

**Modelagem Matemática do Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise dos determinantes econômicos, ambientais e sociais do PIB per capita nos municípios brasileiros em 2024**

**Nathália Caroline Faria Tago**

Pós-Doutoranda em Economia Regional  
Universidade Estadual de Londrina, Brasil  
nathaliacarolinefaria@hotmail.com  
ORCID iD: 0000-0001-6853-1236

**Emerson Guzzi Zuan Esteves**

Professor Doutor em Economia  
Pós-Doutoranda em Economia Regional, Brasil  
emerson.esteves@uel.br  
ORCID iD: 0000-0003-0194-8998

**Carla Eunice Gomes Corrêa**

Doutora em Ciência e Tecnologia Ambiental  
Uniassevi, Brasil  
carla.correa@uniassevi.com.br  
ORCID iD: 0009-0001-4584-2899

**Alessandro Rodrigues de Lima Brandão**

Doutorando em Geografia  
Universidade Estadual de Londrina, Brasil  
alessandro.brandao300591@uel.br  
ORCID iD 0000-0001-7227-958X

**Bruno Henrique Costa**

Doutorando em Ensino de Ciências e Educação Matemática UEL  
Universidade Estadual de Londrina, Brasil  
brunohcosta2205@gmail.com  
ORCID iD 0000-0001-5078-1085

## **Modelagem Matemática do Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise dos determinantes econômicos, ambientais e sociais do PIB per capita nos municípios brasileiros em 2024**

### **RESUMO**

**Objetivo:** Analisar os determinantes econômicos, ambientais e sociais do Produto Interno Bruto (PIB) per capita nos municípios brasileiros no ano de 2024, utilizando modelagem matemática para identificar os principais fatores que influenciam o desenvolvimento econômico local.

**Metodologia:** A pesquisa adota abordagem quantitativa, com aplicação de modelo econométrico de regressão linear múltipla (Pooled OLS), com erros robustos para correção de heterocedasticidade. A variável dependente é o logaritmo do PIB per capita, e as variáveis independentes incluem indicadores de educação (IDEB), sustentabilidade ambiental (emissões de CO<sub>2</sub> e agricultura orgânica) e mercado de trabalho (desemprego). Foram realizados testes de diagnóstico, como matriz de correlação e análise de multicolinearidade (VIF). Adicionalmente, incorporou-se a análise de dependência espacial por meio do índice de Moran (Moran's I), a fim de verificar a existência de autocorrelação espacial entre os municípios.

**Originalidade/Relevância:** O estudo se destaca por integrar dimensões econômicas, sociais e ambientais em nível municipal recente, contribuindo para a literatura ao propor uma análise multidimensional do desenvolvimento sustentável no Brasil, preenchendo lacunas relacionadas à aplicação empírica conjunta dessas variáveis.

**Resultados:** Os resultados evidenciam que o IDEB possui impacto positivo e estatisticamente significativo sobre o PIB per capita, indicando a relevância do capital humano. As emissões de CO<sub>2</sub>, também, apresentaram relação positiva e significativa, sugerindo associação com a atividade econômica. As variáveis agricultura orgânica e desemprego não apresentaram significância estatística no modelo estimado.

**Contribuições teóricas/metodológicas:** O estudo reforça a aplicabilidade de modelos econométricos robustos na análise do desenvolvimento sustentável e evidencia a importância da validação estatística por meio de testes como VIF e correlação, contribuindo para maior rigor metodológico em pesquisas empíricas.

**Contribuições sociais e ambientais:** Os achados indicam a necessidade de políticas públicas voltadas ao fortalecimento da educação e ao equilíbrio entre crescimento econômico e sustentabilidade ambiental, contribuindo para o desenvolvimento mais equilibrado dos municípios brasileiros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desenvolvimento econômico. Sustentabilidade. PIB per capita. Econometria. Municípios brasileiros.

## **Mathematical Modeling of Sustainable Development: An Analysis of the Economic, Environmental, and Social Determinants of GDP per Capita in Brazilian Municipalities in 2024**

### **ABSTRACT**

**Objective:** To analyze the economic, environmental, and social determinants of Gross Domestic Product (GDP) per capita in Brazilian municipalities in 2024, using mathematical modeling to identify the main factors influencing local economic development.

**Methodology:** The research adopts a quantitative approach, applying a pooled OLS multiple linear regression econometric model with robust errors to correct for heteroscedasticity. The dependent variable is the logarithm of GDP per capita, and the independent variables include indicators of education (IDEB), environmental sustainability (CO<sub>2</sub> emissions and organic agriculture), and the labor market (unemployment). Diagnostic tests were performed, such as correlation matrix and multicollinearity analysis (VIF). Additionally, spatial dependence analysis was incorporated using Moran's I index to verify the existence of spatial autocorrelation between the municipalities.

**Originality/Relevance:** The study stands out for integrating economic, social, and environmental dimensions at the municipal level, contributing to the literature by proposing a multidimensional analysis of sustainable development in Brazil, filling gaps related to the joint empirical application of these variables.

**Results:** The results show that the IDEB (Basic Education Development Index) has a positive and statistically significant impact on GDP per capita, indicating the relevance of human capital. CO<sub>2</sub> emissions also showed a positive and significant relationship, suggesting an association with economic activity. The variables organic agriculture and unemployment did not show statistical significance in the estimated model.

**Theoretical/methodological contributions:** The study reinforces the applicability of robust econometric models in the analysis of sustainable development and highlights the importance of statistical validation through tests such as VIF and correlation, contributing to greater methodological rigor in empirical research.

**Social and environmental contributions:** The findings indicate the need for public policies aimed at strengthening education and balancing economic growth and environmental sustainability, contributing to a more balanced development of Brazilian municipalities.

**KEYWORDS:** Economic development. Sustainability. GDP per capita. Econometrics; Brazilian municipalities.

## **Modelización matemática del desarrollo sostenible: un análisis de los determinantes económicos, ambientales y sociales del PIB per cápita en los municipios brasileños en 2024.**

### **RESUMEN**

**Objetivo:** Analizar los determinantes económicos, ambientales y sociales del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita en los municipios brasileños en 2024, utilizando modelos matemáticos para identificar los principales factores que influyen en el desarrollo económico local.

**Metodología:** La investigación adopta un enfoque cuantitativo, aplicando un modelo econométrico de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) con errores robustos para corregir la heterocedasticidad. La variable dependiente es el logaritmo del PIB per cápita, y las variables independientes incluyen indicadores de educación (IDEB), sostenibilidad ambiental (emisiones de CO<sub>2</sub> y agricultura orgánica) y mercado laboral (desempleo). Se realizaron pruebas diagnósticas, como la matriz de correlación y el análisis de multicolinealidad (VIF).

**Originalidad/Relevancia:** El estudio destaca por integrar las dimensiones económica, social y ambiental a nivel municipal, contribuyendo a la literatura al proponer un análisis multidimensional del desarrollo sostenible en Brasil y subsanando las deficiencias relacionadas con la aplicación empírica conjunta de estas variables. Además, se incorporó un análisis de dependencia espacial utilizando el índice I de Moran para verificar la existencia de autocorrelación espacial entre los municipios.

**Resultados:** Los resultados muestran que el IDEB (Índice de Desarrollo de la Educación Básica) tiene un impacto positivo y estadísticamente significativo en el PIB per cápita, lo que indica la relevancia del capital humano. Las emisiones de CO<sub>2</sub> también mostraron una relación positiva y significativa, sugiriendo una asociación con la actividad económica. Las variables agricultura orgánica y desempleo no mostraron significancia estadística en el modelo estimado.

**Contribuciones teóricas/metodológicas:** El estudio refuerza la aplicabilidad de modelos econométricos robustos en el análisis del desarrollo sostenible y resalta la importancia de la validación estadística mediante pruebas como el VIF y la correlación, lo que contribuye a un mayor rigor metodológico en la investigación empírica.

**Contribuciones sociales y ambientales:** Los hallazgos indican la necesidad de políticas públicas dirigidas a fortalecer la educación y equilibrar el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental, contribuyendo a un desarrollo más equilibrado de los municipios brasileños.

**PALABRAS CLAVE:** Desarrollo económico; Sostenibilidad. PIB per cápita. Econometría. Municipios brasileños.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Santos (2025), o desenvolvimento econômico municipal tem sido amplamente debatido na literatura contemporânea, especialmente no contexto da integração entre crescimento econômico, sustentabilidade ambiental e bem-estar social. Nesse cenário, o Produto Interno Bruto (PIB) per capita se destaca como um dos principais indicadores utilizados para mensurar o nível de desenvolvimento econômico, permitindo comparações entre diferentes regiões e subsidiando a formulação de políticas públicas. No entanto, a compreensão dos fatores que determinam esse indicador exige uma abordagem multidimensional, capaz de incorporar variáveis econômicas, sociais e ambientais (Codevasf, 2024).

Nos últimos anos, de acordo com Amaral (2023), a discussão sobre desenvolvimento sustentável tem ganhado centralidade, sobretudo diante dos desafios relacionados às mudanças climáticas, desigualdades sociais e uso eficiente dos recursos naturais. Assim, torna-se relevante investigar como elementos como capital humano, práticas sustentáveis e condições do mercado de trabalho influenciam o desempenho econômico dos municípios brasileiros. Notoriamente, essa abordagem amplia a análise tradicional, ao considerar que o crescimento econômico não ocorre de forma isolada, mas está intrinsecamente relacionado a fatores estruturais e territoriais.

A escolha do contexto municipal brasileiro como objeto de análise justifica-se pela elevada heterogeneidade regional do país, marcada por desigualdades socioeconômicas e estruturais (Amaral, 2023). Além disso, o nível municipal permite uma análise mais desagregada, possibilitando a identificação de padrões espaciais e relações locais que, muitas vezes, não são captadas em estudos agregados em nível estadual ou nacional. Tal recorte é especialmente relevante para subsidiar políticas públicas mais direcionadas e eficientes (Codevasf, 2024).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar os determinantes econômicos, ambientais e sociais do PIB per capita nos municípios brasileiros no ano de 2024, por meio de modelagem matemática aplicada. Para tanto, adota-se uma abordagem quantitativa, com a utilização de modelos de regressão linear múltipla, considerando o logaritmo do PIB per capita como variável dependente, o que contribui para a redução de assimetrias e melhora o ajuste do modelo econométrico.

As variáveis explicativas selecionadas refletem diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável. A proporção de estabelecimentos que praticam agricultura orgânica representa a dimensão ambiental e a transição para uma economia verde, podendo indicar maior agregação de valor e práticas produtivas sustentáveis. O Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB), referente aos anos finais, é utilizado como proxy de capital humano, sendo amplamente reconhecido como determinante da produtividade e da renda. A taxa de desemprego, por sua vez, representa a dinâmica do mercado de trabalho, impactando diretamente a geração de renda e o nível de atividade econômica. Adicionalmente, a variável de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é incorporada como indicador de impacto ambiental associado à atividade econômica.

No que se refere ao método de análise, além da regressão linear múltipla com estimadores robustos para correção de heterocedasticidade, o estudo incorpora técnicas matemáticas e de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE), com destaque para o cálculo

do Índice de Moran (Moran's I), a fim de verificar a existência de autocorrelação espacial entre os municípios. Essa abordagem permite identificar padrões de dependência espacial, contribuindo para uma análise mais robusta e alinhada às características territoriais do desenvolvimento econômico.

Com base nessa estrutura analítica, o estudo parte das seguintes hipóteses: (i) o capital humano, representado pelo IDEB, exerce influência positiva sobre o PIB per capita; (ii) práticas sustentáveis, como a agricultura orgânica, contribuem positivamente para o desenvolvimento econômico; (iii) maiores taxas de desemprego impactam negativamente o PIB per capita; e (iv) variáveis ambientais, como as emissões de CO<sub>2</sub>, apresentam relação significativa com o nível de atividade econômica. Adicionalmente, pressupõe-se a existência de dependência espacial entre os municípios, indicando que o desenvolvimento econômico pode ser influenciado por efeitos de vizinhança.

A seguir, apresenta-se a metodologia adotada, que integra diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável em um modelo econométrico aplicado ao contexto municipal brasileiro, com o objetivo de gerar evidências empíricas para subsidiar políticas públicas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento econômico, na perspectiva contemporânea, deve ser compreendido para além do crescimento da renda, incorporando dimensões sociais, ambientais e institucionais. O Produto Interno Bruto (PIB) per capita, embora amplamente utilizado como indicador de desempenho econômico, apresenta limitações quando analisado de forma isolada, sendo necessário integrá-lo a outros fatores que refletem a qualidade do desenvolvimento (SANTOS, 2025). Nesse contexto, emerge a abordagem do desenvolvimento sustentável, que busca equilibrar crescimento econômico, inclusão social e preservação ambiental.

A concepção de desenvolvimento sustentável está diretamente associada às diretrizes da Agenda 2030 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que orientam políticas públicas e estratégias de crescimento em nível global e local. Conforme Barbosa et al. (2022), a integração entre economia e meio ambiente é essencial para garantir a continuidade dos sistemas produtivos, especialmente em cenários de pressão sobre os recursos naturais. Sendo assim, o crescimento econômico passa a ser analisado sob a ótica de sua sustentabilidade no longo prazo.

Entre os fatores determinantes do desenvolvimento econômico, o capital humano se destaca como elemento central. A educação, ao elevar o nível de qualificação da população, contribui para o aumento da produtividade, inovação e competitividade econômica. Amaral (2023) ressalta que investimentos educacionais são fundamentais para a construção de uma base econômica sólida, sendo o Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB) um importante indicador para mensurar essa dimensão nos municípios brasileiros.

No que se refere à relação entre economia e meio ambiente, a literatura aponta que o crescimento econômico pode gerar impactos ambientais significativos, especialmente em fases iniciais de desenvolvimento. A Curva de Kuznets Ambiental sugere que há uma relação não linear entre renda e degradação ambiental, indicando que o aumento da atividade econômica tende, inicialmente, a elevar os níveis de poluição, como as emissões de CO<sub>2</sub> (BARBOSA et al., 2022). Assim, a análise dessas variáveis permite avaliar se o crescimento ocorre de forma sustentável

ou à custa de externalidades ambientais.

A dinâmica do mercado de trabalho também exerce influência sobre o desempenho econômico. A taxa de desemprego reflete a capacidade de absorção da força de trabalho e a geração de renda, sendo um indicador relevante para análise do desenvolvimento. Segundo Ferraz (2019), níveis elevados de desemprego podem limitar o crescimento econômico ao reduzir o consumo e ampliar desigualdades sociais, embora seus efeitos possam variar conforme as características estruturais de cada região.

Além dos fatores estruturais, a dimensão espacial tem ganhado destaque nos estudos econômicos, especialmente em análises regionais. Junior et al. (2021) destacam que o desenvolvimento não ocorre de maneira isolada, sendo influenciado por relações de proximidade geográfica e interações territoriais. A utilização de técnicas como a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) permite identificar padrões de concentração e dispersão, evidenciando a existência de clusters econômicos e desigualdades regionais.

No campo metodológico, a modelagem econométrica constitui ferramenta fundamental para investigar relações entre variáveis socioeconômicas. Conforme Bizarrias, Da Silva e Penha (2023), modelos de regressão com dados em painel possibilitam maior robustez analítica ao considerar variações temporais e espaciais simultaneamente. A aplicação de testes estatísticos, como análise de multicolinearidade e correção de heterocedasticidade, assegura maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Nessa perspectiva, a literatura recente enfatiza a necessidade de abordagens interdisciplinares para compreender o desenvolvimento sustentável. Mottin, Santos e Guérios (2017) destacam que a articulação entre educação e sustentabilidade contribui para a formação de indivíduos capazes de interpretar e intervir na realidade socioeconômica. De forma complementar, Mayer et al. (2025) apontam que a transição para modelos produtivos sustentáveis depende de mudanças estruturais e do engajamento social, especialmente no que se refere à adoção de práticas como a economia circular.

Por fim, a heterogeneidade dos municípios brasileiros evidencia a importância de análises desagregadas, capazes de captar especificidades locais. Estudos como o da Codevasf (2023) demonstram que desigualdades regionais estão associadas a fatores como infraestrutura, capital humano e capacidade institucional, reforçando a complexidade do desenvolvimento econômico no país.

Diante disso, torna-se necessária a adoção de uma abordagem multidimensional na análise do desenvolvimento econômico, integrando variáveis econômicas, sociais, ambientais e espaciais. Essa perspectiva fundamenta o uso da modelagem matemática e econométrica como instrumento para compreender os determinantes do PIB per capita nos municípios brasileiros.

### **3 METODOLOGIA**

A pesquisa caracteriza-se como quantitativa, de natureza aplicada e abordagem explicativa, uma vez que busca identificar e mensurar as relações entre variáveis que influenciam o desenvolvimento econômico municipal. Os dados utilizados possuem estrutura transversal em painel, permitindo a análise comparativa entre os municípios brasileiros no período considerado, o que contribui para maior robustez estatística e controle de heterogeneidade não observada.

### 3.1 Base de dados e área de estudo

A base de dados utilizada neste estudo é proveniente do Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades – Brasil (IDSC-BR) (2026), que monitora a evolução dos 5.570 municípios brasileiros em relação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). O IDSC-BR constitui uma ferramenta abrangente e integrada, permitindo a análise multidimensional do desenvolvimento sustentável em nível municipal, sendo o Brasil o único país a acompanhar sistematicamente todos os seus municípios nesse contexto. A escolha dessa base justifica-se pela sua abrangência, confiabilidade e alinhamento com indicadores internacionais, possibilitando a análise conjunta de dimensões econômicas, sociais e ambientais do desenvolvimento.

As análises econométricas e espaciais foram realizadas com o auxílio do software Stata e Geoda, amplamente utilizados em estudos quantitativos e econométricos, garantindo rigor metodológico e reprodutibilidade dos resultados.

### 3.2 Definição das variáveis

O modelo econométrico proposto considera como variável dependente o Produto Interno Bruto (PIB) per capita, utilizado como *proxy* do desenvolvimento econômico municipal. Com o objetivo de melhorar o ajuste do modelo e reduzir problemas relacionados à assimetria dos dados, utilizou-se o logaritmo natural do PIB per capita (PIB\_LOG). As variáveis independentes foram selecionadas com base em diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável, conforme descrito a seguir:

**Quadro 1** – Definição e caracterização das variáveis do modelo econométrico

Variável	Tipo	ODS	Método de cálculo	Descrição
<b>PIB per capita</b>	Dependente (Y)	ODS 8 – Trabalho Decente e Crescimento Econômico: promove o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos	PIB municipal ÷ população residente <b>(R\$ per capita)</b>	Indicador do nível de desenvolvimento econômico municipal, amplamente utilizado para mensurar a geração média de renda por habitante
<b>AGRORG</b>	Independente (X <sub>1</sub> )	ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável: visa erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável	Estabelecimentos com agricultura orgânica (nº de estabelecimentos orgânicos ÷ total de estabelecimentos) × 100 <b>(%)</b>	Representa a proporção de estabelecimentos que adotam práticas de produção sustentável, associadas à economia verde
<b>CO<sup>2</sup></b>	Independente (X <sub>2</sub> )	ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima: busca adotar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos	Emissões totais de CO <sub>2</sub> per capita e ÷ população residente	Mede o nível de emissões de gases de efeito estufa por habitante, refletindo o impacto ambiental das atividades econômicas
<b>IDEB</b>	Independente (X <sub>3</sub> )	ODS 4 – Educação de Qualidade: assegura a educação inclusiva, equitativa	Índice de Desenvolvimento da	Indicador da qualidade da educação básica, utilizado como proxy

		e de qualidade, promovendo oportunidades de aprendizagem ao longo da vida	Educação Básica (IDEB) – anos finais (Índice de 0–10)	de capital humano e produtividade
<b>DSC</b>	Independente ( $X_4$ )	ODS 8 – Trabalho Decente e Crescimento Econômico: promove o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo	Taxa de desemprego (número de desempregados ÷ PEA) × 100 (%)	Percentual da população economicamente ativa (PEA) que se encontra desocupada, refletindo a dinâmica do mercado de trabalho

Fonte: DSC – BR (2026).

O Quadro 1 sintetiza, de forma estruturada, as variáveis utilizadas na modelagem econométrica, evidenciando a articulação entre dimensões econômicas, sociais e ambientais no estudo do desenvolvimento municipal. A escolha do PIB per capita como variável dependente permite mensurar o nível de desenvolvimento econômico, enquanto as variáveis explicativas (agricultura orgânica, emissões de CO<sub>2</sub>, educação (IDEB) e taxa de desemprego) representam fatores centrais associados à sustentabilidade, ao capital humano e à dinâmica do mercado de trabalho.

Ademais, a vinculação desses indicadores aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) reforça o alinhamento do estudo à Agenda 2030, conferindo maior relevância analítica e institucional à pesquisa. A partir disso, o conjunto de variáveis selecionadas possibilita uma abordagem integrada e multidimensional, adequada para investigar os determinantes do desenvolvimento econômico sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável.

### 3.3 Especificação do modelo econométrico

A modelagem econométrica proposta neste estudo tem como objetivo analisar os determinantes do desenvolvimento econômico municipal a partir de uma abordagem quantitativa e multidimensional. Para tanto, utiliza-se como variável dependente o logaritmo natural do Produto Interno Bruto per capita, permitindo maior estabilidade na variância e melhor interpretação dos coeficientes estimados. As variáveis explicativas incorporam dimensões relevantes ao desenvolvimento sustentável. A estrutura analítica do modelo segue uma especificação funcional linear, estimada com base em dados em painel, o que possibilita captar variações tanto entre os municípios quanto ao longo do tempo, ampliando a robustez dos resultados e a capacidade explicativa da análise. Ou seja, a estrutura analítica do modelo segue a seguinte função matemática (Correia e Filho, 2017):

$$\ln(PIB_{it}) = \beta_0 + \beta_1 AGRORG_{it} + \beta_2 CO2_{it} + \beta_3 IDEB_{it} + \beta_4 DSC_{it} + \varepsilon_{it}$$

onde:

- $i$  representa o município;
- $t$  representa o período analisado;
- $\varepsilon_{it}$  é o termo de erro aleatório.

O modelo foi estimado por meio de regressão linear múltipla em painel (Pooled OLS), com utilização de erros robustos para correção de heterocedasticidade. Assim, a especificação econométrica adotada, fundamenta-se em regressão linear múltipla com dados em painel



A Figura 1 apresenta os resultados da estimação do modelo de regressão linear múltipla, utilizando o método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com erros robustos, tendo como variável dependente o logaritmo do PIB per capita (PIB\_LOG). O modelo foi estimado com 399 observações e apresentou significância estatística global, conforme indicado pelo teste F ( $F = 7,70$ ;  $p\text{-valor} < 0,01$ ), permitindo rejeitar a hipótese nula de que todos os coeficientes são conjuntamente iguais a zero. Isso indica que o conjunto das variáveis explicativas possui capacidade explicativa sobre a variável dependente.

O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,0622$ ) sugere que aproximadamente 6,22% da variação do PIB per capita é explicada pelas variáveis incluídas no modelo. Embora relativamente baixo, esse resultado é comum em estudos com dados socioeconômicos, que envolvem múltiplos fatores não observáveis. A variável emissões de CO<sub>2</sub> per capita (CO<sub>2</sub>) apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo ao nível de 1% ( $\beta = 0,0007815$ ;  $p < 0,01$ ). Esse resultado indica que o aumento das emissões está associado ao crescimento do PIB per capita, sugerindo que municípios mais desenvolvidos economicamente tendem a apresentar maiores níveis de emissão. Esse achado é consistente com a literatura da Curva de Kuznets Ambiental, segundo a qual, em estágios iniciais de desenvolvimento, o crescimento econômico está associado à maior degradação ambiental.

A variável IDEB (anos finais), também, apresentou coeficiente positivo e altamente significativo ( $\beta = 0,0654269$ ;  $p < 0,01$ ), evidenciando que melhorias na qualidade da educação estão associadas a aumentos no PIB per capita. Como a variável dependente está em logaritmo, o coeficiente pode ser interpretado como uma semi-elasticidade, indicando que um aumento de uma unidade no IDEB está associado a um crescimento aproximado de 6,54% no PIB per capita. Esse resultado reforça a importância do capital humano como determinante do desenvolvimento econômico.

Por outro lado, a variável desemprego (DSC) não apresentou significância estatística ( $p = 0,456$ ), indicando que, no modelo estimado, não foi possível identificar evidências de que essa variável exerça influência significativa sobre o PIB per capita. Esse resultado pode estar relacionado à presença de informalidade no mercado de trabalho ou à limitação da variável em captar plenamente a dinâmica econômica local.

De forma semelhante, a variável agricultura orgânica (AGRORG) também não apresentou significância estatística ( $p = 0,699$ ), sugerindo que, no curto prazo ou no contexto analisado, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis ainda não se traduz diretamente em impactos mensuráveis sobre o PIB per capita. A ausência de significância estatística dessa variável pode estar associada a limitações na mensuração do indicador ou à existência de efeitos de longo prazo não capturados pelo modelo, indicando que os impactos da sustentabilidade produtiva podem ocorrer de forma indireta ou defasada. No entanto, esse resultado não invalida sua relevância, podendo indicar efeitos de longo prazo ou indiretos não capturados pelo modelo, como aponta o Quadro 2.

Quadro 2 – Correlação

	PIB_LOG	CO <sub>2</sub>	DSC	IDEB	AGRORG
PIB_LOG	10.000				
CO <sub>2</sub>	0.0796	10.000			
DSC	0.0017	0.0256	10.000		
IDEB	0.2253	-0.0841	-0.159	10.000	
AGRORG	-0.0118	-0.0622	0.1318	-0.1097	10.000

Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2026).

A Tabela 1, apresenta a matriz de correlação entre as variáveis utilizadas no modelo econométrico: logaritmo do PIB per capita (PIB\_LOG), emissões de CO<sub>2</sub> per capita (CO<sub>2</sub>), desemprego (DSC), Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB) e estabelecimentos que praticam agricultura orgânica (AGRORG). De forma geral, observa-se que as correlações entre as variáveis são de baixa magnitude, indicando reduzida associação linear entre os regressores, o que sugere baixo risco de multicolinearidade no modelo estimado.

A variável IDEB, por exemplo, apresentou a maior correlação com o PIB per capita ( $r = 0,2253$ ), ainda que de intensidade fraca. Esse resultado sugere uma associação positiva entre qualidade da educação e nível de desenvolvimento econômico, reforçando o papel do capital humano como fator relevante para o crescimento econômico. Já, a variável CO<sub>2</sub> apresentou correlação positiva, porém bastante baixa ( $r = 0,0796$ ), indicando uma fraca associação linear entre emissões e nível de renda. Esse resultado, embora consistente com a literatura, levanta uma questão relevante: o crescimento econômico municipal ainda apresenta dependência de atividades intensivas em carbono, o que pode comprometer a sustentabilidade no longo prazo. Tal evidência sugere a necessidade de políticas que promovam o desacoplamento entre crescimento econômico e degradação ambiental.

Ainda assim, o sinal positivo está alinhado à literatura que aponta que economias mais desenvolvidas tendem a apresentar maior nível de emissões, especialmente em fases iniciais de crescimento. As variáveis DSC (desemprego) ( $r = 0,0017$ ) e AGRORG (agricultura orgânica) ( $r = -0,0118$ ) apresentaram correlações praticamente nulas com o PIB per capita, indicando ausência de relação linear relevante no contexto analisado. No que se refere à relação entre os regressores, verificou-se que:

- A correlação entre IDEB e DSC é negativa ( $r = -0,159$ ), sugerindo que melhores níveis educacionais estão associados a menores taxas de desemprego, o que é consistente com a teoria econômica.
- A variável AGRORG apresenta correlações fracas com as demais variáveis, destacando-se uma leve associação positiva com o desemprego ( $r = 0,1318$ ) e negativa com o IDEB ( $r = -0,1097$ ), ambas de baixa magnitude.
- As correlações envolvendo CO<sub>2</sub> também são reduzidas, com destaque para a relação negativa com o IDEB ( $r = -0,0841$ ), indicando que municípios com melhor desempenho educacional podem apresentar, ainda que de forma tênue, menores níveis de emissão.

Observe que, a baixa intensidade das correlações observadas sugere que as variáveis explicativas capturam dimensões distintas do desenvolvimento econômico, o que é desejável em modelos econométricos, pois reduz problemas de redundância informacional. Além disso, a

ausência de correlações elevadas (geralmente acima de 0,7 ou 0,8) indica que não há evidências de multicolinearidade severa, o que contribui para a estabilidade e confiabilidade das estimativas obtidas na regressão.

No que se refere à análise da matriz de correlação evidencia que, embora algumas variáveis apresentem associações teóricas esperadas, as relações lineares entre os indicadores são, em geral, de baixa intensidade, reforçando a complexidade do fenômeno do desenvolvimento econômico e a necessidade de abordagens multivariadas para sua adequada compreensão, como constata-se na Figura 2.

Figura 2 – Teste de multicolinearidade

. vif

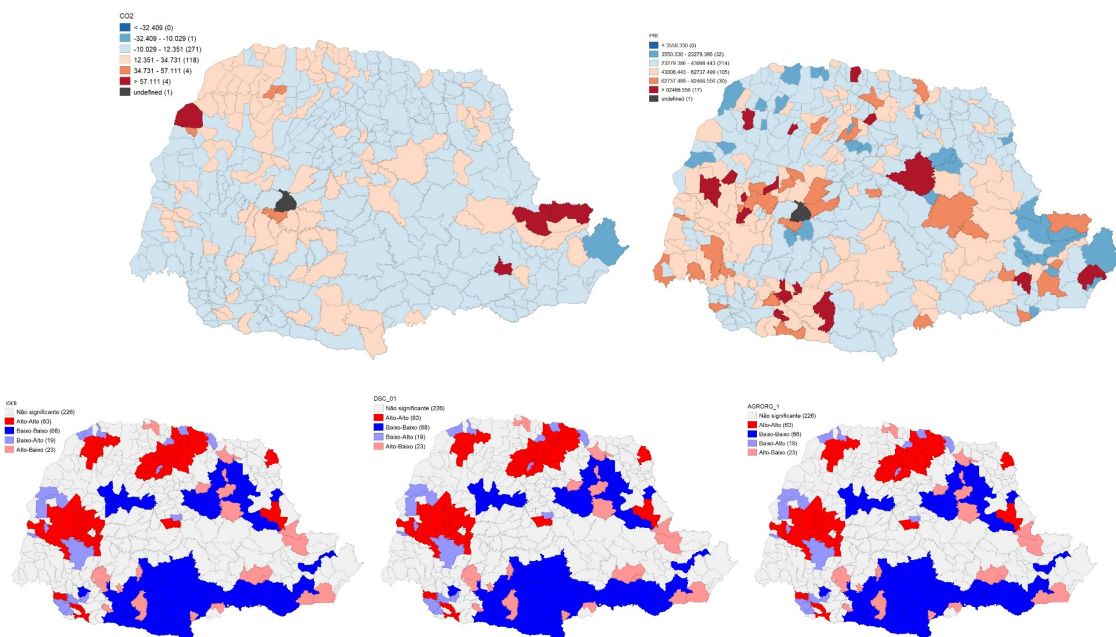
Variable	VIF	1/VIF
IDEB	1.04	0.959274
DSC	1.04	0.961074
AGRORG	1.03	0.969201
CO2	1.01	0.987322
Mean VIF	1.03	

Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2026).

A análise da multicolinearidade, de acordo com a Figura 2, foi realizada por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF). Os resultados indicaram valores próximos de 1 para todas as variáveis explicativas (VIF médio = 1,03), evidenciando ausência de multicolinearidade no modelo. De acordo com a literatura, valores de VIF inferiores a 5 indicam que não há correlação linear elevada entre os regressores, garantindo maior estabilidade e confiabilidade das estimativas obtidas. Os resultados indicam que o desenvolvimento econômico municipal está mais fortemente associado a fatores estruturais, como educação e intensidade produtiva, do que a variáveis conjunturais ou setoriais, reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas ao fortalecimento do capital humano e à transição para modelos de crescimento sustentável.

Em síntese, os resultados indicam que variáveis relacionadas ao capital humano (educação) e ao nível de atividade econômica com impacto ambiental (emissões de CO<sub>2</sub>) possuem maior relevância na explicação do desenvolvimento econômico municipal. Por outro lado, variáveis associadas ao mercado de trabalho e à sustentabilidade produtiva não apresentaram significância estatística no modelo estimado. Em virtude disso, a utilização de erros robustos contribui para maior confiabilidade dos resultados, ao corrigir possíveis problemas de heterocedasticidade.

Figura 3 – Análise de Indicadores Locais de Associação Espacial (LISA)



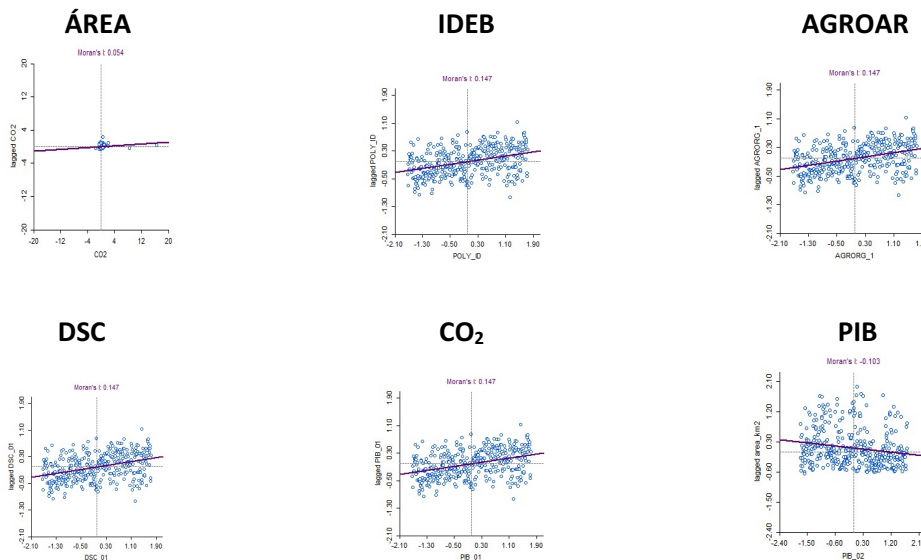
Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2026).

Os mapas apresentados, na Figura 3, evidenciam a distribuição espacial e os padrões de autocorrelação espacial local (LISA) para diferentes variáveis analisadas. Nos mapas superiores, observa-se a distribuição das emissões de CO<sub>2</sub> per capita, com variações entre municípios representadas por diferentes tonalidades. Nota-se uma predominância de municípios com níveis intermediários e baixos de emissão, enquanto áreas com maiores emissões aparecem de forma pontual e concentrada em determinadas regiões, sugerindo desigualdade na intensidade das atividades econômicas e produtivas.

Nos mapas inferiores, são apresentados os resultados da Análise de Indicadores Locais de Associação Espacial (LISA), que identificam clusters espaciais significativos. As áreas em vermelho (alto-alto) indicam municípios com valores elevados cercados por vizinhos também elevados, caracterizando regiões de concentração de maior intensidade da variável analisada. Já as áreas em azul (baixo-baixo) representam municípios com baixos valores próximos a outros também baixos, indicando clusters de menor intensidade. As regiões em tons intermediários (alto-baixo e baixo-alto) evidenciam possíveis outliers espaciais, ou seja, municípios com comportamento distinto de seus vizinhos.

No geral, os resultados da Tabela 3 indicam a existência de padrões espaciais relevantes, com formação de clusters tanto de alto quanto de baixo desempenho para as variáveis analisadas. Com isso, os gráficos evidenciam que a dimensão espacial na análise socioeconômica informa que os fenômenos não ocorrem de maneira isolada, mas sim influenciados pela proximidade geográfica e pelas interações regionais, como reforça a Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Análise Espacial das Emissões das variáveis e padrões de autocorrelação local nos municípios



Fonte: Elaborada pelos próprios autores (2026).

Sob a análise espacial, a Figura 4, visa analisar os Diagramas de Dispersão de Moran para a variável área, evidenciando um Índice de Moran igual a 0,264. O índice da área salienta a presença de autocorrelação espacial positiva de baixa a moderada intensidade, sugerindo que municípios com maiores áreas territoriais tendem a estar espacialmente próximos de outros municípios também com maiores extensões, assim como áreas menores tendem a se agrupar. Assim, a inclinação positiva da reta de regressão reforça esse padrão de associação espacial, ainda que os pontos estejam relativamente dispersos, o que indica que essa relação não é fortemente concentrada.

O diagrama de dispersão de Moran para o IDEB, DSC e AGROAR, por sua vez, destaca um Índice de Moran igual a 0,147. Teoricamente, esse valor revela uma autocorrelação espacial positiva fraca, indicando uma leve tendência de agrupamento espacial entre unidades semelhantes, porém com menor intensidade quando comparada à variável anterior. A maior dispersão dos pontos em torno da reta sugere que a dependência espacial é menos pronunciada, o que pode indicar maior heterogeneidade entre as unidades espaciais analisadas.

De forma geral, os resultados apontam que os índices apresentam algum grau de dependência espacial, sendo mais evidente para a variável área. Sucintamente, esse achado reforça a importância de considerar a dimensão espacial nas análises econométricas, uma vez que a presença de autocorrelação pode influenciar a precisão das estimativas e a interpretação dos resultados. Uma vez que, a significância do Índice de Moran valida a necessidade de políticas territoriais integradas, indo ao encontro dos estudos da Codevasf (2023), que destacam a necessidade da infraestrutura regional para mitigar desigualdades socioeconômicas. Em outras palavras, prova que o desenvolvimento sustentável não ocorre em "ilhas" e se um município vai bem, influencia os vizinhos.

De modo geral, os resultados da modelagem apontam o capital humano (IDEB) e as emissões de CO<sub>2</sub> como determinantes centrais do desenvolvimento econômico, encontram forte eco na literatura acadêmica recente. Ao analisar a correlação entre educação e

sustentabilidade, Mottin, Santos e Guérios (2017, p.1) reforçam que o letramento matemático nos anos iniciais, quando associado a temas transversais como a sustentabilidade, é o que permite a formação de cidadãos capazes de interpretar e atuar sobre indicadores socioeconômicos complexos. Para as autoras, o "enriquecimento metodológico" por meio da interdisciplinaridade é o que garante que o desenvolvimento não seja unicamente métrico, mas sim qualitativo.

No que tange à gestão pública e à implementação de políticas globais em nível local, Santos (2025) argumenta que o sucesso de indicadores como o PIB per capita sustentável depende da internalização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no planejamento municipal. Em seu estudo sobre Cubatão, a autora destaca:

Conforme o tema ganha cada vez mais importância, não só no âmbito municipal, mas principalmente regional, estadual e nacional, será cada vez mais fácil e incentivado, que as ações sejam alinhadas aos ODS, o que contribuirá diretamente para a promoção e expansão das ações (Santos, 2025, p. 148).

Diante do exposto, esta perspectiva válida a necessidade de que os modelos matemáticos incorporem variáveis de governança, uma vez que a eficiência econômica está atrelada à capacidade institucional de gerir recursos ambientais. Complementarmente, Amaral (2023) observa que a Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS) deve ser o pilar de sustentação das políticas públicas de ensino superior e técnico, funcionando como um catalisador para a inovação que reduz as emissões de CO<sub>2</sub> sem comprometer o crescimento do PIB.

Por outro lado, a discussão sobre a baixa significância estatística de variáveis de sustentabilidade produtiva e mercado de trabalho no modelo estimado pode ser explicada pelas barreiras culturais e estruturais apontadas por Mayer et al. (2025). Segundo os autores, a transição para modelos de economia circular e gestão eficiente de resíduos sólidos urbanos ainda enfrenta o desafio de transformar "paradigmas e o engajamento comunitário" vinculando-as a diferentes ODS (Mayer et al., 2025, p.22). Logo, a dificuldade de variáveis como agricultura orgânica apresentarem peso no PIB municipal de 2024 reflete o estágio inicial dessa mudança cultural nas cadeias produtivas brasileiras.

Por fim, a necessidade de correções econométricas (erros robustos) e espaciais para lidar com a heterogeneidade municipal é corroborada pelo Estudo de Indicadores Socioeconômicos da Codevasf (2023), que evidencia as profundas disparidades regionais no Brasil. Assim como o presente estudo que ressalta que indicadores de vulnerabilidade socioeconômica variam drasticamente conforme a infraestrutura local, o que justifica a complexidade dos resultados obtidos na modelagem matemática e a importância de olhar para além das médias nacionais.

## 5 CONCLUSÃO

A presente investigação possibilitou compreender, por meio de modelagem matemática e econométrica, os determinantes do PIB per capita nos municípios brasileiros, evidenciando a relevância do capital humano e da intensidade da atividade econômica no contexto da Agenda 2030. No entanto, os resultados também revelam uma tensão central: o

crescimento econômico observado ainda está associado a impactos ambientais relevantes, especialmente no que se refere às emissões de CO<sub>2</sub>, o que indica que o avanço econômico municipal não tem ocorrido, de forma plena, sob bases sustentáveis.

Os resultados indicam que, por mais que a educação (representada pelo IDEB) se confirme como um fator estruturante do desenvolvimento, sua capacidade de promover transformações mais profundas depende da articulação com políticas públicas que integrem dimensões ambientais e produtivas. A convergência com a literatura evidencia que não basta ampliar indicadores educacionais, mas sim direcionar a formação para práticas que promovam inovação, consciência ambiental e reconfiguração dos modelos produtivos. Do mesmo modo, a ausência de significância estatística de variáveis como agricultura orgânica e desemprego não deve ser interpretada como irrelevância, mas como indício de limitações estruturais e temporais, sugerindo que seus efeitos podem ser indiretos, de longo prazo ou condicionados por fatores institucionais.

Adicionalmente, os resultados reforçam que o desenvolvimento econômico municipal no Brasil é profundamente heterogêneo e influenciado por dinâmicas espaciais, o que evidencia a necessidade de políticas territorialmente orientadas. A existência de padrões espaciais indica que o desempenho econômico não ocorre de forma isolada, mas condicionado por efeitos de vizinhança, infraestrutura e capacidade institucional, o que amplia a complexidade da formulação de políticas públicas eficazes.

O estudo não se limita a confirmar relações esperadas, mas evidencia os limites do modelo de crescimento vigente, ao demonstrar que o avanço econômico ainda não está plenamente alinhado aos princípios do desenvolvimento sustentável. A internalização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nos instrumentos de planejamento público se mostra necessária, mas não suficiente, exigindo também capacidade de implementação, monitoramento e adaptação às realidades locais.

Por fim, destaca-se que a modelagem adotada, embora robusta, captura apenas parte da complexidade do fenômeno analisado. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras incorporem variáveis institucionais e de governança, além de modelos espaciais mais avançados e análises em séries temporais, a fim de ampliar a compreensão sobre os determinantes do desenvolvimento econômico sustentável no Brasil.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, Maria Lúcia Soares do. **Gestão da educação para o desenvolvimento sustentável: um estudo no Instituto Federal de Educação de São Paulo**. Tese (Doutorado). Universidade Municipal de São Caetano do Sul. Programa de Pós-graduação em Administração. São Paulo, 2023. 487 f. Disponível em: <<https://repositorio.uscs.edu.br/items/07378a51-6c82-4d95-82cd-86d8a1acfa92>>. Acesso em: 20 mar. 2026.

BIZARRIAS, Flavio Santino; DA SILVA, Luciano Ferreira; PENHA, Renato. Preparação de dados e boas práticas em pesquisas quantitativas. **Gestão e Projetos: GeP**, v. 14, n. 1, p. 1-10, 2023.

BARBOSA, Milson dos Santos et al. **Interações entre o meio ambiente, desenvolvimento sustentável e economia circular**. AYA Editora, 2022.

CORREIA, Ayslan de Jesus; FILHO, José Firmino de Sousa. **Dinâmica e Persistência da Dependência Fiscal nos Municípios Brasileiros: Uma Análise com dados em Painel entre 2003 e 2019**. Associação Brasileira de Estudos Regionais, 2017.

FERRAZ, Diogo. **Complexidade econômica e desenvolvimento humano: uma análise por meio do Data Envelopment Analysis (DEA)**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.

2019. 142 f. Disponível em:< <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-21112019-160039/en.php>>. Acesso em: 20 mar. 2026.

IDSC-BRASIL. Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades. **Baixar a base de dados do IDSC-BR 2025**. 2026. Disponível em:< <https://www.cidadessustentaveis.org.br/paginas/idsc-br#:~:text=Baixar%20a%20base%20de%20dados%20do%20IDSC%20BR%202025>>. Acesso em: 20 mar. 2026.

JUNIOR, Adirson Maciel de Freitas et al. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INOVAÇÃO NA REGIÃO SUL DO BRASIL DE 2005 A 2015, A PARTIR DA ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 1, n. 1, 2021.

MAYER, Leila Franciele Pereira et al. Aprender, reutilizar e transformar: educação ambiental como ferramenta para promoção da economia circular. In: **RESÍDUOS E SUSTENTABILIDADE: planejamento, políticas e práticas ambientais**. Editora Científica Digital, 2025. p. 22-40.

MOTTIN, Isabelly Cristina; SANTOS, Polyanna Mondadori; GUÉRIOS, Ettiène. A sustentabilidade integrada nas aulas de matemática nos anos iniciais do Ensino Fundamental. **Repositório Digital da Biblioteca da Unisinos (RDBU)**, 2017.

SANTOS, Maria Érica Batista dos. **Implementação dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) no Município de Cubatão**. Dissertação (mestrado). Universidade Católica de Santos. Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Direito Ambiental. São Paulo, 2025. 147 f. Disponível em:< <https://tede.unisantos.br/handle/tede/8096> >. Acesso em: 20 mar. 2026.