

## INTENSIFICAÇÃO AGROPECUÁRIA E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: EVIDÊNCIAS ESPACIAIS PARA O RIO GRANDE DO SUL EM 2023

### AGRICULTURAL INTENSIFICATION AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS: SPATIAL EVIDENCE FOR RIO GRANDE DO SUL IN 2023

RODRIGO OTÁVIO MENDONÇA DA SILVA<sup>1</sup>, JOSE HERALDO FIGUEIREDO DOS SANTOS<sup>2</sup>, GABRIELITO MENEZES<sup>3</sup>, FERNANDA MEDEIROS GONÇALVES<sup>4</sup>, NÁDIA CAMPOS PEREIRA BRUHNN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Mestrando PPGDTSA-UFPEL - rodrigo.gestorambiental@gmail.com*

<sup>2</sup>*Doutorando PPGOM-UFPEL - jose.heraldo18@gmail.com*

<sup>3</sup>*Professor PPGOM/PPGDTSA-UFPEL - gabrielitorm@gmail.com*

<sup>4</sup>*Professora GA- UFPEL - fmgyet@gmail.com*

<sup>5</sup>*Professora PPGDTSA – UFPEL - nadiacbruhn@gmail.com*

#### 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas tornaram-se um dos principais desafios ao desenvolvimento sustentável, afetando a segurança alimentar, os recursos naturais e a estabilidade econômica global (IPCC, 2023; ONU, 2015). O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, tem intensificado eventos climáticos extremos e reduzido a produtividade agrícola (Observatório do Clima, 2024). No Brasil, a agropecuária responde por cerca de 38% das emissões, percentual superior à média global, com destaque para a fermentação entérica, o uso de fertilizantes nitrogenados e a conversão de áreas naturais em sistemas produtivos (Martins et al., 2022). Essa realidade reforça a necessidade de alinhar eficiência produtiva e mitigação ambiental aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial: ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável, ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima e ODS 15 – Vida Terrestre.

No Rio Grande do Sul, estado que reúne 497 municípios, cerca de 10,9 milhões de habitantes e responde por 6% do PIB nacional, a forte base agropecuária demanda uma análise territorializada das emissões (DEE/SPGG, 2024). Fenômenos socioeconômicos no estado apresentam dependência espacial, com formação de aglomerados (clusters), como já identificado em estudos sobre pobreza e desigualdade (Farias; Leivas; Menezes, 2018). Nesse contexto, compreender a distribuição espacial das emissões de GEE e sua relação com a intensificação agrícola constitui um passo essencial para a formulação de políticas públicas mais eficazes.

#### 2. METODOLOGIA

A pesquisa utilizou dados secundários do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e da Produção Agrícola Municipal (PAM/IBGE), ambos de 2023, para analisar os padrões espaciais das emissões de GEE no Rio Grande do Sul. Aplicou-se a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE), com o índice I de Moran global e o indicador local de associação espacial (LISA), visando identificar a autocorrelação espacial das variáveis (Almeida, 2012). Também foi empregado o I de Moran bivariado, a fim de examinar a relação entre área plantada e emissões, abordagem já consolidada em estudos socioeconômicos regionais (Farias; Leivas; Menezes, 2018). As análises foram realizadas nos softwares GeoDa 1.8 e R (R Core Team, 2024), com aplicação de estatística descritiva e testes de diferentes matrizes de contiguidade (Queen, Rook e K-vizinhos), sendo adotadas as especificações com maior significância estatística.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da autocorrelação espacial univariada indicaram que, tanto para as emissões de GEE quanto para a área plantada no Rio Grande do Sul, a matriz de peso espacial mais adequada foi a Queen de ordem 1, com valores de Moran's I de 0,295 e 0,289, respectivamente, ambos estatisticamente significativos. Esse resultado demonstra que as variáveis analisadas apresentam uma autocorrelação espacial moderada, o que evidencia a existência de padrões regionais bem definidos no território gaúcho.

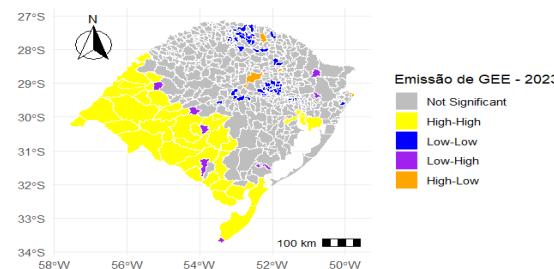
Tabela 1 – Escolha da melhor matriz de peso espacial

Variável	Matriz de peso	Moran's I	P-Valor	Variável	Matriz de peso	Moran's I	P-Valor
Queen 1	0.295	0.00		Queen 1	0.289	0.000	
Queen 2	0.207	0.00		Queen 2	0.227	0.000	
Queen 3	0.123	0.00		Queen 3	0.178	0.000	
Rook 1	0.294	0.00		Rook 1	0.289	0.001	
Rook 2	0.206	0.00		Rook 2	0.229	0.000	
Rook 3	0.123	0.00		Rook 3	0.177	0.000	
K-vizinhos 4	0.270	0.00		K-vizinhos 4	0.288	0.000	
EMISSÃO K-vizinhos 5	0.269	0.00		ÁREA K-vizinhos 5	0.267	0.000	
DE GEE K-vizinhos 6	0.271	0.00		PLANTADA K-vizinhos 6	0.271	0.000	

Fonte: Elaboração própria através de dados da SEEG e da PAM (2025).

A análise do LISA univariado para as emissões de GEE revelou a formação de clusters do tipo High-High, especialmente concentrados no sul e oeste do estado, coincidentes de forma parcial com áreas de maior intensificação agrícola. Além disso, foi identificado um cluster relevante na região metropolitana de Porto Alegre, associado à atividade industrial. Em contrapartida, a Serra Gaúcha e parte do norte do estado apresentaram clusters do tipo Low-Low, caracterizados por baixa intensidade de emissões.

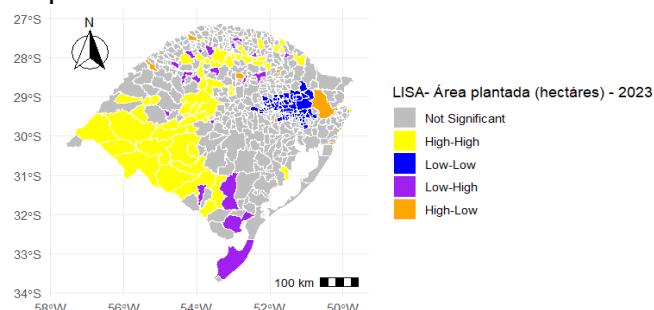
Mapa 1: LISA – Emissão de Gases



Fonte: Elaboração própria através dos dados da SEEG (2025).

Em relação à área plantada, o LISA univariado também identificou clusters High-High em regiões do Pampa Gaúcho, enquanto os clusters Low-Low se concentraram na Serra Gaúcha, onde a produtividade agrícola é limitada por fatores físicos e de uso do solo. Pequenos clusters de alta intensidade agrícola também foram observados no norte do estado, embora de forma menos expressiva.

Mapa 2: LISA – Área plantada.



Fonte: Elaboração própria através de dados da PAM (2025).

A comparação entre os dois LISAs univariados demonstrou coincidência espacial parcial. No sul e sudeste, áreas de maior plantio apresentaram, em parte, associação com emissões elevadas, embora nem toda expansão agrícola tenha resultado em aumento proporcional das emissões. Já no norte e nordeste, os clusters Low-Low em ambas as variáveis confirmaram a predominância de baixa atividade agropecuária e, consequentemente, baixas emissões.

No que se refere ao LISA bivariado, os resultados indicaram um Moran's I global de 0,123, apontando autocorrelação espacial moderada entre emissões de GEE e área plantada. Embora estatisticamente significativo, o viés identificado nas permutações reduziu a robustez da estatística, exigindo análise detalhada das áreas de clusterização.

Tabela 2: Comparação entre os LISAs Univariados – 2023.

Padrão	Área plantada	Emissão de GEE	Interpretação
High-High	Sudeste,noroeste	Sul, Sudoeste	Há coincidência parcial, mas nem toda plantação alta gera alta emissão
Low-Low	Nordeste	Nordeste norte	Confirmam baixa atividade agropecuária e baixa emissão
Outliers	Poucos High-Low e Low-High	Mais Low-High no centro-norte	Emissão pode estar vindo de outras fontes além da agricultura
Zonas não significativas	Grande parte do centro-leste	Centro e norte	Nessas áreas, a variabilidade local é alta ou os dados são mais dispersos.

Fonte: Elaboração própria através dos resultados do LISA Univariado (2025).

A análise espacial revelou clusters High-High em regiões de forte intensificação agrícola, indicando polos produtivos que também se destacam pelas elevadas emissões. Entretanto, foram observadas áreas Low-High, caracterizadas por baixa intensidade agrícola em regiões vizinhas a áreas de alta emissão, sugerindo a influência de outros setores emissores além da agropecuária.

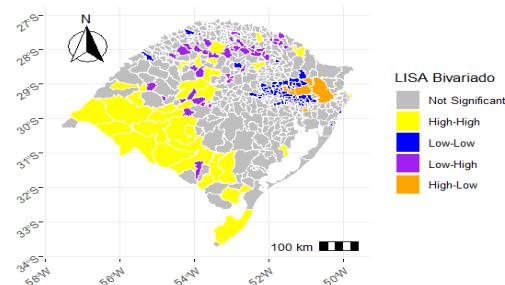
Tabela 3: LISA bivariado – Emissão de GEE x Área Plantada - 2023

Estatística	Valor
Índice Original	0.123
viés	-0,123
Erro Padrão	0.019

Fonte: Elaboração própria através dos dados da SEEG e da PAM (2025).

Por sua vez, clusters High-Low indicaram grandes áreas plantadas com baixas emissões, o que pode sinalizar a adoção de práticas produtivas mais sustentáveis. Já as áreas Low-Low corresponderam a regiões com baixa produção agrícola e menores emissões, enquanto as áreas não significativas apontaram ausência de padrão espacial relevante.

Mapa 4: LISA Bivariado – Emissão de GEE x Área Plantada (2023)



Fonte: Elaboração própria através de dados da SEEG e PAM (2025).

De modo geral, os resultados evidenciam que, embora exista correlação espacial entre a expansão agrícola e as emissões de GEE, a relação não é uniforme em todo o território. Esse padrão reforça a necessidade de políticas públicas diferenciadas, direcionadas a regiões identificadas como hotspots de emissão, estimulando a transição para práticas agropecuárias de menor impacto ambiental.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto da intensificação agropecuária no Rio Grande do Sul, evidenciando que a agricultura, sobretudo nas áreas de soja e arroz, permanece como uma das principais fontes de emissões. A utilização de dados secundários de 2023 permitiu identificar padrões espaciais relevantes, com destaque para regiões classificadas como hotspots de emissão, que demandam maior atenção em termos de políticas públicas.

Os resultados reforçam a necessidade de estratégias de mitigação, como o uso de fertilizantes de liberação controlada e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), capazes de reduzir emissões sem comprometer a produtividade. Além disso, apontam para uma tendência de transição rumo a práticas sustentáveis, incluindo o sequestro de carbono em pastagens e a restauração de ecossistemas naturais, em consonância com a literatura sobre desenvolvimento sustentável.

Em síntese, verificou-se autocorrelação espacial moderada entre área plantada e emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Conclui-se que políticas públicas integradas, baseadas em inovação tecnológica, regulação ambiental e educação, são fundamentais para conciliar a expansão da produção agropecuária com a preservação ambiental.

#### 5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Eduardo. Econometria espacial. Campinas: Alínea, 2012.

COSTANTINI, V.; MONNI, S. Environmental Kuznets Curve and Economic Growth: A Study of the Brazilian Agricultural Sector. *Ecological Economics*, v. 32, n. 2, p. 145-159, 2008.

DEE; SPGG – Departamento de Economia e Estatística; Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Perfil socioeconômico do Rio Grande do Sul 2024. Porto Alegre: Governo do Estado do RS, 2024.

DE FARIA, Hellen Nunes; LEIVAS, Pedro Henrique; MENEZES, Gabrielito. Análise espacial da pobreza nos municípios gaúchos. *Revista Estudo & Debate*, v. 25, n. 2, 2018.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>