

PADRÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DAS EMISSÕES DE CARBONO: UM ESTUDO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

RODRIGO OTÁVIO MENDONÇA DA SILVA¹; JAMMILI VITÓRIA EBEL TESSMANN²;
FERNANDA MEDEIROS GONÇALVES³;
GABRIELITO MENEZES⁴; NÁDIA CAMPOS PEREIRA BRUHN⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – rodrigo.gestorambiental1@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – jammiliteessmann@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – fmgvet@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – gabrielitorm@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – nadiacbruhn@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as mudanças climáticas e suas consequências globais têm impulsionado a busca por soluções para mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). A intensificação dos impactos climáticos impõe desafios significativos às nações na transição para práticas de desenvolvimento sustentável (SHUKLA et al., 2023). Reconhecendo essa urgência, a ONU designou 2021-2030 como a "Década da Restauração", visando promover a restauração florestal e mitigar o desmatamento para reduzir as emissões de GEE, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o 15 (Vida Terrestre). Isso é crucial para países como o Brasil, onde as emissões provêm majoritariamente de Mudanças no Uso e Cobertura da Terra (LULCC) (POTENZA et al., 2023), sendo o sexto maior emissor de CO₂ globalmente (FRIEDLINGSTEIN et al., 2023; RITCHIE; ROSER, 2020).

Nesse contexto, um desafio central para o Rio Grande do Sul é conciliar o desenvolvimento econômico com a redução das emissões de GEE. Dada a dependência em atividades como agropecuária intensiva e indústria, torna-se necessária a implementação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade e à transição para uma economia de baixo carbono.

Situado no extremo sul do Brasil, o Rio Grande do Sul é composto por 497 municípios e possui uma área de 281.707,15 km². Em 2022, contava com 10.882.965 habitantes, sendo o sexto estado mais populoso do país. Sua economia contribuiu com 6% do PIB nacional em 2022, posicionando-o como a quinta maior unidade federativa, com um PIB per capita de aproximadamente R\$ 51 mil/ano (DEE/SPGG, 2024). Estratégias regionais são necessárias para equilibrar o desenvolvimento sustentável e a redução das emissões, focando no potencial das energias renováveis e na melhoria das práticas agrícolas e industriais.

Este estudo tem como objetivo realizar uma análise espacial e temporal da distribuição das emissões de Gases de Efeito Estufa no Rio Grande do Sul entre 2013 e 2022, buscando identificar mudanças nos padrões de aglomeração espacial entre os municípios ao longo do período analisado.

2. METODOLOGIA

Este estudo examina as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Rio Grande do Sul, de 2013 a 2022. Os dados foram obtidos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de GEE (SEEG) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As análises foram realizadas com o software GeoDa 1.8, utilizando o Índice de Moran Global e Local e o LISA (Indicador Local de Associação Espacial). O Índice de Moran Global avalia a autocorrelação espacial entre os municípios,

enquanto o LISA detalha essa correlação em nível local, classificando os municípios em quatro categorias: Alto-Alto, Alto-Baixo, Baixo-Alto e Baixo-Baixo. Essas técnicas permitiram identificar com precisão clusters de emissões de GEE, apontando regiões com maior concentração ou dispersão de emissões, fornecendo subsídios para políticas públicas regionais mais eficazes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos mapas LISA evidenciou mudanças nos padrões espaciais das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) entre os municípios do Rio Grande do Sul ao longo do período analisado. Em 2013, os clusters mais significativos ($p = 0,001$) concentravam-se predominantemente na região centro-oeste do estado, indicando uma forte associação espacial naquela área. As regiões ao norte e leste apresentaram áreas de menor significância estatística, com alguns clusters identificados, porém de menor intensidade. O resultado da análise sugere que, nesse período, os municípios da região centro-oeste compartilhavam características mais homogêneas em termos de emissões de GEE, resultando em uma concentração espacial de alta relevância. A mudança mais notável no uso da terra nos últimos anos foi a expansão de terras agrícolas (principalmente soja no verão/pastagens e culturas de cobertura no inverno) e silvicultura (principalmente Eucalyptus sp), ambas as quais já ocupam mais de 45% do bioma Pampa brasileiro (MACHADO, JM et al., 2023).

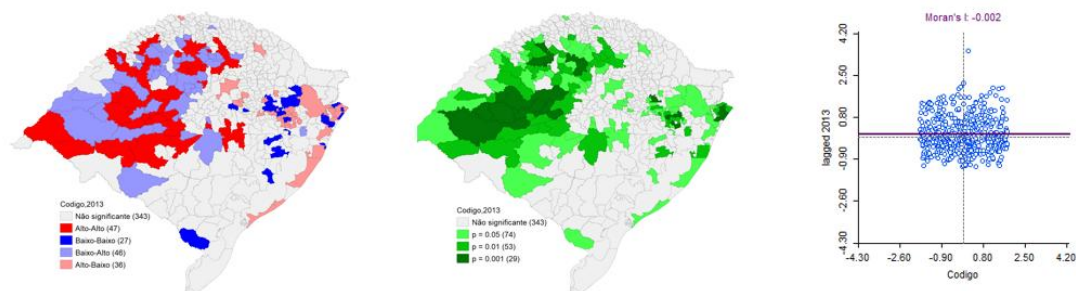


Figura 1 - mapas com os resultados para 2013

Em 2016, observou-se uma leve expansão dos clusters de alta significância na região central do estado. Embora as áreas de alta correlação tenham se ampliado, especialmente na região central, as áreas sem significância estatística (*representadas em branco*) permaneceram praticamente inalteradas. Isso sugere que, enquanto algumas regiões reforçaram suas associações espaciais em termos de emissões de GEE, outras continuaram sem padrões espaciais significativos, mantendo a dispersão observada nos anos anteriores.

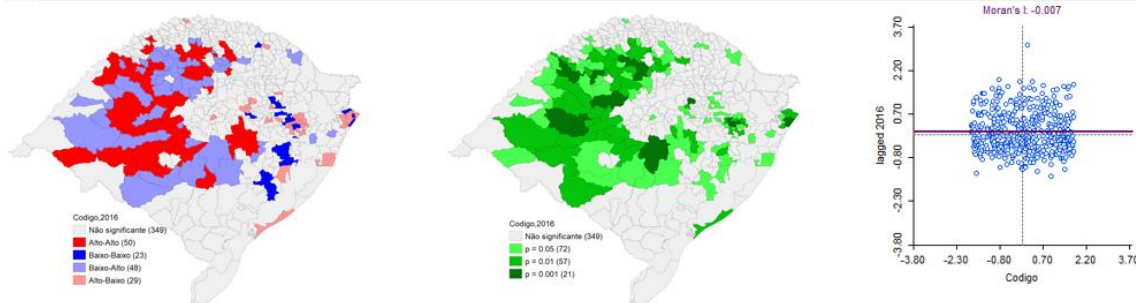


Figura 2 - mapas com os resultados para 2016

Em 2019, observou-se uma leve dispersão dos cluster de alta significância, ocorreu uma expansão para o norte do estado. Além disso, houve uma redução nas áreas sem significância estatística, sugerindo uma transformação dos padrões espaciais, com um número maior de regiões exibindo homogeneidade em termos de emissões de GEE. O desmatamento para expansão de pastagens e agricultura, o

desenvolvimento de infraestrutura, cidades e incentivos políticos e financeiros para ocupação de terras são os principais motores das mudanças de LULC nos biomas brasileiros, afetando a biodiversidade, os recursos hídricos, as emissões de carbono, o clima regional e local. (SOUZA JR et. al).

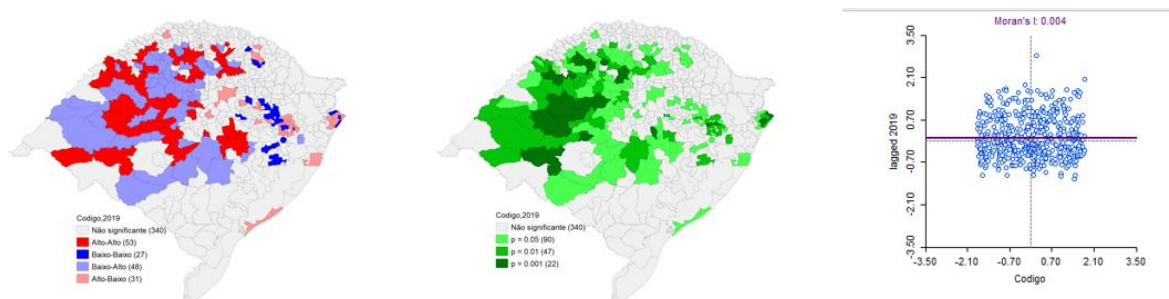


Figura 3 - mapas com os resultados para 2019

Em 2022, a tendência de aumento da correlação espacial continuou, com uma maior distribuição dos clusters significativos. Isso indica um fortalecimento das associações espaciais entre os municípios, especialmente na região centro-norte do estado, consolidando um padrão de maior homogeneidade regional em termos de emissões de GEE.

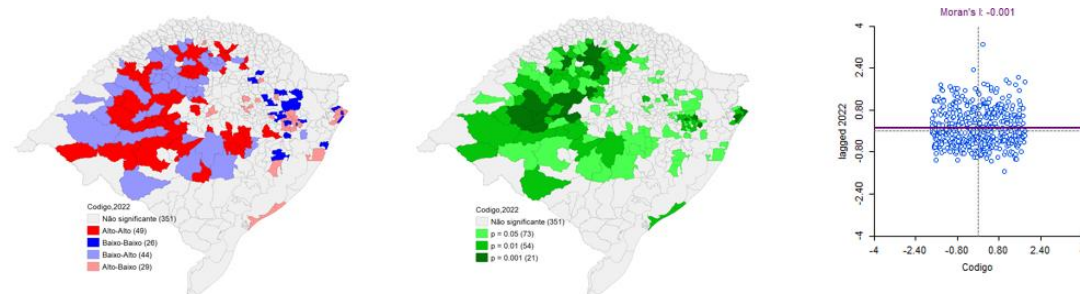


Figura 4 - mapas com os resultados para 2022

Além da agropecuária, o setor energético também contribui significativamente para as emissões de GEE no estado. A cidade de Candiota, por exemplo, abriga um complexo termelétrico que utiliza carvão mineral, responsável por uma parcela substancial das emissões estaduais nesse setor (DEE/SPGG, 2024). Por outro lado, O Rio Grande do Sul, com sua forte dependência da agropecuária, contribuiu significativamente para essa elevação, especialmente através da produção de gado e arroz (POTENZA et al., 2023).

4. CONCLUSÕES

O Rio Grande do Sul, um dos maiores produtores agrícolas do Brasil, enfrenta impactos significativos das mudanças climáticas, como estiagens prolongadas e enchentes repentinas, que dificultam o planejamento rural (OLIVEIRA et al., 2021). A análise das emissões de CO₂ entre 2013 e 2022 mostrou mudanças nos padrões de aglomeração espacial dos Gases de Efeito Estufa (GEE) entre os municípios. Observou-se um aumento na correlação espacial, especialmente nas áreas centrais e ao norte do estado. Enquanto em 2013 os clusters de alta significância estavam concentrados na região centro-oeste, ao longo dos anos esses clusters se expandiram, resultando, em 2022, em uma distribuição mais ampla e homogênea das emissões entre os municípios. Entre 2000 e 2018, o Sul do Brasil apresentou um aumento

expressivo nas emissões totais de GEE, passando de 191 milhões para 231 milhões de toneladas de CO₂ equivalentes. No caso do Rio Grande do Sul, que responde por 50% das emissões de GEE provenientes da agropecuária na região Sul, houve uma contribuição especial para essa elevação, especialmente através da produção de gado de corte e leite e do cultivo de arroz, que representam fontes importantes de metano e outros gases de efeito estufa (POTENZA et al. 2023).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OLIVEIRA, T.; SILVA, R.; ALMEIDA, G. **Análise de risco climático no setor agroindustrial: uma revisão teórica.** *Journal of Climate Risk*, v. 12, n. 4, p. 210-225, 2020.

POTENZA, A. et al. **Restoration and Carbon Sequestration Potential in Brazil's Forests.** *Global Ecology and Biogeography*, v. 32, p. 1344-1356, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111>. Acesso em: 05 ago. 2024.

SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; REISINGER, A.; SLADE, R. **Mitigação das Mudanças Climáticas em 2022 das Mudanças Climáticas.** Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, 2023.

DEE/SPGG – Departamento de Economia e Estatística – RS. **Painel do Agronegócio.** Disponível em: <https://dee.rs.gov.br/painel-agro>. Acesso em: 04 ago. 2024.

SEEG, Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Emissões Totais 2024.** Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/emissao_total. Acesso em: 11 set. 2024.

SPGG - Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul. **Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul (2024).** Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/caracteristicas-gerais>. Acesso em: 07 ago. 2024.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre et al. **Global Carbon Budget 2023.** *Earth Syst. Sci. Data*, v. 15, p. 5301–5369, 2023. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>. Acesso em: 14 set. 2024.

IPCC. 2023. **Resumo para formuladores de políticas. Mudanças Climáticas 2023: Relatório Síntese.** Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra: IPCC, 2023. p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Máx. **Emissões de CO₂. Quanto CO₂ o mundo emite? Quais países emitem mais? Nosso mundo em dados, jan. 2024.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>. Acesso em: 11 ago. 2024.

MACHADO, JM et al. **Estoques de carbono do solo afetados por mudanças no uso da terra no Pampa do sul do Brasil.** <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230124>

SOUZA JR et. al, **reconstruindo três décadas de mudanças no uso e cobertura da terra em biomas brasileiros com arquivo Landsat e Earth Engine.** *Sensoriamento Remoto*, v. 12, n. 2735, p. 1-27, 2020. doi: 10.3390/rs12172735. Acesso em: 09 ago. 2024.