

ECOEFICIÊNCIA AGROPECUÁRIA NOS ESTADOS NORDESTINOS DO BRASIL (2000-2021)

AGRICULTURAL & ANIMAL FARMING ECO-EFFICIENCY IN THE NORTHEASTERN STATES OF BRAZIL (2000-2021)

Maria Avyla Batista da Silva
Universidade Regional do Cariri (URCA)
maria.avylaa@gmail.com

Eliane Pinheiro de Sousa
Universidade Regional do Cariri (URCA)
pinheiroeliane@hotmail.com

Manoel Alexandre de Lucena
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
manoelalex123@gmail.com

Grupo de Trabalho (GT): GT06. Desenvolvimento rural, territorial e regional

Resumo

A ecoeficiência consiste na busca por uma produção mais racional e equilibrada, capaz de simultaneamente maximizar os resultados econômicos e minimizar o uso de insumos e as emissões de poluentes. Tal discussão torna-se ainda mais relevante quando se trata do Nordeste brasileiro, marcado por condições climáticas adversas, escassez hídrica e alta variabilidade pluviométrica. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva analisar a ecoeficiência agropecuária nos nove estados nordestinos de 2000 a 2021 mediante o uso do método de Análise Envoltória de Dados com aplicação da técnica de Análise de Janela. Para tal, utilizaram a área plantada e o emprego agropecuário como insumos, o Produto Interno Bruto do setor agropecuário como produto desejável, e as emissões de metano agropecuário como produto indesejável. Embora persistam desafios relacionados à desigualdade estrutural, à escassez hídrica e à necessidade de maior integração entre inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental, os resultados indicam um processo gradual de aprimoramento da ecoeficiência agropecuária no conjunto dos estados nordestinos. Portanto, conclui-se que o setor agropecuário nordestino, mesmo diante de expressivas heterogeneidades entre os estados nordestinos, caminha para um modelo produtivo mais equilibrado, resiliente e alinhado às metas de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: ecoeficiência agropecuária; Análise Envoltória de Dados; Análise de Janela; nordeste brasileiro.

Abstract

Eco-efficiency consists of the pursuit of more rational and balanced production, capable of simultaneously maximizing economic results and minimizing input use and pollutant emissions. This discussion becomes even more relevant when considering the Brazilian Northeast, characterized by adverse climate conditions, water scarcity, and high rainfall variability. In this context, this study aims to analyze agricultural & animal farming eco-efficiency in the nine Northeastern states from 2000 to 2021 using the Data Envelopment Analysis (DEA) method with the application of the Window Analysis technique. To this end, planted area and agricultural & animal farming employment were used as inputs, the Gross Domestic Product of the agricultural & animal farming sector as the desirable output, and agricultural & animal farming methane emissions as the undesirable output. Although challenges related to structural inequality, water scarcity, and the need for greater integration between technological innovation and environmental sustainability persist, the results indicate a gradual process of improving agricultural & animal farming eco-efficiency across the Brazilian Northeastern states. Therefore, it can be concluded that the Northeastern agricultural & animal farming sector, despite significant differences among the states, is moving toward a more balanced and resilient production model aligned with sustainable development goals.

Keywords: agricultural & animal farming eco-efficiency; Data Envelopment Analysis; Window Analysis; Brazilian Northeastern region.

1 Introdução

Conceitualmente, Alencar *et al.* (2019) afirmam que a ecoeficiência se baseia na integração entre as dimensões econômica e ambiental da produção, incorporando princípios de gestão sustentável dos recursos naturais. Desse modo, sob essa perspectiva, a ecoeficiência traduz-se na busca por uma produção mais racional e equilibrada, capaz de maximizar os resultados econômicos ao mesmo tempo em que minimiza o uso de insumos e as emissões de poluentes (Puertas *et al.*, 2022).

Esse conceito, embora aplicado em diversos setores, tem ganhado particular relevância no contexto agropecuário. Nas últimas décadas, a ecoeficiência agropecuária consolidou-se como um conceito estratégico essencial para o avanço de um modelo de desenvolvimento sustentável no meio rural (Costa, 2021). Para o autor supracitado, a sua importância decorre da capacidade de articular dois objetivos percebidos como contraditórios: o aumento da produtividade e da segurança alimentar, de um lado, e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da exploração intensiva dos recursos naturais, de outro.

Para alcançar essa articulação, são adotadas práticas voltadas à redução do consumo de água, energia e solo, à eficiência no uso de fertilizantes e defensivos, e à diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Cruz, 2023). Nesse sentido, para Aguiar, Silva Neto e Erthal Junior (2023), o conceito de ecoeficiência assume relevância não apenas como uma ferramenta analítica, mas também como um instrumento orientador de políticas públicas e decisões produtivas, contribuindo para a transição de uma agricultura tradicional para um sistema mais sustentável, resiliente e competitivo.

No contexto brasileiro, essa discussão ganha especial significado quando aplicada à região Nordeste, marcada historicamente por condições climáticas adversas, escassez hídrica e alta variabilidade pluviométrica (Araújo; Araújo, 2024). Ainda segundo os autores, o predomínio do clima semiárido e a ocorrência recorrente de secas prolongadas impõem restrições severas à expansão agrícola, ao passo que a degradação dos solos e a fragilidade dos ecossistemas locais intensificam a vulnerabilidade ambiental. Ademais, conforme Aquino, Gazolla e Schneider (2018), esses fatores, combinados às desigualdades socioeconômicas persistentes e limitações no acesso à tecnologia na região, configuram um cenário em que a busca pela ecoeficiência não é apenas desejável, mas necessária para garantir a viabilidade produtiva e a segurança alimentar.

Nesse sentido, o Nordeste brasileiro constitui um ambiente privilegiado para investigar a interação entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental na agropecuária. Avaliar a ecoeficiência deste setor em tal região permite identificar quais estados conseguem produzir mais com menos recursos, reduzindo simultaneamente as emissões e os impactos ambientais, além de revelar os gargalos estruturais e institucionais que dificultam a difusão de práticas sustentáveis.

Diante desse panorama, o presente trabalho tem por objetivo analisar a ecoeficiência agropecuária nos estados nordestinos de 2000 a 2021, utilizando o método de Análise Envolvória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA) combinada com a técnica de Análise de Janela (*Windows Analysis* - WA). Em termos específicos, busca-se mensurar o desempenho relativo dos estados quanto à ecoeficiência agropecuária, observando a sua evolução temporal e as possíveis convergências entre crescimento econômico e mitigação ambiental.

Ao integrar evidências empíricas e fundamentos teóricos, pretende-se contribuir para o debate sobre a sustentabilidade da agropecuária brasileira, oferecendo subsídios à formulação de políticas orientadas à otimização dos recursos produtivos, à redução das emissões de poluentes e à promoção de sistemas produtivos mais resilientes e inclusivos (Silva *et al.*, 2021). Assim, a ecoeficiência agropecuária é compreendida não apenas como um indicador técnico de desempenho, mas como um vetor estratégico para a transformação do modelo de desenvolvimento rural nordestino.

Além dessas colocações introdutórias, o artigo está organizado em mais quatro seções. A segunda traz um breve referencial teórico-empírico sobre o tema em tela, a terceira mostra os procedimentos metodológicos utilizados com a descrição dos métodos analíticos considerados,

acrescido da área de estudo e especificação das variáveis empregadas. Os resultados são apresentados e discutidos na seção seguinte, acompanhada, por último, das considerações finais.

2 Referencial teórico-empírico

2.1 Ecoeficiência: a intersecção entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental

A ecoeficiência surgiu da necessidade de se promover ações coletivas que protegessem o meio ambiente para as futuras gerações, buscando formas de produção menos danosas aos recursos naturais (Maciel; Maciel; Gomes, 2020). Silva (2021) complementa que a ecoeficiência surgiu como um fundamento teórico para aferir a sustentabilidade sob a ótica da firma, ou seja, seu impacto ou contribuição para a manutenção do capital natural em paralelo a seu desempenho econômico.

Para Silva *et al.* (2022), a ecoeficiência permite mensurar a sustentabilidade em termos relativos, em que quantifica o potencial de redução de impactos ambientais e acréscimos de produção mediante inovação e disseminação de melhores práticas identificadas em uma análise.

Segundo Maciel, Maciel e Gomes (2020), as diretrizes do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (*World Business Council for Sustainable Development – WBCSD*, 2020) ressaltam que a ecoeficiência pode assumir sete dimensões, a saber: (i) redução da intensidade do consumo de materiais em produtos e serviços; (ii) redução da intensidade do consumo de água e energia em produtos e serviços; (iii) diminuição da dispersão de compostos tóxicos; (iv) promoção da reciclagem; (v) maximização da utilização de recursos renováveis; (vi) ampliação da durabilidade dos produtos; e (vii) expansão do uso de produtos e serviços.

O conceito de ecoeficiência está em evolução contínua, uma vez que o ajustamento do desenvolvimento econômico com a preservação ambiental continua sendo aperfeiçoado, já que, a priori, não se acreditava que ocasionaria melhorias ambientais. Portanto, deve-se continuar fabricando no ritmo requerido pela economia, todavia usando menos material ou material menos agressivo ao meio ambiente, estimulando, assim, a preservação ambiental, em que se busca impactar cada vez menos os recursos naturais, ao passo que se fabrica produtos mais competitivos e que atendam às exigências do mercado (Maciel; Maciel; Gomes, 2020).

2.2 Evidências empíricas

Os estudos empíricos que discorrem sobre ecoeficiência, contrapondo as análises convencionais de eficiência econômica, têm conquistado espaço nas agendas de pesquisa. Em outros termos, a inclusão de externalidades negativas no modelo analítico tradicional permite estimar fronteiras de ecoeficiência, que incorporam a eficiência ambiental.

No tocante à ecoeficiência agropecuária, objeto de estudo deste artigo, a literatura empírica tem se expandido nas últimas décadas, tanto em nível internacional quanto nacional, impulsionada pela necessidade de conciliar o desempenho econômico à preservação ambiental. A aplicação de métodos quantitativos, como a Análise Envoltória de Dados (DEA), tem permitido mensurar com maior precisão o desempenho relativo dos sistemas agropecuários, revelando a heterogeneidade existente entre regiões e estados (Silva, 2021; Gama, 2022; Silva *et al.*, 2022).

Entre as diversas abordagens da literatura internacional, destaca-se o crescente interesse por ecossistemas vulneráveis, especialmente as regiões semiáridas, que enfrentam maiores desafios para equilibrar produtividade e conservação ambiental. Nesse contexto, Wang *et al.* (2021) observam que, na China, práticas como o abandono de terras inclinadas e o reflorestamento contribuíram para reduzir a erosão do solo e melhorar a ecoeficiência, embora persistam obstáculos como a escassez hídrica e a urbanização. Em escala global, Zhang *et al.* (2020) demonstra que as mudanças climáticas têm

promovido maior captura de carbono e eficiência hídrica em ecossistemas semiáridos, com a precipitação desempenhando papel central nesse processo. Esses resultados reforçam a importância de intervenções direcionadas e políticas de manejo adaptativo voltadas à sustentabilidade agroambiental.

No contexto brasileiro, particularmente na região Nordeste, os estudos evidenciam a influência de condicionantes estruturais e ambientais sobre os níveis de eficiência. Araújo (2022) e Araújo e Araújo (2024) apontam que os municípios situados no bioma Caatinga apresentam, em geral, desempenho inferior, reflexo da escassez hídrica, da irregularidade das chuvas e da baixa incorporação tecnológica. Tais fatores limitam o uso racional dos recursos naturais e comprometem a sustentabilidade produtiva, reforçando a dependência de políticas públicas voltadas à adaptação climática e ao manejo sustentável. Nessa mesma linha, Bezerra (2022) observa que a difusão de práticas de agricultura de baixo carbono no semiárido ainda é incipiente, em virtude das restrições de infraestrutura, do baixo acesso à assistência técnica e do alto custo das tecnologias ambientais.

Por outro lado, pesquisas como as de Cruz (2023) e Costa (2021) demonstram que a adoção de tecnologias limpas e estratégias de manejo sustentável, como irrigação eficiente, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e recuperação de pastagens degradadas, contribui para elevar simultaneamente a produtividade e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Esses resultados reforçam o papel da ecoeficiência como instrumento orientador de políticas públicas e decisões produtivas, deslocando a fronteira de eficiência em direção a modelos mais sustentáveis.

Sob uma perspectiva espacial, Ramos (2023) identificou que os principais *clusters* agropecuários do Nordeste concentram emissões elevadas de metano, especialmente nos estados da Bahia, Maranhão e Ceará, cujas estruturas produtivas baseiam-se em sistemas extensivos de criação animal. Em contrapartida, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte apresentam menores emissões relativas por unidade de produto, associadas à adoção de práticas mais intensivas em tecnologia e à melhor gestão dos recursos hídricos. Esses resultados evidenciam que a eficiência ambiental na região depende tanto das condições climáticas quanto do grau de modernização produtiva.

Adicionalmente, Marques (2025) destaca que a recente expansão da produção de soja no Piauí e na Bahia tem ocorrido com ganhos de produtividade, mas também com maior pressão sobre o uso da terra, o que reforça a necessidade de políticas de ordenamento territorial. Na mesma direção, Magalhães, Gonçalves e Oliveira (2021) e Dias, Costa e Silva (2022) ressaltam que a estrutura econômica desigual do Nordeste condiciona a capacidade de incorporação tecnológica, tornando a produtividade agropecuária dependente de incentivos institucionais, crédito rural e assistência técnica.

3 Metodologia

Esta seção aborda o método analítico empregado, bem como o recorte temporal e espacial elencado e, também, as variáveis utilizadas.

3.1 Análise Envoltória de Dados (DEA)

A técnica de Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA) consiste em um método não paramétrico utilizado para avaliar a eficiência (e ecoeficiência) relativa das unidades tomadoras de decisão (*Decision Making Units* - DMUs), sendo que não necessita da forma funcional exata entre entradas e saídas nem precisa de hipóteses sobre a distribuição dos resíduos, assegurando maior flexibilidade ao se considerar múltiplas entradas e saídas (Toma *et al.*, 2017).

O valor da eficiência determinada pela técnica DEA limita-se de zero a um, sendo que cada DMU deve ser comparada com a sua projeção na fronteira, ao passo que, se a DMU estiver sobre a fronteira, obterá ecoeficiência máxima igual à unidade, que corresponde ao seu padrão ótimo (Rocha;

Rebelatto; Camioto, 2015).

Segundo Silva *et al.* (2022), a DEA baseia-se em problemas de programação linear e representa uma ferramenta multifatorial de aferição de ecoeficiência ao estimar uma fronteira empírica contendo as melhores práticas a partir de um conjunto de possibilidades de produção, podendo ser classificada com retornos constantes de escala (*Constant Returns to Scale* - CRS) e com retornos variáveis de escala (*Variable Returns to Scale* -VRS) e orientada ao insumo ou ao produto. Caso seja orientado aos insumos, propõe-se minimizar os insumos, considerando os produtos constantes, ao passo que se for orientado ao produto, o modelo determina as unidades que maximizam sua produção, mantendo os insumos constantes.

3.1.1 Windows Analysis (WA)

A análise de janela (*Windows Analysis* – WA) refere-se a um método estruturado para condensar os dados das DMUs de vários anos distintos, sendo realizado por meio de múltiplas aplicações da técnica DEA, admitindo diferentes combinações de anos (Rocha, Rebelatto, Camioto, 2015; Pereira; Tavares, 2020). Por meio deste método, torna-se possível analisar DMUs em vários anos agrupadas em janelas distintas.

Para esses autores, semelhante à estrutura do cálculo de médias móveis, tal método busca separar os anos considerados em diferentes janelas, possibilitando uma agregação das DMUs concernentes aos vários anos em uma mesma aplicação. Desta forma, deve-se identificar o tamanho da janela (p) e o número de janelas (n) seguindo as equações (1) e (2), respectivamente:

$$p = \frac{k+1}{2} \quad (1)$$

$$n = k - p + 1 \quad (2)$$

Em que: k se refere ao número de anos considerado (variando de 2000 a 2021 neste trabalho); e p é tamanho da janela e n é a quantidade de janelas.

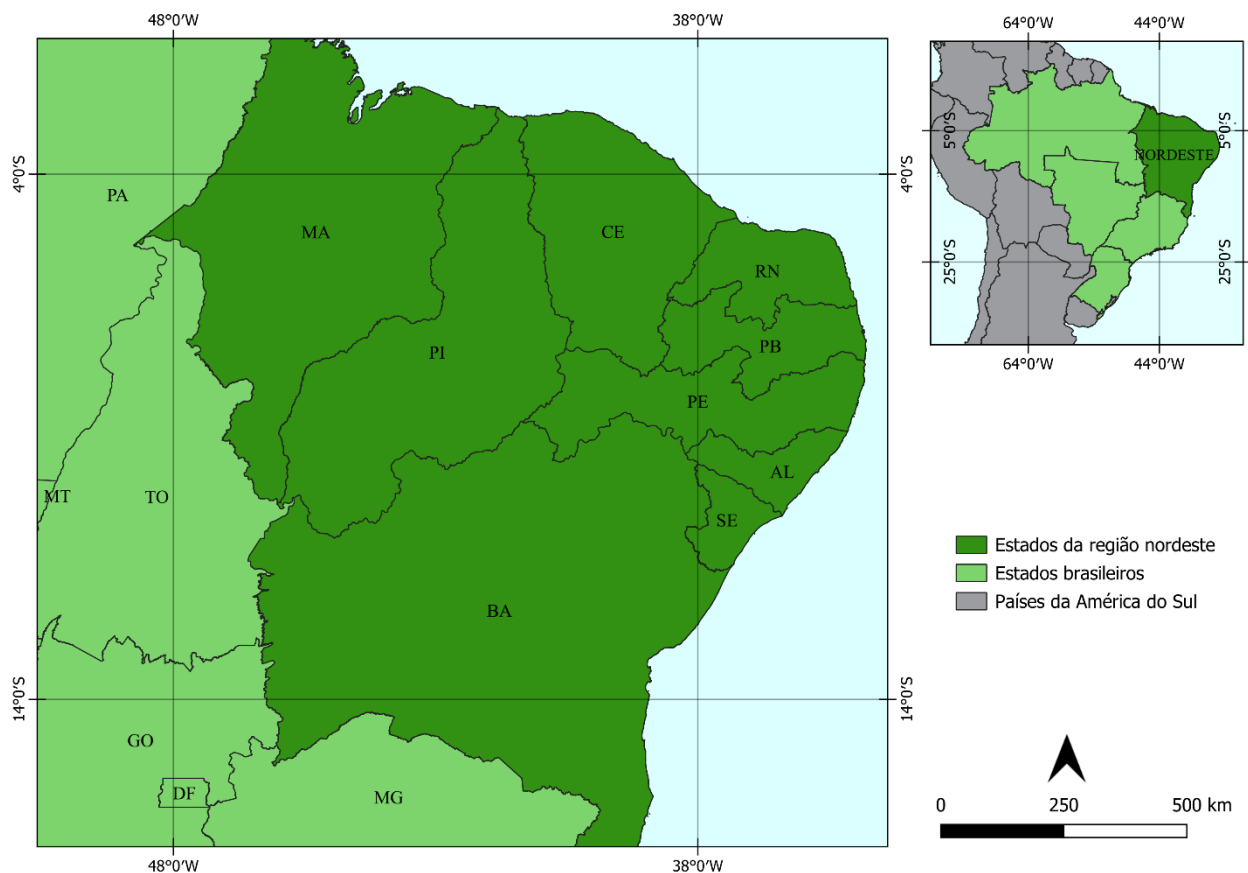
3.2 Área de estudo e variáveis empregadas

A análise abrange os nove estados do Nordeste: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, como apresentados na Figura 1. O estudo delimita essa área devido à sua relevância agropecuária e às condições climáticas adversas, especialmente o semiárido, que tornam a mensuração da ecoeficiência particularmente importante para o planejamento sustentável.

Trata-se de uma região marcada pela predominância do clima semiárido, caracterizado por altas temperaturas médias anuais, irregularidade pluviométrica e longos períodos de estiagem, que limitam a disponibilidade de recursos hídricos e aumentam a vulnerabilidade dos sistemas produtivos (Paes; Goes; Conrado, 2023). Em contrapartida, áreas de clima tropical úmido e litorâneo favorecem a diversificação produtiva e a adoção de cultivos de maior rendimento (Barbosa; Valladares, 2022).

Essa heterogeneidade climática e ecológica repercute diretamente sobre a eficiência do uso dos recursos naturais e sobre a intensidade das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Ramos, 2023), tornando o Nordeste um ambiente relevante para compreender as interações entre economia e meio ambiente no setor agropecuário. A mensuração da ecoeficiência nesse contexto permite identificar quais estados conseguem produzir mais, com menor consumo de insumos e menores impactos ambientais, diante de restrições climáticas significativas.

Figura 1: Localização geográfica dos estados nordestinos



Fonte: Elaborada pelas autores (2025).

No presente estudo, as variáveis selecionadas para a mensuração da ecoeficiência agropecuária foram definidas com base em sua capacidade de representar, de forma integrada, os recursos produtivos utilizados, o desempenho econômico obtido e os impactos ambientais gerados pelas atividades do setor (Silva, 2021; Gama, 2022). Essas variáveis, conforme aplicação na literatura sobre DEA, foram classificadas em três categorias: *inputs*, *output* desejável e *output* indesejável, refletindo a interação entre os fatores de produção e os resultados econômicos e ambientais dos estados nordestinos.

Como entradas, foram considerados a área plantada e o emprego agropecuário. A área plantada, medida em hectares, expressa a dimensão territorial efetivamente utilizada para fins produtivos, sendo um indicador direto do uso dos recursos naturais, notadamente do solo e da água. Sua inclusão permite avaliar a intensidade do uso da terra e a capacidade produtiva em contextos de restrição ambiental, como o semiárido nordestino. Quanto menor a área necessária para alcançar determinado nível de produto, maior tende a ser a eficiência do sistema agropecuário, o que reforça sua relevância como variável de entrada (Ladeira, 2025). Já o emprego agropecuário, mensurado em número de trabalhadores, representa o fator trabalho e evidencia o esforço humano aplicado às atividades rurais. Gama (2022) destaca que essa variável é fundamental para compreender o papel da mão de obra no desempenho do setor, bem como para identificar estruturas produtivas que consigam combinar geração de emprego com eficiência econômica e sustentabilidade ambiental.

Quadro 1: Variáveis empregadas na mensuração da ecoeficiência agropecuária nos estados da região nordeste no período de 2000 a 2021

Categoria	Variável	Descrição	Unidade de medida	Fonte
<i>Inputs</i>	area	Área plantada	Hectare	IBGE (2025)
	emprego	Emprego agropecuário	Unidade	RAIS (2025)
<i>Output</i> desejável	pib_agro	PIB agropecuário	Reais	IBGE (2025)
<i>Output</i> indesejável	ch4	Emissões de metano agropecuário	Toneladas	SEEG (2025)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O Produto Interno Bruto do setor agropecuário constitui o *output* desejável do modelo. Ele representa o resultado econômico agregado da produção agropecuária e expressa o retorno obtido a partir dos insumos aplicados (Silva, 2021). Trata-se de um indicador de produtividade e desempenho, em outras palavras, reflete a capacidade dos estados de transformar recursos limitados (como terra e trabalho) em valor econômico (Luz; Fochezatto, 2022). Nesse contexto da ecoeficiência, um maior PIB agropecuário obtido com menor uso de insumos e menor emissão de poluentes indica um desempenho mais sustentável e competitivo.

Por fim, as emissões de metano foram incorporadas como *output* indesejável, representando o componente ambiental negativo associado à atividade agropecuária. Perosa (2024) explica que o aumento das emissões está diretamente ligado à intensificação da produção animal, o que torna sua mensuração essencial para avaliar o custo ambiental do crescimento agropecuário.

Assim, o conjunto de variáveis adotado neste estudo permite mensurar de forma abrangente a ecoeficiência agropecuária, captando o equilíbrio entre a utilização de recursos produtivos, os resultados econômicos e os impactos ambientais. Essa abordagem possibilita identificar padrões de desempenho mais sustentáveis e fornece subsídios para o aprimoramento das políticas públicas.

4 Resultados e discussão

Os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA), combinada com a Análise de Janela, permitem compreender a dinâmica da ecoeficiência agropecuária nos estados da região Nordeste entre os anos de 2000 a 2021. Inicialmente, porém, são analisadas as estatísticas descritivas das variáveis consideradas.

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo — PIB agropecuário, emprego agropecuário, área plantada e emissões de metano, permitindo uma visão geral sobre o comportamento e a dispersão dos dados no período analisado. Observa-se que o PIB agropecuário registrou média com grande amplitude entre o mínimo e o máximo, com coeficiente de variação superior a 100%, indicando forte heterogeneidade produtiva entre os estados nordestinos. Essa variação reflete, segundo Magalhães, Gonçalves e Oliveira (2021), as diferenças na estrutura econômica e na escala das atividades agropecuárias, destacando o papel dominante de estados como Bahia e Maranhão, que concentram, respectivamente, maior valor agregado e diversificação produtiva.

Tabela 1: Estatísticas descritivas das variáveis empregadas para mensurar a ecoeficiência agropecuária dos estados nordestinos entre os anos de 2000 a 2021

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	DP	CV (%)
pib_agro	34058220	219094	2700506,50	4346131,32	4722510,88	108,66
emprego	97133	3192	15912,50	25601,05	23988,26	93,70
area	5032413	274263	937378	1339972,65	1248456,32	93,17
ch4	768831,17	59989,55	134830,71	215744,29	207638,86	96,24

Notas: DP e CV indicam, respectivamente, desvio padrão e coeficiente de variação.

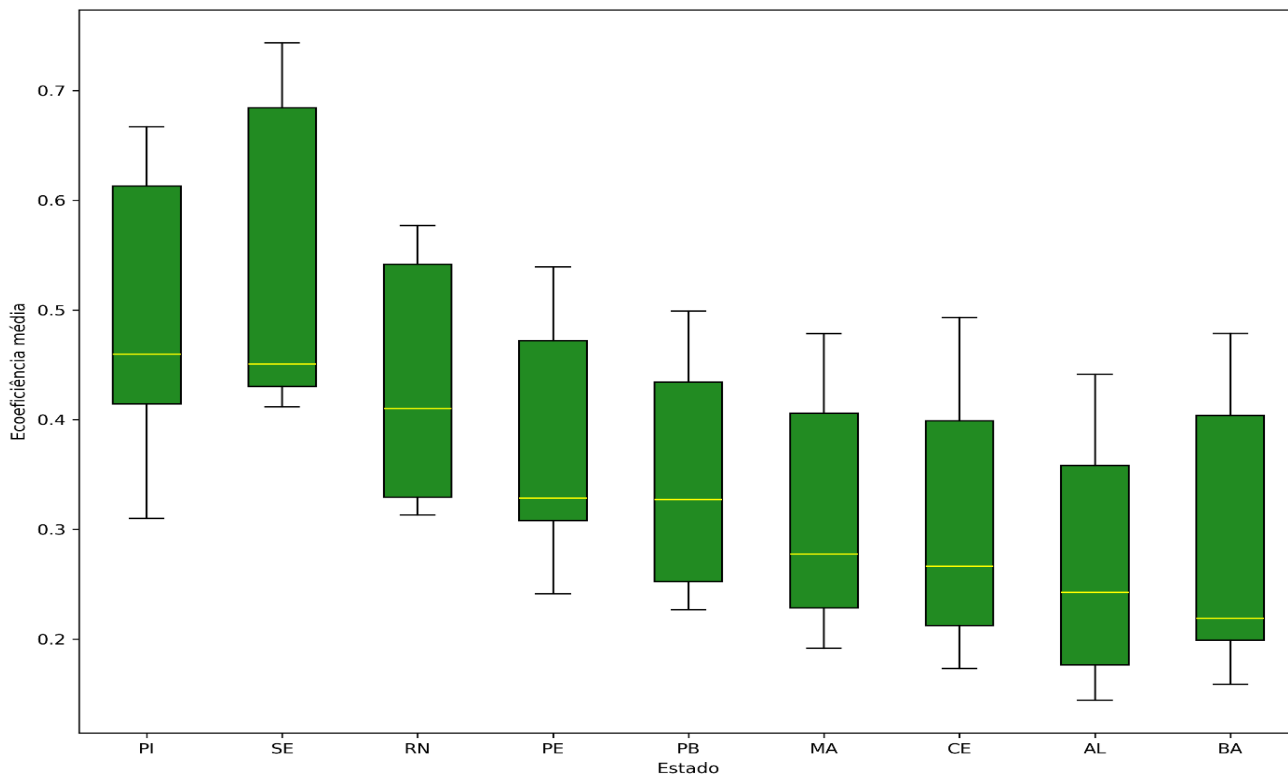
Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

De modo semelhante, as variáveis emprego agropecuário e área plantada também apresentam alta variabilidade, com coeficientes de variação próximos de 93%. Isso evidencia a coexistência de realidades produtivas contrastantes: enquanto alguns estados mantêm grandes extensões cultivadas e maior absorção de mão de obra, outros apresentam estruturas produtivas menores e maior dependência de condições climáticas favoráveis (Salviano, 2021).

No caso das emissões de metano, o desvio padrão e os valores médios elevados revelam que os impactos ambientais também são desiguais, concentrando-se nas unidades federativas de maior atividade pecuária. Esses resultados preliminares sugerem que a ecoeficiência na região é afetada por uma combinação de fatores estruturais, tecnológicos e ambientais, que variam significativamente entre os estados nordestinos, conforme abordado por Costa (2021).

A Figura 2 sintetiza a ecoeficiência agropecuária média dos estados nordestinos ao longo das 11 janelas de tempo analisadas (2000–2021). Genericamente, o gráfico evidencia uma dispersão considerável nos níveis de ecoeficiência relativa, com poucos estados próximos à fronteira de ecoeficiência.

Figura 2: Ecoeficiência agropecuária média dos estados nordestinos no período de 2000 a 2021



Notas: janela 1 (2000-2011); janela 2 (2001-2012); janela 3 (2002-2013); janela 4 (2003-2014); janela 5 (2004-2015); janela 6 (2005-2016); janela 7 (2006-2017); janela 8 (2007-2018); janela 9 (2008-2019); janela 10 (2009-2020); janela 11 (2010-2021).

Fonte: Elaborado pelas autores (2025).

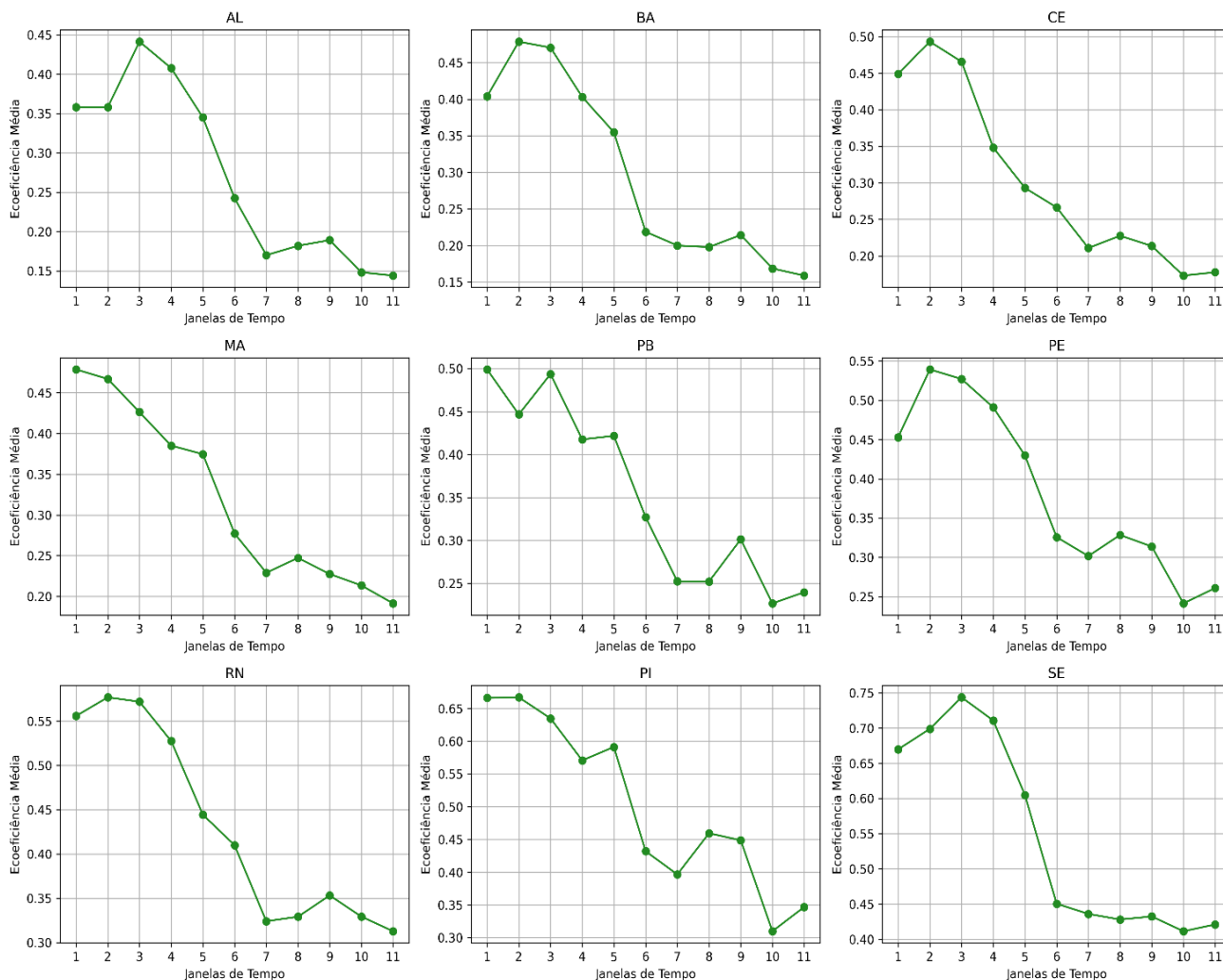
De maneira geral, verifica-se que Ceará, Piauí e Bahia apresentaram índices mais elevados e consistentes ao longo das janelas temporais, sugerindo maior capacidade de conciliar desempenho econômico e controle ambiental, consoante às inferências apresentadas por Araújo (2022). Explica-se que essa tendência pode ser atribuída à adoção gradual de práticas de manejo mais eficientes, ao uso de tecnologias adaptadas ao semiárido e à diversificação das cadeias produtivas, que reduziram a dependência de sistemas agrícolas de alto impacto ambiental (Marques, 2025).

Por outro lado, Alagoas, Sergipe e Paraíba destacam-se entre os estados com menor desempenho médio, indicando maior ineficiência relativa no uso dos recursos produtivos e maior intensidade das emissões em relação ao produto gerado, em consonância com Araújo (2022), que indicam que significativa parte dos municípios desses estados não alcança a fronteira de ecoeficiência. Nesses casos, Bezerra (2022) aponta que a razão desses resultados pode estar no baixo nível de mecanização, na limitação de investimentos em tecnologias limpas e nas condições climáticas adversas, somada à menor regularidade pluviométrica, que podem explicar parte das restrições ao avanço da ecoeficiência.

Adicionalmente, a Figura 3 apresenta a evolução temporal da ecoeficiência agropecuária na região Nordeste, permitindo identificar as tendências de melhoria ou retrocesso ao longo das onze janelas de análise. Observa-se que, no início da série, as janelas 1 a 4, correspondentes a 2000–2013), a região exibia níveis de ecoeficiência mais baixos, o que coincide com um período de seca prolongada, restrição de crédito rural e baixa incorporação tecnológica no campo (Dias; Silva; Costa, 2022).

A partir da janela 5, que agrupa os anos de 2004 a 2014, nota-se uma tendência de recuperação gradual, refletindo os efeitos de políticas públicas de apoio à agricultura familiar, como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), e de iniciativas voltadas à mitigação dos impactos climáticos, buscando a integração entre as atividades da agricultura familiar e o desenvolvimento rural de cunho sustentável (Silva; Lucena; Sousa, 2024).

Figura 3: Evolução da ecoeficiência agropecuária nos estados nordestinos entre os anos de 2000 a 2021



Notas: janela 1 (2000-2011); janela 2 (2001-2012); janela 3 (2002-2013); janela 4 (2003-2014); janela 5 (2004-2015); janela 6 (2005-2016); janela 7 (2006-2017); janela 8 (2007-2018); janela 9 (2008-2019); janela 10 (2009-2020); janela 11 (2010-2021).

Fonte: Elaborado pelas autores (2025).

Entre as janelas 8 e 11, no agrupamento entre os anos 2007 e 2020, a ecoeficiência tende a se estabilizar em níveis moderados, com pequenas oscilações. Como explicam, Rangel *et al.* (2022), essa estabilidade relativa pode estar associada à expansão de práticas sustentáveis em alguns estados, como o uso de irrigação controlada, a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o manejo racional de pastagens, que contribuiram para ganhos simultâneos de produtividade e redução de emissões. No entanto, a persistência de disparidades regionais demonstra que tais avanços ainda são desiguais e fortemente condicionados pela disponibilidade de infraestrutura e pelo grau de vulnerabilidade climática local (Bezerra, 2022).

De modo geral, os resultados obtidos reforçam que a ecoeficiência agropecuária no Nordeste é influenciada por fatores estruturais e ambientais, destacando-se o papel da irregularidade climática como elemento central. Observa-se que Bahia, Ceará e Maranhão apresentam trajetórias de ecoeficiência marcadas por oscilações e quedas mais acentuadas, refletindo a vulnerabilidade de regiões com menor acesso à irrigação e maior variabilidade pluviométrica. Por outro lado, estados como Piauí, Pernambuco e Rio Grande do Norte demonstram desempenho relativamente superior em determinados períodos, sugerindo avanços associados à adoção de políticas de incentivo produtivo e à incorporação de práticas de manejo sustentável.

Alagoas, Paraíba e Sergipe, embora também enfrentem restrições climáticas e estruturais, exibem trajetórias intermediárias, evidenciando a influência de políticas locais e do acesso desigual a tecnologias agropecuárias mais eficientes. Esses achados indicam que a eficiência ambiental não se opõe ao crescimento econômico, mas depende da capacidade de gestão integrada dos recursos naturais, do fortalecimento das políticas públicas e da difusão de tecnologias apropriadas às condições regionais, corroborando com Santos *et al.* (2024).

Assim, a trajetória observada ao longo de duas décadas demonstra um processo gradual de aprimoramento da ecoeficiência agropecuária no conjunto dos estados nordestinos, embora persistam desafios relacionados à desigualdade estrutural, à escassez hídrica e à necessidade de maior integração entre inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental. Em síntese, os resultados sugerem que o setor agropecuário nordestino, ainda que de forma heterogênea, caminha em direção a um modelo produtivo mais equilibrado, resiliente e alinhado às metas de desenvolvimento sustentável.

5 Considerações finais

No âmbito do desenvolvimento sustentável, a análise da ecoeficiência agropecuária no Nordeste brasileiro de 2000 a 2021 evidencia que o avanço econômico e a mitigação dos impactos ambientais não são objetivos excludentes, mas complementares. Os resultados obtidos demonstram que, embora na região ainda persistam heterogeneidade produtiva e restrições estruturais, há sinais consistentes de aprimoramento da eficiência agropecuária no uso dos recursos naturais, sobretudo nos estados nordestinos que vêm incorporando práticas tecnológicas e políticas públicas orientadas à sustentabilidade.

Verificou-se que fatores como o acesso à irrigação, o investimento em inovação tecnológica e a diversificação produtiva contribuem de maneira significativa para o desempenho superior de determinadas unidades federativas, como Ceará, Piauí e Bahia. Por outro lado, estados com menor nível de mecanização e maior vulnerabilidade climática, a exemplo de Alagoas, Sergipe e Paraíba, mantêm desafios mais acentuados para alcançar a fronteira de ecoeficiência, o que reforça a necessidade de políticas diferenciadas e adaptadas às especificidades locais.

A aplicação do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) combinada com a técnica de Análise de Janela mostrou-se adequada para captar a dinâmica temporal e espacial da ecoeficiência, permitindo identificar avanços graduais e períodos de estabilidade condicionados por políticas públicas, condições climáticas e transformações estruturais do setor agropecuário.

Para estudos futuros, recomenda-se que amplie a base de variáveis, contemplando dimensões sociais e tecnológicas da sustentabilidade, além de explorar abordagens complementares à DEA, como modelos estocásticos ou híbridos. Sugere-se, ainda, o aprofundamento de estudos em escala municipal ou microrregional, de modo a capturar melhor as disparidades intrarregionais e identificar práticas específicas que promovam ganhos de ecoeficiência.

Por fim, destaca-se que o fortalecimento da ecoeficiência no Nordeste depende de uma agenda integrada entre inovação tecnológica, gestão ambiental e inclusão produtiva. Apenas a convergência entre essas dimensões poderá consolidar um modelo de desenvolvimento rural capaz de aliar

produtividade, equidade social e preservação ambiental, assegurando a resiliência do setor agropecuário frente às mudanças climáticas e às desigualdades históricas que caracterizam a região.

Referências

- AGUIAR, R.A; SILVA NETO, R.; ERTHAL JUNIOR, M. Sustentabilidade portuária: ecoeficiência alinhada ao desempenho operacional e desenvolvimento regional das áreas de influência. **Informe GEPEC**, Toledo, v. 27, n. 2, p. 220–243, 2023. DOI: 10.48075/igepec.v27i2.30763.
- ALENCAR, P. A.; ROSANO-PEÑA, C.; GUARNIERI, P.; SERRANO, A. L. M. Ecoeficiência e preço sombra das emissões de gases de efeito estufa na suinocultura brasileira. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 377-408, 2019.
- AQUINO, J.; GAZOLLA, M.; SCHNEIDER, S. Dualismo no campo e desigualdades internas na agricultura familiar brasileira. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, p. 123-142. 2018. DOI: 10.1590/1234-56781806-94790560108.
- ARAÚJO, T. J. M. **Análise de ecoeficiência da agropecuária nos municípios do bioma Caatinga no Semiárido Nordestino**. 94f. 2002. Dissertação Mestrado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- ARAÚJO, R. C. P.; ARAÚJO, T. J. M. Análise de ecoeficiência da agropecuária dos municípios nordestinos localizados no bioma caatinga, Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 62, 2024. **Anais...**Palmas, TO: SOBER, 2024.
- BARBOSA, W. C. S.; VALLADARES, G. S. Análise da paisagem e do uso e cobertura das terras no nordeste brasileiro, litoral semiárido. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 620-632, 2022.
- BEZERRA, F. N. R. **Avaliação da agricultura de baixa emissão de carbono e inteligente ao clima no Brasil**. 2022. 263 f. Tese (Doutorado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- CRUZ, B. B. **Ecoeficiência da produção de grãos brasileira: uma análise de fronteira estocástica utilizando pegadas hídricas**. 2023. 91 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- COSTA, C. S. **Fronteiras de produção no desenvolvimento de um sistema virtual de avaliação e simulação da ecoeficiência agropecuária**. 2021. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- DIAS, T. K. M.; SILVA, V. H. M. C.; COSTA, E. M. Crédito rural e produção das lavouras temporárias nos distintos cenários do nordeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 1, p. e247380, 2022.
- GAMA, T. G. V. **Ensaio sobre ecoeficiência agropecuária no Brasil e na Amazônia Legal**. 2022. 77 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em: 05 de out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). **Produção Agrícola Municipal**. 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic>. Acesso em: 05 out. 2024.

LADEIRA, T. F. **A eficiência técnica da pecuária de leite familiar e seus condicionantes no estado de Minas Gerais**. 2025. 160 f. Tese (Doutorado em Economia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

LUZ, A.; FOCHEZATTO, A. O transbordamento do PIB do Agronegócio do Brasil: uma análise da importância setorial via Matrizes de Insumo-Produto. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 1, p. e253226, 2022.

MACIEL, H. M.; MACIEL, W. M.; GOMES, M. A. Brasil e a Ecoeficiência: Uma análise através do método envoltória com livre disposição. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 82049-82061, oct. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n10-583

MAGALHÃES, J. P. R.; GONCALVES, R. R.; OLIVEIRA, C. R. Estrutura econômica da região costeira nordestina: uma abordagem do tipo insumo-produto. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS REGIONAIS E URBANOS, 19, 2021. **Anais... ENABER**, 2021.

MARQUES, R. V. M. **Expansão da produção de soja no nordeste: uma análise estatística**. 2025. 49f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

PAES, C. S.; GÓES, G. B.; CONRADO, J. A. A. Caracterização dos sistemas de produção de leite bovino em um município no semiárido brasileiro. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 22, n. 2, p. 312-320, 2023.

PEREIRA; N. A.; TAVARES, M. Eficiência do setor sucroenergético com base na análise de janelas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 2020.

PEROSA, B. Agricultura de Baixo Carbono no Brasil: desafios de governança e monitoramento. **Labor e Engenho**, v. 18, p. e024005-e024005, 2024.

PUERTAS, R.; GUAITA-MARTINEZ, J.; CARRACEDO, P.; RIBEIRO-SORIANO, D. Analysis of European environmental policies: improving decision making through eco-efficiency. **Technology in Society**, v. 70, p. 102053. 2022. DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.102053.

RAMOS, E. S. C. **Clusters agropecuários na emissão de gases de efeito estufa no nordeste brasileiro**. 2023. 39f. TCC (Graduação em Administração). Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, 2023.

RANGEL, J. H. A. SANTOS, R. D.; SOUZA, S. F.; PIOVEZAN, U.; MUNIZ, E. N. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta para o Semiárido. In: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.).

Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2022. cap. 9, p. 141-149.

RELAÇÃO ANNUAL DE INFORMAÇÕES SOCIAIS – RAIS. Bases Estatísticas da RAIS e CAGED. **RAIS vínculos.** Disponível em: <https://bi.mte.gov.br/bgcaged/rais.php>. Acesso em: 15 de ago. 2024.

ROCHA, R. T.; REBELATTO, D. A. N.; CAMIOTO, F. de C. Análise da eficiência de fatores nos países do BRICS a partir da aplicação da Análise por Envoltória de Dados. **RACEF – Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace.** v. 6, n. 1, p. 72-128, 2015. DOI: [10.13059/racef.v6i1.245](https://doi.org/10.13059/racef.v6i1.245)

SALVIANO, J. I. A. **Relações entre instabilidades das chuvas e indicadores de produção de lavouras de sequeiro no semiárido cearense, Brasil.** 2021. 131 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural)–Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

SANTOS, A. N.; BRITO, L. P.; SIQUEIRA, F. L. T.; PINHEIRO FILHO, I. S. Desafios e progressos: o impacto das políticas ambientais contemporâneas na conservação dos recursos naturais. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. e799, 2024.

SILVA, J. V. B. **Ecoeficiência da agropecuária amazônica: custos de oportunidade e fatores condicionantes.** 2021, 120 f. Dissertação. (Mestrado em Agronegócio) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SILVA, J. V. B.; ROSANO-PEÑA, C.; MARTINS, M. M. V.; TAVARES, R. C.; SILVA, P. H. Ecoeficiência da produção agropecuária na Amazônia brasileira: fatores determinantes e dependência espacial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 60, e250907, 2022. DOI: [10.1590/1806-9479.2021.250907](https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.250907)

SILVA, M. A. B.; LUCENA, M. A.; SOUSA, E. P. Efeitos do PRONAF Verde na composição do PIB dos estados do Nordeste no período de 2015 a 2021. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO, 7, 2024. **Anais...** Naviraí, MS: EIGEDIN, v. 7, n. 1, 2024.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA – SEEG. **Emissões totais.** Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector-nci>. Acesso em: 15 ago. 2024.

TOMA, P.; MIGLIETTA, P. P.; ZURLINI, G.; VALENTE, D.; PETROSILLO, I. A non-parametric Bootstrap data envelopment analysis approach for environmental policy planning and management of agricultural efficiency in EU countries. **Ecological Indicators**, v. 83, p.132-143, 2017. DOI: [10.1016/j.ecolind.2017.07.049](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.049)

WANG, K.; DENG, L.; SHANGGUAN, Z.; CHEN, Y.; LIN, X. Sustainability of eco-environment in semi-arid regions: lessons from the Chinese Loess Plateau. **Environmental Science & Policy.** v. 125, p. 126-134. 2021. DOI: [10.1016/j.envsci.2021.08.025](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.08.025).

ZHANG, L.; XIAO, J.; ZHENG, Y.; LI, S.; ZHOU, Y. Increased carbon uptake and water use efficiency in global semi-arid ecosystems. **Environmental Research Letters**, v. 15, p. 1-16. 2020.



DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL, COOPERATIVISMO E
QUESTÕES CLIMÁTICAS NA AGRICULTURA DO NORDESTE



I ENCONTRO DE EDUCAÇÃO E
COOPERATIVISMO
POTIGUAR - 2025

Mossoró/RN • 3 a 5 Dezembro de 2025



UERN



DOI: 10.1088/1748-9326/ab68ec.