

**ECOEFIÊNCIA DOS MUNICÍPIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA:  
UM ESTUDO TEMPORAL**

***ECO-EFFICIENCY OF MUNICIPALITIES OF THE FORTALEZA METROPOLITAN REGION: A  
TEMPORAL STUDY***

**Área temática: Área 2 – Desenvolvimento e Microeconomia Aplicada**

**Maria Avyla Batista da Silva**

Graduanda em Ciências Econômicas pela Universidade Regional do Cariri (URCA) e Bolsista de Iniciação Científica PIBIC CNPq

e-mail: [avyla.batista@urca.br](mailto:avyla.batista@urca.br)

Telefone: (88) 9.9345-0279

**Manoel Alexandre de Lucena**

Bacharel em Ciências Econômicas pela Universidade Regional do Cariri (URCA) e Mestre em Desenvolvimento Regional Sustentável pela Universidade Federal do Cariri (UFCA)

e-mail: [manoelalex123@gmail.com](mailto:manoelalex123@gmail.com)

Telefone: (88) 9 8178-4460

**Eliane Pinheiro de Sousa**

Pós-Doutora em Economia Aplicada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (USP) e Professora Associada do Departamento de Economia e do Programa de Pós-Graduação em Economia Regional e Urbana da Universidade Regional do Cariri (URCA).

e-mail: [pinheiroeliane@hotmail.com](mailto:pinheiroeliane@hotmail.com)

Telefone: (85) 99680-2139

# ECOEFIÊNCIA DOS MUNICÍPIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA: UM ESTUDO TEMPORAL

## *ECO-EFFICIENCY OF MUNICIPALITIES OF THE FORTALEZA METROPOLITAN REGION: A TEMPORAL STUDY*

### **Resumo**

Este estudo se propõe mensurar a ecoeficiência dos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no período de 2000 a 2020. Para tal, utilizou-se o método de Análise Envoltória de Dados (DEA) com retornos constantes de escala (CCR), orientação para *inputs*, por meio de janelas (WA) considerando entradas e saídas (desejáveis e indesejáveis), representado por DEA-CCR-WA. Os resultados indicam tendência de aumento na ecoeficiência no decorrer do tempo, podendo ser explicada pela melhoria contínua nas práticas ambientais e maior estabilidade no desempenho sustentável e avanços tecnológicos, com destaque para Itaitinga, que, em alguns períodos da série, conseguiu conciliar crescimento econômico com preservação ambiental. Ademais, Fortaleza, Maracanaú, Paracuru, Paraipaba, Eusébio e Pindoretama tiveram elevados escores de ecoeficiência ao longo desses anos. Em contrapartida, os menores desempenhos ocorreram em Aquiraz, Caucaia e São Luís do Curu, porém, com melhorias nas janelas mais recentes. Portanto, constata-se que o equilíbrio entre as atividades de promoção da sustentabilidade contribuiu para o crescimento sustentável da RMF.

**Palavras-chave:** Ecoeficiência. Análise Envoltória de Dados. Análise de janelas. Região Metropolitana de Fortaleza.

### **Abstract:**

This study aims to measure the eco-efficiency of municipalities of the Fortaleza Metropolitan Region, in the period from 2000 to 2020. In order to do that, it was used the Data Envelopment Analysis (DEA) method with constant returns to scale (CCR), input orientation, through windows (Windows Analysis, WA) taking into consideration (desirable and undesirable) inputs and outputs, represented by DEA-CCR-WA. The results point to an upward trend in eco-efficiency over time, which can be explained by continuous improvement in environmental practices and greater stability in sustainable performance and technological advances, with it being worth mentioning the municipality of Itaitinga, which, in some periods of the series, managed to combine economic growth and environmental preservation. In addition, Fortaleza, Maracanaú, Paracuru, Paraipaba, Eusébio and Pindoretama exhibited high eco-efficiency scores throughout these years. On the other hand, the lowest performances occurred in Aquiraz, Caucaia and São Luís do Curu, however, with improvement in the most recent windows. Therefore, one may conclude that the balance among sustainability-promoting activities has contributed to the sustainable growth of the Fortaleza Metropolitan Region.

**Key-words:** Eco-efficiency. Data Envelopment Analysis. Windows Analysis. Fortaleza Metropolitan Region.

**JEL:** C14; Q56.

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável tem fundamentado debates sobre a sustentabilidade, promovendo o surgimento de novos conceitos para o progresso das nações. No entanto, observa-se um comportamento predominante de incessante busca pela elevação da produtividade e maximização dos lucros. Essa abordagem, centrada no aumento da produção e na redução de custos, muitas vezes negligencia os impactos ambientais decorrentes do consumo excessivo dos recursos naturais. Nesse contexto, a ecoeficiência surge como uma visão mais abrangente sobre sustentabilidade. Camarero *et al.* (2013) a descrevem como a eficiência econômica e ambiental, cujos recursos ecológicos suprem as necessidades humanas sem comprometer as gerações futuras.

Rashidi, Shabani e Saen (2015) afirmam que a ecoeficiência é uma das principais preocupações da comunidade internacional. Os autores ainda apontam a meticulosa consideração dos seus índices para a formulação de políticas públicas, pois, apenas aqueles que conseguem aumentar o fornecimento de bens e serviços, utilizando menos recursos e produzindo o mínimo de resíduos sólidos e poluição, são considerados ecoeficientes. Desse modo, o desempenho ambiental e o uso eficiente dos recursos limitados estão diretamente relacionados ao desenvolvimento sustentável. Para John, Kwofie e Ngadi (2020), a ecoeficiência busca maximizar a criação de valor utilizando menos recursos e minimizando o impacto ambiental. Logo, a ecoeficiência, ao relacionar o custo econômico e o valor ambiental, fornece uma abordagem ampla, abarcando os mais variados setores e, sua principal vantagem é a possibilidade de avaliar a sustentabilidade sob as óticas econômica e ambiental (Gómez *et al.*, 2018).

O Brasil é mundialmente conhecido pela sua significativa biodiversidade, mas sofre ameaças constantes à sua preservação principalmente devido à cultura de degradação e poluição (Santos, 2021). Artaxo (2020) expõe que, ainda que o país esteja alinhado com os acordos internacionais firmados para preservação ambiental, como o Acordo de Paris e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), os desafios climáticos enfrentados exigem estratégias verossímeis à realidade. Além disso, dentre as regiões brasileiras, os estados da região Nordeste são mais suscetíveis às consequências das mudanças climáticas, como o aprofundamento das secas e a elevação das temperaturas, por exemplo (Costa *et al.*, 2020). Estados como o Ceará, a exemplo, têm suas atividades econômicas afetadas direta e negativamente por esses cenários (Rodrigues, 2021).

Nesse contexto, de modo específico, destaca-se a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), fundamental para a economia do Ceará, haja vista que, além de compor mais de dois terços do PIB estadual, também concentra grande parte dos investimentos, diversificação econômica (Elias; Pequeno; Leitão, 2022) e políticas públicas destinadas à mitigação da vulnerabilidade socioambiental (Albuquerque; Lima, 2023). A região foi instituída em 1973 por meio da Lei Complementar nº 14, inicialmente composta por cinco municípios (Fortaleza, Aquiraz, Caucaia, Maranguape e Pacatuba). Com o passar dos anos, foi expandida e, atualmente, conforme Elias, Leitão e Pequeno (2022), abrange 19 municípios: Fortaleza, Aquiraz, Cascavel, Caucaia, Chorozinho, Eusébio, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape, Pacajus, Pacatuba, Paracuru, Paraipaba, Pindoretama, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu e Trairi.

Além do papel socioeconômico intrínseco às regiões metropolitanas, é essencial o uso de instrumentos que avaliem o seu desempenho. Sendo assim, a Análise Envoltória de Dados, do inglês *Data Envelopment Analysis* (DEA), é uma ferramenta empregada na mensuração da eficiência econômica e ambiental (Costa, 2021), fornecendo, portanto, uma abordagem completa na avaliação da ecoeficiência. Essa metodologia proporciona uma avaliação por meio da comparação entre diferentes unidades de produção, à medida que considera o uso eficiente dos recursos, somado à minimização dos impactos ambientais (Caiado *et al.*, 2017). Isto é, além de quantificar a ecoeficiência, também se torna possível visualizar e entender as variações entre as unidades e as razões intrínsecas às disparidades de desempenho. Assim, essa análise alinha-se com os objetivos do desenvolvimento sustentável e contribui com informações para nortear a formulação de políticas públicas.

Considerando os fatos supracitados, o objetivo geral deste artigo é mensurar a ecoeficiência dos municípios que compõem a Região Metropolitana de Fortaleza entre os anos de 2000 a 2020. Para tal, emprega-se Análise Envoltória de Dados (DEA) com a análise de janelas (*Windows Analysis*). Desta forma, os escores de ecoeficiência foram obtidos considerando os pressupostos de retornos constantes de escala e orientação para *inputs*.

Além dessa seção introdutória, o presente trabalho encontra-se estruturado em outras quatro seções. A segunda agrupa o detalhamento dos conceitos e a apresentação da literatura recente sobre o tema; a terceira é responsável por apresentar o modelo analítico empregado; a quarta expõe os resultados; por fim, a quinta, e última seção, apresenta as considerações finais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO-EMPÍRICO

O desenvolvimento econômico tem ocupado o centro das discussões na literatura econômica ao longo dos anos, especialmente quanto às suas repercussões em diversos âmbitos. Embora os avanços industriais e tecnológicos tenham gerado melhorias significativas, também intensificaram externalidades negativas, como a degradação ambiental e o aumento das desigualdades (Dias; Figueiredo; Farias, 2021). A pressão ambiental resultante de atividades antrópicas gerou preocupação global, destacando a necessidade urgente de alternativas para enfrentar esse cenário. Todavia, foi apenas na década de 1970, com a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, que as questões ambientais começaram a ser consideradas determinantes para o desenvolvimento, conceito que mais tarde se consolidou como desenvolvimento sustentável (Santana, 2012).

Molina (2019) recorda que o desenvolvimento sustentável se refere à capacidade de promover o crescimento econômico sem afetar o suprimento futuro. Logo, é nesse contexto que a ecoeficiência se revela como uma abordagem que otimiza o crescimento e a sustentabilidade (Lueddeckens, 2023; Cournoyer; Bazinet, 2023). De maneira geral, a literatura define ecoeficiência como a relação entre a produção econômica e o impacto ambiental, cujo foco central é a maximização da produção em concomitância com a minimização dos impactos. Conforme Zhang *et al.* (2021) ao aprimorar o uso dos recursos naturais, gerando benefícios econômicos, novas tecnologias e mais qualidade de vida para as pessoas, a ecoeficiência fomenta o desenvolvimento sustentável. Nwani *et al.* (2023) expõem que a adoção de medidas de ecoeficiência é fundamental para avaliar as sinergias e compensações nas trajetórias de desenvolvimento, permitindo monitorar o progresso dos ODS e entender as implicações futuras das políticas em vigor. Para Fukuyama e Tan (2023), a ecoeficiência é uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento sustentável.

Considerando a mensuração da ecoeficiência no Brasil, de maneira abrangente, os estudos sugerem que os seus níveis são baixos, porém com espaço para otimização, essa, por sua vez, condicionada a melhores práticas ambientais e intervenções políticas. Em paralelo, Maciel, Maciel e Gomes (2020) mensuraram o índice de ecoeficiência para o país, entretanto, os resultados não se mostraram satisfatórios, sugerindo que a busca por sustentabilidade deve ser realizada em conjunto, pelos governantes e pela sociedade. Paes *et al.* (2020) indicam que países em desenvolvimento, como o Brasil, estão adotando estratégias para mitigar emissões de gases do efeito estufa nos resíduos sólidos urbanos, e, por meio da avaliação de diferentes cenários no país, identificam que a combinação de práticas sustentáveis, como a reciclagem, contribui para a promoção da ecoeficiência, seja em municípios grandes e pequenos.

No âmbito dos municípios, a literatura internacional avalia a ecoeficiência por meio da gestão dos resíduos sólidos. Nesta perspectiva, Romano e Molinos-Senante (2020), ao investigarem a ecoeficiência dos municípios da Toscana, concluíram que aqueles menores e menos povoados apresentam melhores práticas. Paralelamente, nos municípios da Itália, Romano *et al.* (2021) destacam a adoção de tecnologias como precursor do desempenho sustentável. Para os municípios espanhóis, a educação é um determinante significativo dos índices de ecoeficiência (Díaz-Villavicencio; Didonet; Dodd, 2017). Quanto aos municípios do Chile, Llanquileo-Melgarejo e Molinos-Senante (2021) sugerem que não eram ecoeficientes, uma vez que as políticas adotadas não abarcavam questões ambientais e econômicas, mas variáveis como turismo, renda e resíduos *per capita* afetam significativamente a métrica. Nas cidades da China, as regulamentações ambientais são fundamentais para a determinação de uma economia verde (Tan; Su; Wang, 2023).

De maneira semelhante, nacionalmente, Araújo *et al.* (2021) analisaram 41 municípios da região Centro-Oeste, que desempenham um papel crucial em termos de recursos naturais, e os principais resultados indicaram baixo desempenho geral, além disso, evidenciaram o impacto negativo do desmatamento e a variabilidade no efeito do consumo de água. Serrano *et al.* (2024) avaliaram a ecoeficiência agrícola de 5563 municípios brasileiros, concluindo que é possível aumentar em 20,84% a receita e áreas preservadas

sem elevar insumos, com temperatura e redução de precipitação com impacto positivo nos escores, expressando a relevância de políticas que equilibrem crescimento econômico e preservação ambiental. Além disso, Rosa, Lunkes e Saviatto (2019) apontaram que os recursos públicos impactam diretamente na promoção do desenvolvimento sustentável municipal brasileiro.

### 3 METODOLOGIA

Esta seção se dedica a metodologia deste trabalho. Para tal, divide-se em duas subseções. A primeira descreve o método analítico empregado neste trabalho, ou seja, a Análise Envoltória de Dados (DEA). Na segunda, o percurso metodológico, isto é, o caminho seguido na pesquisa, é apresentado.

#### 3.1 Métodos analíticos

A análise de eficiência (ou ecoeficiência) relaciona-se diretamente com o conceito de função de produção que traduz, algebricamente, a quantidade máxima que se pode produzir mediante a combinação de um conjunto de insumos, determinando uma fronteira de produção cujas unidades de produção serão distribuídas (Camanho *et al.*, 2024). Paralelamente, a *Data Envelopment Analysis* (DEA), ou Análise Envoltória de Dados, é uma técnica não paramétrica de análise que, por meio do emprego de programação linear, avalia o desempenho das *Decision Making Units* (DMUs), cujas produções resultam do emprego dos mesmos insumos, em outras palavras, utilizam os mesmos *inputs* na geração de *outputs*. Esse método foi desenvolvido pelos estudos de Charnes, Cooper e Rhodes (1978), responsáveis pela introdução do modelo clássico CCR, e Banker, Charnes e Cooper (1984) que desenvolveram o modelo BCC, ambos baseados em Farrell (1957). Esses autores foram responsáveis por desenvolver os principais modelos matemáticos que compõem a DEA. Conforme Mustafa, Khan e Mustafa (2021) e Tsai *et al.* (2020), a formalização algébrica do modelo DEA clássico é apresentada na equação (1):

$$h_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_r \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_i$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1 \leq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0, \forall r, i$$

Em que:  $v_i$  e  $u_r$  são o multiplicador das entradas  $i$  e o multiplicador das saídas  $r$ , nesta ordem; os *inputs* da DMU  $j$  são representados por  $x_{ij}$ , enquanto  $y_{rj}$  são os *outputs*;  $x_i$  e  $y_r$  representam, respectivamente, os *inputs* e *outputs* das DMUs; por fim,  $i = 1, \dots, m$ ,  $r = 1, \dots, s$  e  $j = 1, \dots, n$ .

Isto posto, na DEA clássica, para que as unidades sejam comparadas por meio dos seus recursos usados e produtos gerados, a tecnologia de produção deve ser determinada, essa, pode ser realizada por meio do Retornos Constantes de Escala (CRS) ou Retornos Variáveis de Escala (VRS), isto é, a proporção entre entradas e saídas se mantém constante ou essa relação pode mudar a depender do escopo operacional (Dellnitz; Tavana; Banker 2023). Além disso, Fancello, Carta e Serra (2020) indicam que os modelos podem ser orientados para os *inputs* quando o objetivo é produzir a mesma quantidade de produto com a mínima quantidade de insumos, ou *outputs* quando se objetiva maximizar o produto com uma quantidade mínima de insumos.

Dellnitz, Tavana e Banker (2023) explicam que a ecoeficiência remete a um conceito no qual componentes econômicos e ambientais são analisados simultaneamente, em virtude disso a essencialidade da aplicação de DEA para o método está na possibilidade de considerar múltiplas entradas e saídas, como na presença de componentes desejáveis e indesejáveis. Ademais, diante de séries de tempo, a literatura recomenda a utilização da análise dos escores DEA por meio de janelas (*Windows Analysis*), cujo objetivo

é avaliar as DMUs ao longo do tempo. O aprimoramento do modelo DEA-WA foi realizado por Asmild *et al.* (2004). Oliveira *et al.* (2023) apontam que essas janelas são ajustadas por médias móveis para capturar variações na eficiência de cada DMU ao incluir um novo período e remover o mais antigo. Dessa forma, a quantidade ( $n$ ) e o tamanho ( $w$ ) das janelas devem ser determinados (Lin *et al.*, 2018; Vlontzos; Pardalos, 2017), para tal, aplicam-se as equações (2) e (3), respectivamente:

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

$$w = n - n + 1 \quad (3)$$

Em que:  $n$  e  $w$  são, respectivamente, a quantidade e o tamanho das janelas em estudo, e  $n$  diz respeito a quantidade de anos da série temporal considerada.

O presente estudo, especificamente, aplica o modelo DEA-CCR-WA com retornos constantes de escala e orientação para *inputs*.

### 3.2 Percurso metodológico

Para operacionalizar os modelos DEA, são necessários dados de *inputs* e *outputs*. Como se trata de análise de ecoeficiência, são necessários *outputs* desejáveis e indesejáveis, ou seja, variáveis de saídas econômicas e ambientais. As variáveis elencadas, encontram-se dispostas no Quadro 1. Para os *inputs*, foram considerados a formação bruta de capital fixo e o total de postos formais de trabalho, como *proxies* para capital e trabalho, respectivamente. Para a saída desejável, considerou-se o valor da produção e, como saída indesejável, as emissões de gás carbônico. As informações referentes à formação bruta de capital fixo foram colhidas no Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2024), todavia, dada a disponibilidade apenas de dados agregados, realizou-se uma ponderação a partir da contribuição do produto econômico, para obter os valores das variáveis para os municípios. Em continuidade, a segunda variável em estudo tem como referência a base de dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS, 2024), enquanto as duas últimas variáveis foram coletadas no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), do Instituto de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) e no Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024), nesta ordem.

**Quadro 1:** Descrição das variáveis utilizadas para mensurar a ecoeficiência dos municípios que compõem a Região Metropolitana de Fortaleza entre 2000 a 2020

Tipo	Variável	Descrição	Unidade de medida	Fonte
<i>Inputs</i>	Capital	Formação bruta de capital fixo	Reais	IPEA (2024)
	Trabalho	Total de postos de trabalho formais	Unidade	RAIS (2024)
<i>Output</i> desejável	PIB	Valor da produção	Reais	IBGE (2024)
<i>Output</i> indesejável	Emissões de CO2	Emissões de gás carbônico	Toneladas	SEEG (2024)

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

Seguindo a teoria econômica, o conjunto de *inputs* é utilizado para gerar o produto da economia. Neste processo produtivo, todavia, são geradas saídas indesejáveis, como as emissões de CO2. Ao contrário do *output* desejável, a variável indesejada deve ser minimizada. Contudo, os modelos DEA empregados neste estudo são radiais, ou seja, movem apenas uma saída, seja orientado ao *input* ou ao *output* (Rosano-Peña; Teixeira; Kimura, 2021). Logo, torna-se necessária uma técnica específica para tratar *outputs* indesejáveis no modelo considerado. Neste sentido, a literatura elenca algumas técnicas para tratamento de *outputs* indesejáveis nos modelos DEA. Especificamente, para mensurar a ecoeficiência dos municípios que compõem a Região Metropolitana de Fortaleza, adotou-se a técnica INP (Arbabi *et al.*, 2023; Caiado

*et al.*, 2020). Nesta técnica, portanto, o *output* indesejável é incluído como entrada (Halkos; Petrou, 2019). Assim, adotando a orientação ao *input*, a projeção na fronteira ótima considera a minimização de tal variável.

Por fim, para operacionalizar os modelos DEA computacionalmente, empregou-se a linguagem de programação *Python*. Para tal, utilizou-se a biblioteca *pyStoNED*. Ademais, as tabelas e os gráficos apresentados neste estudo também foram elaborados utilizando a linguagem de *Python*.

#### 4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas para medir a ecoeficiência dos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza, no período de 2000 a 2020. No que diz respeito à variável trabalho, que se refere aos postos de trabalho formais, os valores mínimo e máximo foram registrados, respectivamente, em São Luís do Curu (2001) e Fortaleza (2019). A média elevada e o desvio padrão significativo indicam uma alta dispersão e variabilidade entre os municípios, em consonância com as observações de Silva Filho, Queiroz e Clementino (2016), que apontam que essa dinâmica no mercado de trabalho da região é influenciada pelos díspares níveis de desenvolvimento, resultando em desigualdade e vulnerabilidades. Quanto à variável capital, que reflete a estimativa da formação bruta de capital fixo para os municípios, observa-se uma distribuição assimétrica, com a maioria dos valores abaixo da média, além de alta variabilidade e dispersão. Esses resultados refletem a diversificação da infraestrutura e das atividades, bem como as desigualdades socioeconômicas que afetam a região (Pontes, 2013).

**Tabela 1:** Estatísticas descritivas das variáveis empregadas para mensurar a ecoeficiência dos municípios da região metropolitana de Fortaleza entre 2000 e 2020

Variável	Mínimo	Mediana	Máximo	Média	DP	CV (%)
Trabalho	167	5849	838280	43994,63	147445,67	335,15
Capital	2,7233	60,3134	6828,84	350,85	1081,72	308,31
PIB	14171	417631	67401430	2929414,48	9607752,13	327,98
Emissões CO2	14808,4	97199,2	3140207855	117511310,5	504964023,4	429,72

Nota: CV corresponde ao coeficiente de variação e DP remete ao desvio padrão.

Fonte: elaboração própria (2024).

Dando continuidade à análise, a variável PIB se destaca em Fortaleza, em 2019, como o município de maior produto econômico, enquanto São Luís do Curu, em 2000, apresentou o menor. O elevado desvio padrão dessa variável evidencia a desigualdade econômica entre os municípios da Região Metropolitana de Fortaleza. Isso significa que os municípios com maior desempenho econômico tendem a possuir maior diversidade de atividades econômicas, enquanto aqueles com desempenho inferior geralmente apresentam estruturas produtivas mais arcaicas ou dependem predominantemente da agricultura (Cabral; Muniz; Sampaio, 2019; Barreto; Almeida; Lima, 2010).

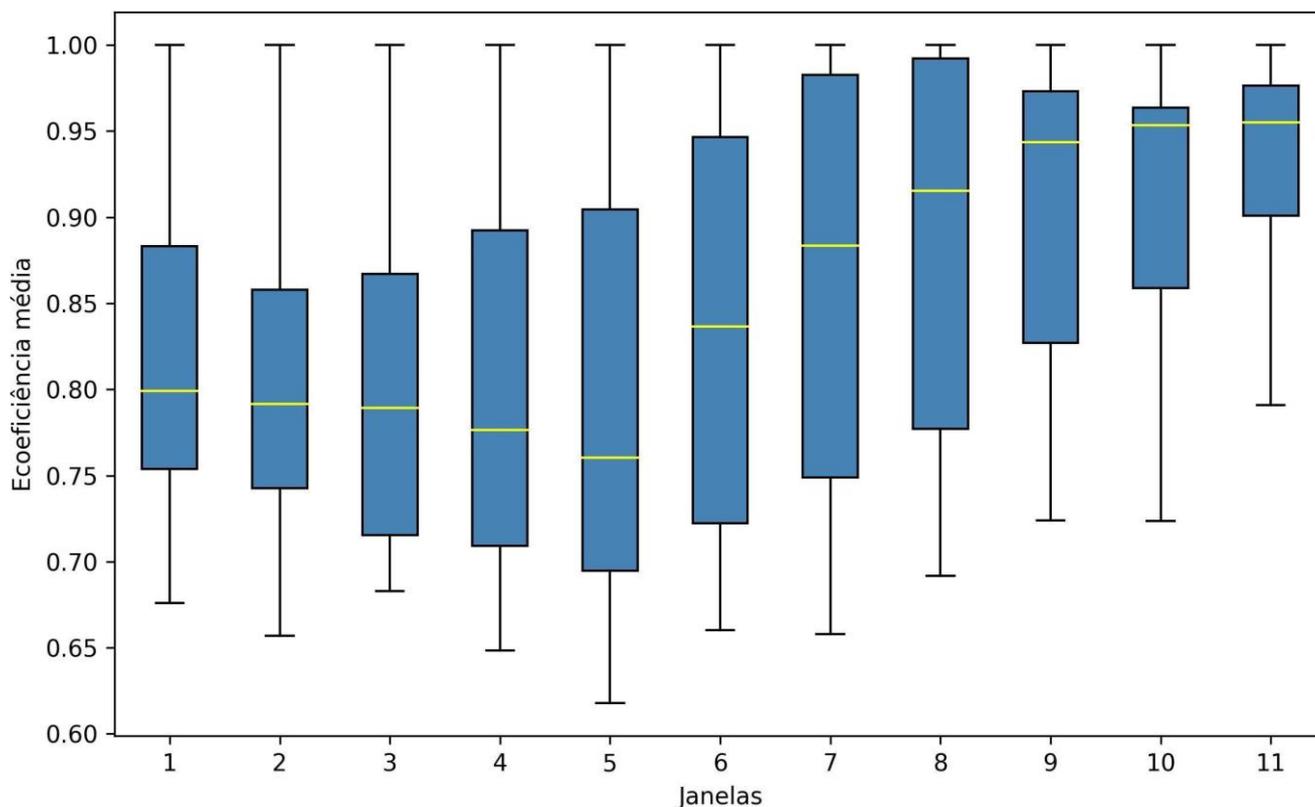
Em relação às emissões de gás carbônico, que se referem às toneladas de CO2 lançadas na atmosfera, observa-se que, no contexto das mudanças climáticas, esse aspecto se torna uma preocupação central. Dentre as variáveis analisadas, o coeficiente de variação das emissões foi o mais elevado, indicando valores extremamente altos e com uma variabilidade significativa, o que sugere impactos ambientais relevantes. O valor máximo das emissões se sobressai por ser muito superior à média, evidenciando que, enquanto alguns municípios contribuem pouco, outros, como Cascavel, apresentam emissões expressivas. Conforme o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2022), Cascavel é um dos municípios que mais emitem gases de efeito estufa no estado, em grande parte devido às atividades de geração de energia e a agropecuária.

Essas observações são cruciais para entender as características de formação da Região Metropolitana de Fortaleza, que é moldada por fatores culturais, históricos, econômicos e sociais. Elias, Pequeno e Leitão (2022) argumentam que a região enfrenta grandes disparidades entre seus 19 municípios, refletindo uma urbanização desigual e a presença de áreas rurais voltadas para atividades agropecuárias. Os autores ainda apontam que, desde os anos 1990, a região tem passado por transformações impulsionadas

por políticas de reestruturação econômica e territorial. Contudo, os desafios ambientais são exacerbados pela urbanização desigual, destacando a necessidade de um planejamento que harmonize de forma sustentável as áreas urbanas e rurais.

Após a análise da natureza e distribuição dos dados, foram calculados os escores de ecoeficiência. Salienta-se, ainda, que os escores de ecoeficiência se distribuem de 0 a 1. Considerando o uso de séries temporais, as janelas foram empregadas para observar o comportamento dos municípios ao longo dos anos. Os cálculos indicaram o tamanho e a quantidade das janelas iguais a 11, de modo que a última janela é composta dos anos mais recentes. O diagrama de caixas, do inglês *boxplot*, como mostrado na Figura 1, expõe a distribuição dos dados interquartil, fomentando uma análise mais ampla dos escores de ecoeficiência entre os municípios estudados ao longo das janelas.

**Figura 1:** Ecoeficiência média dos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza de 2000 a 2020



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

Fonte: elaboração própria (2024).

À luz dos resultados, observa-se que, nas primeiras seis janelas temporais, há uma performance ambiental mais heterogênea entre os municípios. A tendência inicial é de maior variação, com medianas mais baixas, sugerindo oscilações mais acentuadas nos níveis de ecoeficiência. Entretanto, a partir da sétima janela, esse padrão se altera: os escores de ecoeficiência tornam-se mais elevados e a variação entre os municípios diminui. Isso reflete uma melhoria significativa nos resultados, com valores se concentrando próximos a 0,95. O aumento da mediana indica que a maioria dos municípios alcançou níveis elevados de ecoeficiência. Em particular, a janela 11 apresenta os melhores resultados, com escores altos e uma distribuição mais homogênea entre os municípios. Esse comportamento revela uma melhora expressiva da ecoeficiência dos municípios da região ao longo do tempo.

Em síntese, a tendência de aumento na ecoeficiência pode ser explicada tanto por uma melhoria contínua nas práticas ambientais, bem como por uma maior estabilidade no desempenho sustentável e avanços tecnológicos ao longo do tempo. Ainda, a menor variação nas últimas janelas pode indicar uma padronização mais eficaz, resultando em escores mais consistentes. Nesse contexto, Albuquerque e Lima

(2023) apontam que o estado não apenas tem implementado políticas de preservação ambiental, mas também buscando integrá-las com iniciativas de mobilidade e otimização do uso dos recursos naturais. De forma complementar, Mendonça *et al.* (2019) ressaltam o papel da Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE) na fiscalização de atividades poluidoras na Região Metropolitana de Fortaleza, assegurando que danos ambientais sejam penalizados. Os autores ainda argumentam que essa fiscalização teve um impacto significativo na redução dos casos de degradação ambiental nos municípios da região. Por conseguinte, a distribuição de frequência dos escores de ecoeficiência dos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza de 2000 a 2020, é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2:** Distribuição de frequência dos escores de ecoeficiência dos municípios da região metropolitana de Fortaleza de 2000 a 2020

Classes	Janela										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\square < 0,25$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0,25 \leq \square < 0,50$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0,50 \leq \square < 0,75$	4	7	7	9	8	6	6	5	3	2	0
$0,75 \leq \square < 1,0$	14	12	12	10	11	13	13	13	15	17	19
$\square = 1,0$	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

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

Fonte: elaboração própria (2024).

Para fins deste estudo, e considerando a metodologia empregada, os municípios foram agrupados em janelas temporais que abrangem os anos de 2000 a 2020. Inspirando-se em Chaves, Lucena e Sousa (2022) consideraram-se os seguintes intervalos, especificamente, os municípios com escores de ecoeficiência inferiores a 0,25 são classificados como de baixo grau de ecoeficiência. Um grau médio de ecoeficiência é representado pelos valores entre 0,25 e 0,75, enquanto aqueles com escores entre 0,75 e 0,99 são considerados de alto grau de ecoeficiência. Por fim, o valor 1 indica máxima ecoeficiência. Com base nessas classificações e observando o comportamento ao longo das janelas, entre a primeira e a última janela, nenhum dos municípios da região apresentava escores entre as duas primeiras classes, demonstrando o seu elevado desempenho. Isto posto, a maioria, desde as janelas iniciais, se concentra em patamares de alto grau de ecoeficiência, na faixa de 0,75 a 1. Em destaque, na janela 11, os 19 municípios atingem alto grau de ecoeficiência. Evidenciando, portanto, a excelente performance das cidades que compõem a região na transição para ações de menor impacto ambiental, implicando que, à medida que políticas de fomento e inovação forem adotadas, a concretização do crescimento sustentável em todas as cidades pode vir a ser alcançada.

Em desdobramento, o município de Itaitinga, por sua vez, atinge a ecoeficiência máxima nas janelas 1, 8 e 9, em termos do presente trabalho, esse município foi capaz de aumentar a produção do *output* desejável enquanto reduziu os *inputs* e o *output* indesejável, isto é, foi capaz de conciliar o crescimento econômico com a diminuição dos impactos ambientais. Segundo o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR, 2022), as políticas da cidade de Itaitinga têm se concentrado na promoção do desenvolvimento regional sustentável, haja vista os altos investimentos em infraestrutura, saneamento básico e gestão de resíduos sólidos. Ademais, merecem destaque os municípios de Fortaleza, Maracanaú, Paracuru, Paraipaba, Eusébio e Pindoretama, que lograram alcançar altas médias de ecoeficiência ao longo dos anos, aproximando-se da unidade. Paralelamente, os municípios de Horizonte, Cascavel, Trairi, Pacatuba, São Gonçalo do Amarante, Pacajus, Guaiúba, Maranguape e Chorozinho apresentaram valores tímidos nas janelas iniciais que, nas janelas finais, se elevaram significativamente. Em contraste, Aquiraz, Caucaia e São Luís do Curu mostraram desempenho inferior, mas que, de maneira verossímil, têm demonstrado melhorias nas janelas mais recentes. Silva (2013) revela que alguns municípios da região são negligenciados em relação ao repasse orçamentário destinado a questões ambientais, o que evidencia a necessidade de integrar e harmonizar essas práticas na região.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em face da relevância crescente do debate sobre desenvolvimento sustentável e mudanças climáticas, a avaliação da ecoeficiência torna-se uma ferramenta essencial para medir o desempenho econômico e ambiental de diversas unidades, como, por exemplo, países, regiões ou setores. Nesse contexto, o presente estudo objetivou mensurar a ecoeficiência dos municípios que compõem a Região Metropolitana de Fortaleza, no período de 2000 a 2020. O recorte espacial considera uma região que desempenha um papel crucial no estado do Ceará, em razão da sua dinâmica econômica e socioambiental. Para tanto, aplicou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA), por meio do modelo clássico (CCR) com retornos constantes de escala e orientação para *inputs*, como também entradas e saídas (desejáveis e indesejáveis). O modelo adotado (DEA-CCR-WA) considerou a análise por janelas, devido à presença de dados de séries temporais.

Os principais resultados, de maneira geral, sugerem uma certa consistência nos valores de ecoeficiência das cidades da Região Metropolitana de Fortaleza, demonstrando que foram otimizados no decorrer do tempo e, em consequência, nos anos mais recentes alcançam um certo grau de homogeneidade entre os municípios. Sobretudo, o município de Itaitinga, em alguns períodos da série histórica, foi capaz de conciliar crescimento econômico com preservação ambiental, ou seja, foi ecoeficiente. Já municípios como Fortaleza, Maracanaú, Paracuru, Paraipaba, Eusébio e Pindoretama expuseram resultados consistentemente elevados ao longo do período considerado. Ademais, os demais municípios mostram uma evolução ascendente nos seus escores ao longo das janelas, com valores médios situados entre 0,5 e 0,75, indicando alto grau de ecoeficiência. Os desempenhos menos expressivos aconteceram nos municípios de Aquiraz, Caucaia e São Luís do Curu.

Conclui-se, portanto, que o equilíbrio entre as atividades de promoção da sustentabilidade contribuiu significativamente para o crescimento sustentável da região, evidenciando a trajetória positiva nesse aspecto. Esse progresso é reflexo da integração entre as práticas sustentáveis nas cidades, apesar de algumas ainda enfrentarem gargalos estruturais. Em vista disso, a intensificação de políticas públicas que fomentem ações sustentáveis e promovam a adoção de técnicas e tecnologias mais limpas, apresentam-se como elementares para asseverar o nível de desenvolvimento sustentável desses municípios. Para pesquisas futuras, recomenda-se que os determinantes desses desempenhos sejam investigados, como também a exploração de outros modelos, recortes temporais ou espaciais considerados.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. C.; LIMA, F. A. X. Políticas públicas de sustentabilidade em Fortaleza, CE. **Interações**, v. 24, n. 2, p. 521–535, 2023. DOI: 10.20435/inter.v24i2.3318.

ARBABI, M.; MOGHADDAS, Z.; AMIRTEIMOORI, A.; KHUNSIYAVASH, M. An innovative inverse model of network data envelopment analysis. **Journal of Applied Research on Industrial Engineering**, v. 10, n. 4, p. 553-562, 2023.

ARAÚJO, R. V.; ESPELO, R. A.; CONSTANTINO, M.; MORAES, P. M.; TAVEIRA, J. C.; LIRA, F. S.; HERRERA, G. P.; COSTA, R. Eco-efficiency measurement as an approach to improve the sustainable development of municipalities: A case study in the Midwest of Brazil. **Environmental Development**, v. 39, p. 100652, 2021.

ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos avançados**, v. 34, p. 53-66, 2020.

ASMILD, M.; PARADI, J.C.; AGGARWALL, V.; SCHAFFNIT, C. Combining DEA Window Analysis with the Malmquist Index Approach in a Study of the Canadian Banking Industry. **Journal of Productivity Analysis**, v. 21, 67–89. 2004. DEA: [10.1023/B:PROD.0000012453.91326.ec](https://doi.org/10.1023/B:PROD.0000012453.91326.ec)

- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, S.I., v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.
- BARRETO, R. C. S.; ALMEIDA, E. S.; LIMA, J. E. Convergência espacial do PIB per capita no estado do Ceará. **Revista de Economia**, v. 36, n. 3, 2010.
- CABRAL, J. M. T.; MUNIZ, A.; SAMPAIO, P. M. A dinâmica industrial na região metropolitana de Fortaleza no contexto da reestruturação produtiva e espacial. **PEGADA-A Revista da Geografia do Trabalho**, v. 20, n. 2, p. 170-200, 2019.
- CAIADO, R.; DIAS, R.; MATTOS, L.; QUELHAS, O.; FILHO, W. Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.166>.
- CAMANHO, A. S.; SILVA, M. C.; PIRAN, F. S.; LACERDA, D. P. A literature review of economic efficiency assessments using Data Envelopment Analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 315, n. 1, p. 1-18, 2024.
- CAMARERO, M.; CASTILLO, J.; PICAZO-TADEO, AJ; TAMARIT, C. Eco-Efficiency and Convergence in OECD Countries. **Environmental Resource Economics**, v.55, p. 87–106, 2013.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429–444. 1978.
- CHAVES, R. R.; LUCENA, M. A.; SOUSA, E. P. Eficiência dos gastos públicos municipais com saneamento no Ceará e seus determinantes sociodemográficos. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 3, n. 53, p. 63-91, 2022.
- COSTA, C. S. **Fronteiras de produção no desenvolvimento de um sistema virtual de avaliação e simulação da ecoeficiência agropecuária**. 2021. 86 f., il. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; BAPTISTA, G. M. M.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; HERDIES, D. L.; SILVA, V. P. R. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de Downscaling Estatístico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 785-801, 2020.
- COURNOYER, A.; BAZINET, L. Electrodialysis processes an answer to industrial sustainability: toward the concept of eco-circular economy?—a review. **Membranes**, v. 13, n. 2, p. 205, 2023.
- DELLNITZ, A.; TAVANA, M.; BANKER, R. A novel median-based optimization model for eco-efficiency assessment in data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**, v. 322, n. 2, p. 661-690, 2023.
- DIAS, E. P. S.; FIGUEIREDO, S. C. G.; FARIAS, T. M. B. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: uma análise da linha do tempo da sustentabilidade e dos artefatos produzidos até a formalização da agenda 2030. **Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade**, v. 1, n. 6 esp, p. 105-120, 2021.
- DÍAZ-VILLAVICENCIO, G.; DIDONET, S.; DODD, A. Influencing factors of eco-efficient urban waste management: Evidence from Spanish municipalities. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1486-1496. 2017. DOI: [10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.064](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.064).

ELIAS, D.; LEITÃO, F. R.; PEQUENO, R. Avicultura na Região Metropolitana de Fortaleza: produção, agentes e dinâmicas socioespaciais. **Caminhos de Geografia**, v. 23, p. 156-172, 2022.

ELIAS, D.; PEQUENO, R.; LEITÃO, F. R. O que há de agrário na Região Metropolitana de Fortaleza? **GeoTextos**, v. 18, n. 1, p. 31-61, 2022.

FANCELLO, G.; CARTA, M.; SERRA, P. Data Envelopment Analysis for the assessment of road safety in urban road networks: A comparative study using CCR and BCC models. **Case studies on transport policy**, v. 8, n. 3, p. 736-744, 2020.

FARRELL, M. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**, [S. l.], v. 120, n. 3, p. 253-90, 1957.

FUKUYAMA, H.; TAN, Y. Environmental Protection and Economic Development: Research Progress of Eco-Efficiency. **Sustainability**, v. 15, n. 19, p. 14309, 2023. DOI: [10.3390/su151914309](https://doi.org/10.3390/su151914309).

GÓMEZ, T.; GÉMAR, G.; MOLINOS-SENANTE, M.; SALA-GARRIDO, R.; CABALLERO, R. Measuring the eco-efficiency of wastewater treatment plants under data uncertainty. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 484–492, 2018. DOI: [10.1016/j.jenvman.2018.08.067](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.067).

HALKOS, G.; PETROU, K. Treating undesirable outputs in DEA: a critical review. **Economic Analysis and Policy**, v. 62, p. 97-104. 2019. DOI: [10.1016/J.EAP.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/J.EAP.2019.01.005).

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Dados**. Ipeadata. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 19 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). **Produto Interno Bruto dos Municípios - 2021**. 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic>. Acesso em: 19 out. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE. **Total de emissões de gases do efeito estufa no Ceará é o segundo menor dos últimos 10 anos, segundo estudo do IPECE**. 2022. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/2022/12/21/total-de-emissoes-de-gases-do-efeito-estufa-no-ceara-e-o-segundo-menor-dos-ultimos-10-anos-segundo-estudo-do-ipece/#:~:Em%202021%2C%20a%20exemplo%20do%20Brasil%2C%20que%20foi%20de>. Acesso em: 25 out. 2024.

JOHN, I.; KWOFIE, E. M.; NGADI, M. Two decades of eco-efficiency research: a bibliometric analysis. **Environmental Sustainability**, v. 3, p. 155–168, 2020. DOI: [10.1007/s42398-020-00105-1](https://doi.org/10.1007/s42398-020-00105-1)

LIN, S.; SUN, J.; MARINOVA, D.; ZHAO, D. Evaluation of the green technology innovation efficiency of China's manufacturing industries: DEA window analysis with ideal window width. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 30, n. 10, p. 1166–1181. 2018. DOI: [10.1080/09537325.2018.1457784](https://doi.org/10.1080/09537325.2018.1457784).

LLANQUILEO-MELGAREJO, P.; MOLINOS-SENANTE, M. Evaluation of economies of scale in eco-efficiency of municipal waste management: an empirical approach for Chile. **Environmental Science Pollution Research**, v. 28, p. 28337–28348. 2021. DOI: [10.1007/s11356-021-12529-1](https://doi.org/10.1007/s11356-021-12529-1).

LUEDDECKENS, S. A review on the handling of discounting in eco-efficiency analysis. **Clean Technologies Environmental Policy**, v. 25, p. 3–20. 2023. DOI: [10.1007/s10098-022-02397-9](https://doi.org/10.1007/s10098-022-02397-9).

MACIEL, H. M.; MACIEL, W. M.; GOMES, M. A. Brasil e a Ecoeficiencia: Uma análise através do método envoltoria com livre disposição / Brazil and Ecoefficiency: An analysis through the wrapping method with free disposition. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 82049–82061, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n10-583.

MENDONÇA, P. S.; OLIVEIRA, U. C.; MAIA, A. M. ARAGÃO, T. B.; MENDES JÚNIOS, C. A. Análise da fiscalização ambiental estadual nos municípios da região metropolitana de Fortaleza entre os anos de 2014 e 2018. In: **Anais do X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Fortaleza/CE**. 2019.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL - MIDR. **Mais de R\$1 milhão será destinado a obras de saneamento em Itaitinga (CE)**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/mais-de-r-1-milhao-sera-destinado-a-obras-de-saneamento-em-itaitinga-ce>. Acesso em: 26 de out. 2024.

MOLINA, M. C. G. Desenvolvimento sustentável: do conceito de desenvolvimento aos indicadores de sustentabilidade. **Revista Metropolitana de Governança Corporativa**, v. 4, n. 1, p. 75-93, 2019.

MUSTAFA, F. S.; KHAN, R. U.; MUSTAFA, T. Technical efficiency comparison of container ports in Asian and Middle East region using DEA. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, v. 37, n. 1, p. 12-19, 2021.

NWANI, C.; ULLAH, A.; OJEYINKA, T.A.; IOREMBER, P.T.; BEKUN, F. V. Natural resources, technological innovation, and eco-efficiency: striking a balance between sustainability and growth in Egypt. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-32. 2023. DOI: [10.1007/s10668-023-03920-8](https://doi.org/10.1007/s10668-023-03920-8)

PAES, M. X.; MEDEIROS, G. A.; MANCINI, S. D.; GASOL, C.; PONS, J. R.; DURANY, X. G. Transition towards eco-efficiency in municipal solid waste management to reduce GHG emissions: The case of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121370, 2020.

PONTES, P. A. Os determinantes da redução da desigualdade espacial no Ceará nas últimas décadas. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 44, n. 2, p. 543-556, 2013.

RASHIDI, K.; SHABANI, A.; SAEN, R. Using data envelopment analysis for estimating energy saving and undesirable output abatement: a case study in the Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD) countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 241-252. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.07.083>.

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: 19 out. 2024.

RODRIGUES, M. V. F. S. **A Perspectiva da economia ecológica sobre a mudança de temperatura no município de Fortaleza, Ceará**. 2021. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Economia Ecológica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

ROMANO, G.; MOLINOS-SENANTE, M. Factors affecting eco-efficiency of municipal waste services in Tuscan municipalities: An empirical investigation of different management models. **Waste Management**, v. 105, p. 384-394, 2020.

ROMANO, G.; MOLINOS-SENANTE, M.; CAROSI, L.; LLANQUILEO-MELGAREJO, P.; SALA-GARRIDO, R.; MOCHOLI-ARCE, M. Assessing the dynamic eco-efficiency of Italian municipalities by accounting for the ownership of the entrusted waste utilities. **Utilities Policy**, v. 73, p. 101311, 2021.

ROSA, F.S.; LUNKES, R.J.; SAVIATTO, K. Effect of using public resources and training for the sustainable development of Brazilian municipalities. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 623, p. 1-11. 2019. DOI: 10.1007/s10661-019-7783-7

ROSANO-PENÑA, C.; TEIXEIRA, J. R.; KIMURA, H. Eco-efficiency in brazilian amazonian agriculture: Opportunity costs of degradation and protection of the environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 44, p. 62378-62389, 2021.

SANTANA, N. B. **Crescimento econômico, desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica: uma análise de eficiência por envoltória de dados para os países do BRICS**. 216f. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTOS, J. F. Desafios da conservação da biodiversidade no Brasil. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 48, 2021. DOI: 10.51189/rema/2070.

SERRANO, A. L. M.; SAIKI, G. M.; ROSANO-PENÑA, C.; RODRIGUES, G. A. P.; ALBUQUERQUE, R. O.; VILLALBA, L. J. G. Bootstrap Method of Eco-Efficiency in the Brazilian Agricultural Industry. **Systems**, v. 12, n. 4, p. 136, 2024.

SILVA, E. M. **Orçamento público para o meio ambiente: uma análise dos gastos orçados e realizados pelos municípios da região metropolitana de Fortaleza/CE, no período de 2008 a 2012**. 2013. 47 f. TCC (graduação em Ciências Contábeis) - Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Fortaleza - CE, 2013.

SILVA FILHO, L. A.; QUEIROZ, S. N.; CLEMENTINO, M. L. M. Mercado de trabalho nas regiões metropolitanas brasileiras. **Mercator**, v. 15, n. 02, p. 37-54, 2016.

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: 19 out. 2024.

TAN, J.; SU, X.; WANG, R. Exploring the Measurement of Regional Forestry Eco-Efficiency and Influencing Factors in China Based on the Super-Efficient DEA-Tobit Two Stage Model. **Forests**, v. 14, n. 2, p. 300. 2023. DOI: [10.3390/f14020300](https://doi.org/10.3390/f14020300).

VLONTZOS, G.; PARDALOS, P. M. Assess and prognosticate green house gas emissions from agricultural production of EU countries, by implementing, DEA Window analysis and artificial neural networks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 155–162. 2017. DOI:10.1016/j.rser.2017.03.054.

OLIVEIRA, M. S.; LIZOT, M.; SIQUEIRA, H.; AFONSO, P.; TROJAN, F. Efficiency analysis of oil refineries using DEA window analysis, cluster analysis, and Malmquist productivity index. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13611, 2023.

ZHANG, Y.; MAO, Y.; JIAO, L.; SHUAI, C.; ZHANG, H. Eco-efficiency, eco-technology innovation and eco-well-being performance to improve global sustainable development. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 89, p. 106580. 2021. DOI: 10.1016/J.EIAR.2021.106580.