriormente nas Tabelas 4 e 5, observando que o aumento da competitividade do agronegócio tende a reduzir a EGEE, especialmente devido às exigências internacionais quanto à mitigação dos seus impactos ambientais. No entanto, esse aumento da competitividade pode ser impulsionado tanto pelo aumento da escala de produção do agronegócio (efeito escala), o que, nesse caso, tem um efeito negativo na EGEE, quanto pelo efeito técnico, por meio da utilização de tecnologias menos nocivas ao meio ambiente.

Para finalizar, para todos os municípios do Brasil e para praticamente todas as regiões, observou-se a curva ambiental de Kuznets. Inicialmente, essa curva indica uma associação positiva entre o PIB da agropecuária e a EGEE. Entretanto, com o desenvolvimento subsequente do setor, a associação torna-se negativa. No caso da pecuária, verificou-se um efeito positivo e estatisticamente significativo na EGEE somente para os municípios das regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste. As demais variáveis explicativas não se apresentaram como relevantes no processo de degradação ambiental.

Tabela 6 - Efeito das exportações do agronegócio na EGEE da agropecuária por área explorada – municípios do Brasil e Regiões.

Variável explicativa	Modelos					
	Brasil (1)	Norte (2)	Nordeste (3)	Sudeste (4)	Sul (5)	Centro-Oeste (6)
Xt	-0,00006*	-0,00001*	-0,00001*	-0,000009*	-0,0004*	0,00003*
XtM	-0,008*	0,044*	0,001*	0,001*	0,02*	-0,007
XtMQ	9,36e-0,8*	-6,92e-06*	-1,64e08*	-5,03e-08*	-1,41e-07*	5,47e-06
M	1,69	-2,96**	0,99	-3,29	-6,34	23,52
MQ	-1,14	2,84**	-0,14	5,67	1,84	-785,47
PIB	1,27*	0,26*	0,37*	0,38*	10,14*	0,22*
PIBQ	0,0003*	-0,00001*	-0,0001*	-0,0001*	-0,04*	-0,0002*
Pecuária	-0,68	0,48**	-0,80	1,47*	1,17	1,23*
Hausman	99,4*	11,15	11,72	8,06***	240,67*	2,71

Fonte: Resultado da pesquisa.

Nota: * significativo a 1%; ** significativo a 5%. Xt: exportações do agronegócio por hectare explorado da agropecuária; M: número de máquinas por área explorada (ha); MQ: variável M elevada ao quadrado; XtM: variável de interação entre as exportações do agronegócio com a variável M; XtMQ refere-se ao quadrado de XaM; PIB: Produto Interno Bruto da agropecuária dividido pela área explorada; PIBQ: PIB elevado ao quadrado; Pecuária: área explorada pela pecuária, ponderada pelo total da área explorada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou o impacto das exportações da agropecuária sobre as emissões de gases de efeito estufa (EGEE) nos municípios brasileiros. Os resultados indicaram que o aumento da competitividade internacional da agropecuária tende a reduzir as EGEE, devido às exigências globais por práticas agrícolas menos poluentes. Esse aumento na competitividade pode decorrer da ampliação da área de produção (efeito escala), apresentando inicialmente um impacto positivo sobre as emissões, ou do aumento da produtividade por área, com a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes (efeito técnico), apresentando um efeito negativo nas emissões.

Para os municípios brasileiros e para a maioria das regiões do país, observou-se inicialmente o efeito escala, que ocorre com a expansão do capital investido e o aumento das exportações do setor. Esse efeito demonstra um crescimento na EGEE até atingir um ponto de máximo. Após este ponto, o efeito técnico começa a predominar, mostrando que, com o contínuo aumento das exportações e do capital investido no setor, ocorre uma redução na EGEE. Isso sugere que a introdução de tecnologias mais limpas e eficientes, associadas ao aumento da produtividade por área explorada, pode compensar o impacto ambiental inicial provocado pela expansão da produção.

Neste contexto, para potencializar os benefícios ambientais da competitividade internacional da agropecuária, a adoção de tecnologias sustentáveis se torna crucial. Medidas como incentivos fiscais, subsídios para pesquisa e desenvolvimento de práticas agropecuárias sustentáveis, e programas de capacitação para agricultores, podem ser políticas importantes neste processo. Além disso, é crucial fortalecer a regulamentação e fiscalização ambiental visando garantir que a expansão da produção agropecuária não resulte em maior ônus ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. (2012). *Econometria espacial aplicada*. Editora Alínea.
- Antweiler, W., Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2001). Is Free Trade Good for the Environment? *American Economic Review*, 91(4), 877–908. <https://doi.org/10.1257/aer.91.4.877>

Carvalho, T. S., & Almeida, E. (2010). A hipótese da curva de Kuznets ambiental global: uma perspectiva econométrico-espacial. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, 40(3), 587–615. <https://doi.org/10.1590/S0101-41612010000300004>

CEPEA. (2024). PIB do agronegócio sofre queda no primeiro trimestre devido aos baixos preços agropecuários.

Cole, M. A. (2003). Development, trade, and the environment: how robust is the Environmental Kuznets Curve? *Environment and Development Economics*, 8(4), 557–580. <https://doi.org/10.1017/S1355770X0300305>

Cole, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics*, 48(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.007>

COLE, M. A., RAYNER, A. J., & BATES, J. M. (1997). The environmental Kuznets curve: an empirical analysis. *Environment and Development Economics*, 2(4), 401–416. <https://doi.org/10.1017/S1355770X97000211>

Costa Junior, C., Goulart, R. S., Albertini, T. Z., Mazzetto, A. M., Feigl, B. J., Cerri, C. E. P., Lanna, D. P., & Cerri, C. C. (2011). Emissão de gases do efeito estufa e sustentabilidade: uma perspectiva do sistema de produção de carne bovina no Brasil. *Revista Brasileira De Agropecuária Sustentável*, 1.

Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>

Elhorst, J. P. (2014). *Spatial Econometrics. From Cross-Sectional Data to Spatial Panels*. Springer.

FEARNSIDE, P. M. (2005). Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. *Conservation Biology*, 19(3), 680–688. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x>

FERREIRA, D. Comércio exterior do agronegócio: primeiro semestre de 2024. Carta de Conjuntura, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), agosto/2024. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/index.php/2024/08/comercio-exterior-do-agronegocio-primeiro-semester-de-2024/>. Acesso em: 05/08/2024.

Gerber, P. J. et al (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2118443>

Hertel, T. W., Golub, A. A., Jones, A. D., O'Hare, M., Plevin, R. J., & Kammen, D. M. (2010). Effects of US Maize Ethanol on Global Land Use and Greenhouse Gas Emissions: Estimating Market-mediated Responses. *BioScience*, 60(3), 223–231. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.8>

IBGE. (2011). Evolução da Divisão Territorial do Brasil. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15771-evolucao-da-divisao-territorial-do-brasil.html>

Kelejian, h., & Piras, G. (2017). *Spatial Econometrics*. Academic Press.

Kucharik, C. J., & Serbin, S. P. (2008). Impacts of recent climate change on Wisconsin corn and soybean yield trends. *Environmental Research Letters*, 3(3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/3/034003>

Kunimitsu, Y., Kudo, R., Iizumi, T., & Yokozawa, M. (2016). Technological spillover in Japanese rice productivity under long-term climate change: evidence from the spatial econometric model. *Paddy and Water Environment*, 14(1), 131–144. <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0485-z>

- LIMA, M. A. de; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C. Gases de efeito estufa da queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: 1990 a 2015. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016.
- López, R., & Galinato, G. I. (2005). Deforestation and Forest-Induced Carbon Dioxide Emissions in Tropical Countries: How Do Governance and Trade Openness Affect the Forest-Income Relationship? *The Journal of Environment & Development*, 14(1), 73–100. <https://doi.org/10.1177/1070496504273878>
- Millo, G., & Piras, G. (2012). splm : Spatial Panel Data Models in R. *Journal of Statistical Software*, 47(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v047.i01>
- Ministério da Agricultura e Pecuária. (2023). Ministério da Agricultura e Pecuária. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/>
- Morais, A. E. A. de. (2019). A Curva Ambiental de Kuznets para emissão de CO2 no Brasil: uma análise com cointegração em painel [Dissertação]. Federal University of Ouro Preto.
- MUNHOZ, L.; VARGAS, D.; VALENTE, F. Comércio internacional e meio ambiente - evolução dos princípios ambientais nas disputas comerciais. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getúlio Vargas - FGV, São Paulo, SP, Brasil, 2023.
- Nepstad, R., Hansen, B. H., & Skancke, J. (2021). North sea produced water PAH exposure and uptake in early life stages of Atlantic Cod. *Marine Environmental Research*, 163, 105203. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105203>
- Peters, G. P., Minx, J. C., Weber, C. L., & Edenhofer, O. (2011). Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(21), 8903–8908. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006388108>
- Pires, M.J.S.(2019). Estratégia de transformação econômica do Centro-Oeste: o caminho externo. Texto para discussão IPEA, n. 2504.
- Poon, J. P. H., Casas, I., & He, C. (2006). The Impact of Energy, Transport, and Trade on Air Pollution in China. *Eurasian Geography and Economics*, 47(5), 568–584. <https://doi.org/10.2747/1538-7216.47.5.568>
- Pretty, J. N., Noble, A. D., Bossio, D., Dixon, J., Hine, R. E., Penning de Vries, F. W. T., & Morison, J. I. L. (2006). Resource-Conserving Agriculture Increases Yields in Developing Countries. *Environmental Science & Technology*, 40(4), 1114–1119. <https://doi.org/10.1021/es051670d>
- SEEG. (2023). Análise das emissões brasileiras de Gases Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021. <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>
- Silva, A. B. de O., & Medina, M. H. (1999). Produto Interno Bruto por Unidade da Federação – 1985-1998.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
- Souza, B., & Haddad, E. (2022). Climate change in Brazil: dealing with uncertainty in agricultural productivity models and the implications for economy-wide impacts. *Spatial Economic Analysis*, 17(1), 83–100. <https://doi.org/10.1080/17421772.2021.1934524>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>.