

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PADRÕES E EVOLUÇÃO DOS SERVIÇOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA REGIÃO SUL DO BRASIL: UMA ANÁLISE DE CLUSTERS COM DADOS DO SNIS (2012-2022)

Rafaela Radaelli Righi¹; Joice Cristini Kuritza Denck Gonçalves²

& Gabriela Teixeira Sucupira³

Abstract: The universalization of sanitation services, established as a priority by Brazil's New Legal Framework for Sanitation (Law No. 14.026/2020), remains a critical challenge to regional development and public health. This study analyzes the evolution of sewage services in municipalities across Brazil's Southern Region from 2012 to 2022, focusing on collection (IN015) and treatment (IN016) indicators from the National Sanitation Information System (SNIS). The methodology combined hierarchical cluster analysis (Ward's method) with geospatial mapping to identify regional patterns and inequalities. The results revealed distinct municipal groupings that evolved over the period. In 2012, two clusters emerged: one characterized by efficient treatment despite variable collection rates, and another with low performance in both services. By 2022, improved data availability permitted the identification of three more nuanced clusters: a consolidated group with high collection and treatment rates, municipalities with moderate collection but negligible treatment, and areas with low collection yet high treatment rates. Spatially, the high-performing municipalities were concentrated in the state of Paraná. Although the methodology effectively mapped regional disparities, the reliability of diagnostic and prognostic assessments was limited by poor data quality and availability, especially in smaller municipalities. The study underscores the urgent need to enhance data quality, standardization, and transparency to enable consistent analyses of sanitation universalization efforts.

Resumo: A universalização do esgotamento sanitário, uma meta prioritária estabelecida pelo Novo Marco Legal (Lei nº 14.026/2020), continua posto como um dos principais desafios para desenvolvimento regional e para a saúde pública no Brasil. Este trabalho teve como objetivo analisar a evolução dos serviços de esgotamento, com foco nos indicadores de coleta (IN015) e tratamento de esgoto (IN016), nos municípios da Região Sul entre 2012 e 2022, utilizando dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A metodologia combinou a análise de clusterização hierárquica (método de Ward) com geoprocessamento para identificar padrões e desigualdades regionais. Os resultados apontaram a formação de grupos distintos de municípios para os anos avaliados. A análise de 2012 revelou dois clusters, um com tratamento eficiente, apesar da coleta variável, e outro com baixos índices em ambos os serviços. Já em 2022, a maior disponibilidade de dados

¹⁾ Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: rafaelaradaellirighi@gmail.com

²⁾ Professora, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: joicekuritza@ufpr.br

³⁾ Estudante de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: gabrielsucupira@gmail.com

permitiu identificar três clusters com maior complexidade: um grupo consolidado (alta coleta e tratamento), um com coleta moderada e tratamento quase nulo, e outro com baixa coleta, mas alto tratamento. Espacialmente, os municípios com melhor desempenho concentram-se no Paraná. Conclui-se que a abordagem foi eficaz para mapear as disparidades, mas a baixa qualidade e a ausência de dados, sobretudo em municípios de pequeno porte, limitam a confiabilidade tanto de diagnósticos como de possíveis prognósticos, reforçando a necessidade de fortalecer a coleta, a padronização e a transparência das informações para viabilizar análises consistentes sobre a universalização dos serviços.

Palavras-Chave: Esgotamento Sanitário; Clusterização Hierárquica; Análise Espacial.

INTRODUÇÃO

No Brasil, o acesso ao saneamento básico é um direito social garantido pela Constituição Federal de 1988 (Art. 6º), essencial para a qualidade de vida e saúde pública. A Lei nº 11.445/2007 representou um marco na organização do setor ao estabelecer as diretrizes nacionais para o saneamento básico, definindo seus quatro componentes: abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana. Esta legislação introduziu conceitos fundamentais como a regulação por agências específicas e a possibilidade de gestão associada entre municípios (BRASIL, 2007).

O Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), por sua vez, trouxe avanços significativos ao estabelecer metas vinculantes: até 2033, 99% da população deve ter acesso à água potável e 90% à coleta e tratamento de esgoto. A legislação priorizou a regionalização como estratégia para viabilizar economicamente os serviços, especialmente em municípios menores. Contudo, segundo Rodrigues *et al.* (2019), a agregação de localidades com baixa cobertura e limitada capacidade financeira - frequentemente vizinhas devido à dependência espacial dos indicadores - pode comprometer o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos, criando desafios adicionais para a universalização.

Entre os componentes do saneamento básico, o esgotamento sanitário permanece como um desafio prioritário, especialmente para a promoção da saúde pública. Enquanto o abastecimento de água atende 83% da população brasileira, apenas 59% têm acesso à coleta de esgoto e, desse volume, somente 79% recebe tratamento adequado (SINISA, 2024). Essa lacuna pode ocasionar impactos diretos na saúde pública e no meio ambiente, com contaminação de corpos hídricos e proliferação de doenças de veiculação hídrica (SOARES, *et al.*, 2002).

Na Região Sul, os dados revelam contrastes marcantes na cobertura de coleta e tratamento do esgoto. Enquanto o Paraná apresenta 68% de coleta e 65% de tratamento, melhor resultado da região, o Rio Grande do Sul exibe os piores indicadores, 43% e 38%, respectivamente, conforme dados do SNIS (2022). Essas diferenças refletem não apenas desigualdades econômicas, mas também variações na implementação das políticas de regionalização.

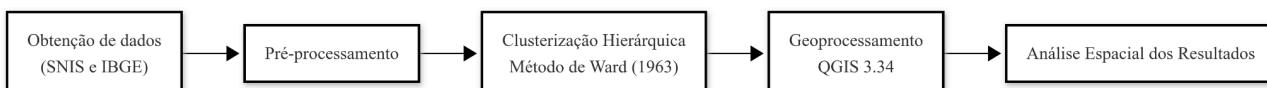
Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a evolução temporal dos serviços de esgotamento sanitário nos municípios da Região Sul entre 2012 e 2022, com foco em dois indicadores: cobertura de coleta (IN015) e do tratamento de esgoto (IN016),

utilizando dados do SNIS. A metodologia combinou análise de clusters pelo método de Ward, implementado em Python, com geoprocessamento no QGIS, permitindo identificar padrões espaciais e temporais na prestação desses serviços ao longo da década estudada.

MÉTODOS

A metodologia para a elaboração do presente trabalho é apresentada de forma esquemática no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma das etapas metodológicas da análise.



Bases de dados

Os dados municipais foram obtidos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), último ano completo disponível antes da transição para o novo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), que está em fase de implantação desde 2024, conforme o Novo Marco Legal (Lei nº 14.026/2020). Foram analisados dois indicadores operacionais de esgoto: IN015: Índice de coleta de esgoto e IN016 - Índice de tratamento de esgoto, no intuito de avaliar o atendimento deste serviço nos municípios da região Sul do Brasil.

Os shapefiles municipais e os dados de população foram adquiridos no portal do IBGE (2022), utilizando a malha territorial mais recente para a Região Sul. A seleção dos anos 2012 e 2022 permitiu comparar a evolução dos serviços em períodos que antecedem e sucedem a implementação do Novo Marco Legal do Saneamento. O pré-processamento dos dados incluiu o tratamento de valores ausentes (*missing data*) mediante exclusão, garantindo a integridade do conjunto de dados para análise.

Clusterização Hierárquica e Geoprocessamento

A clusterização foi realizada por meio do método hierárquico aglomerativo de Ward (Ward, 1963), implementado em Python 3.10 com a biblioteca *scikit-learn* (Pedregosa *et al.*, 2011), utilizando a função *AgglomerativeClustering*, que se vale internamente da implementação otimizada da hierarquia de clusters disponível no módulo *scipy.cluster.hierarchy* (Virtanen *et al.*, 2020). O método minimiza a variância intra-clusters através da soma dos quadrados dos erros (ESS), calculada pela equação 1.

$$ESS = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} (x - \mu_i)^2 \quad (1)$$

Onde:

- C_i : Cluster i ;
- μ_i : centróide do cluster i (média aritmética);
- k = número total de clusters;

Para a média de cada cluster (equação 2):

$$\mu_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in C_i} x \quad (2)$$

Na qual n_i = número de municípios no cluster i .

Por fim, para o desvio padrão intra-cluster, utiliza-se a equação 3:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{x \in C_i} (x - \mu_i)^2} \quad (3)$$

Os resultados foram espacializados no software *QGIS 3.34*, a partir da elaboração de mapas temáticos que classificaram os municípios de acordo com os clusters formados, com base no desempenho observado nos indicadores analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

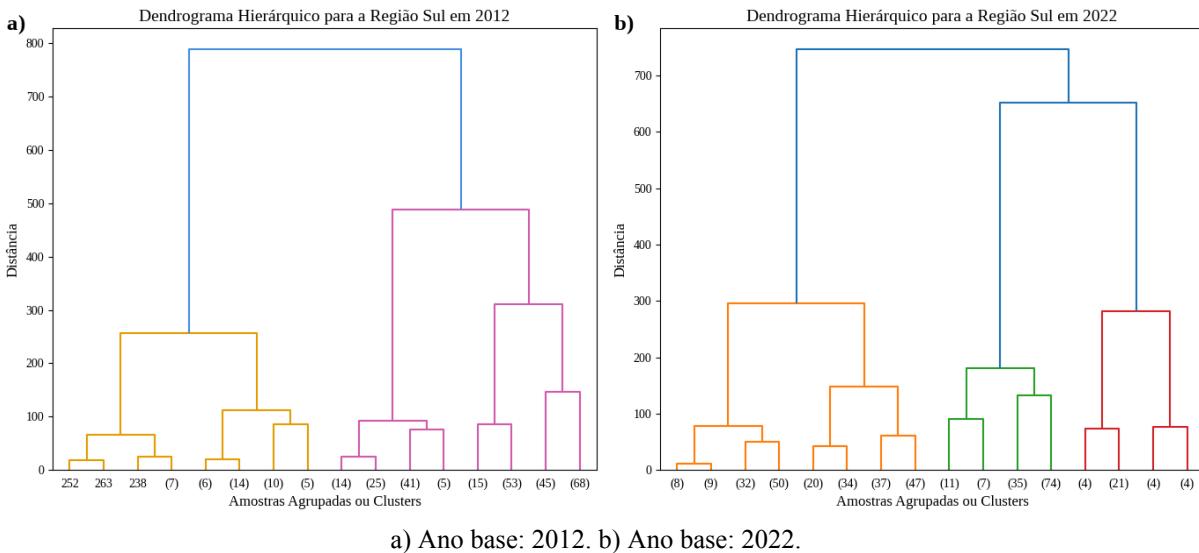
Em 2012, a região Sul do Brasil contava com 1.188 municípios, sendo 399 no Paraná, 293 em Santa Catarina e 496 no Rio Grande do Sul. Após a limpeza dos dados, considerando apenas os municípios com informações válidas sobre os indicadores de coleta e tratamento de esgoto, restaram 190 municípios do Paraná (47,6% do total do estado), 42 de Santa Catarina (14,3%) e 79 do Rio Grande do Sul (15,9%). Para o ano base de 2012, 311 municípios foram analisados, o que corresponde a 26,2% dos municípios da região Sul.

Em 2022, o número de municípios analisados atingiu 397 (33,3% dos 1.191 municípios da região), sendo 233 do Paraná, 72 de Santa Catarina e 92 do Rio Grande do Sul, aplicando-se o mesmo critério de filtragem.

Os dendrogramas apresentados nas Figuras 2a (2012) e 2b (2022) ilustram a formação de clusters hierárquicos com base nos indicadores de coleta (IN015) e tratamento de esgoto (IN016) nos municípios da Região Sul. A altura das uniões nos dendrogramas representa a dissimilaridade entre os agrupamentos. Em função das diferenças de tamanho amostral, disponibilidade e distribuição dos dados entre os anos, o número ótimo de agrupamentos divergiu, resultando em dois clusters para 2012 e três para 2022.

Os dendrogramas de 2012 (Figura 2a) revelaram dois clusters distintos (Tabela 1): o Cluster 1 agrupou municípios com alta variabilidade na coleta de esgoto (média de 43,62%, desvio padrão de 26,95%), mas tratamento quase universal (99,15%, desvio padrão de 4,59%), indicando que, onde a infraestrutura existia, o tratamento era realizado. O Cluster 2 reuniu municípios com baixos índices de coleta e tratamento (médias de 28,97% e 10,55%, respectivamente) e alta dispersão (desvio padrão de 28,69% para coleta), refletindo desafios estruturais e heterogeneidade dentro do grupo.

Figura 2 – Dendrogramas hierárquicos para a Região Sul em 2012.



a) Ano base: 2012. b) Ano base: 2022.

Em 2022 (Figura 2b), a análise identificou três clusters (Tabela 1), evidenciando avanços e novas complexidades. O Cluster 1 destacou-se com altos índices de coleta (69,84%) e tratamento (99,73%) e baixa variabilidade (desvio padrão de 16,38% e 1,84%, respectivamente), representando municípios consolidados na prestação do serviço de esgotamento sanitário. O Cluster 2 apresentou coleta moderada (29,02%) mas tratamento quase inexistente (5,68%). Já o Cluster 3, caracterizou-se pela baixa coleta (18,97%) mas alto tratamento (95,12%). A maior disponibilidade de dados na amostragem de 2022 contribuiu para uma representação mais detalhada e expressiva dos diferentes padrões de comportamento entre os municípios.

Tabela 1 - Médias e Desvios Padrões por Cluster.

Ano Base	Indicadores	Cluster	1	2	3
2012	IN015 - Índice de coleta de esgoto (%)	Média	43,62	28,97	-
		Desvio Padrão	26,95	28,69	-
	IN016 - Índice de tratamento de esgoto (%)	Média	99,15	10,55	-
		Desvio Padrão	4,59	16,72	-
2022	IN015 - Índice de coleta de esgoto (%)	Média	69,84	29,02	18,97
		Desvio Padrão	16,38	36,15	11,86
	IN016 - Índice de tratamento de esgoto (%)	Média	99,73	5,68	95,12
		Desvio Padrão	1,84	12,59	12,56

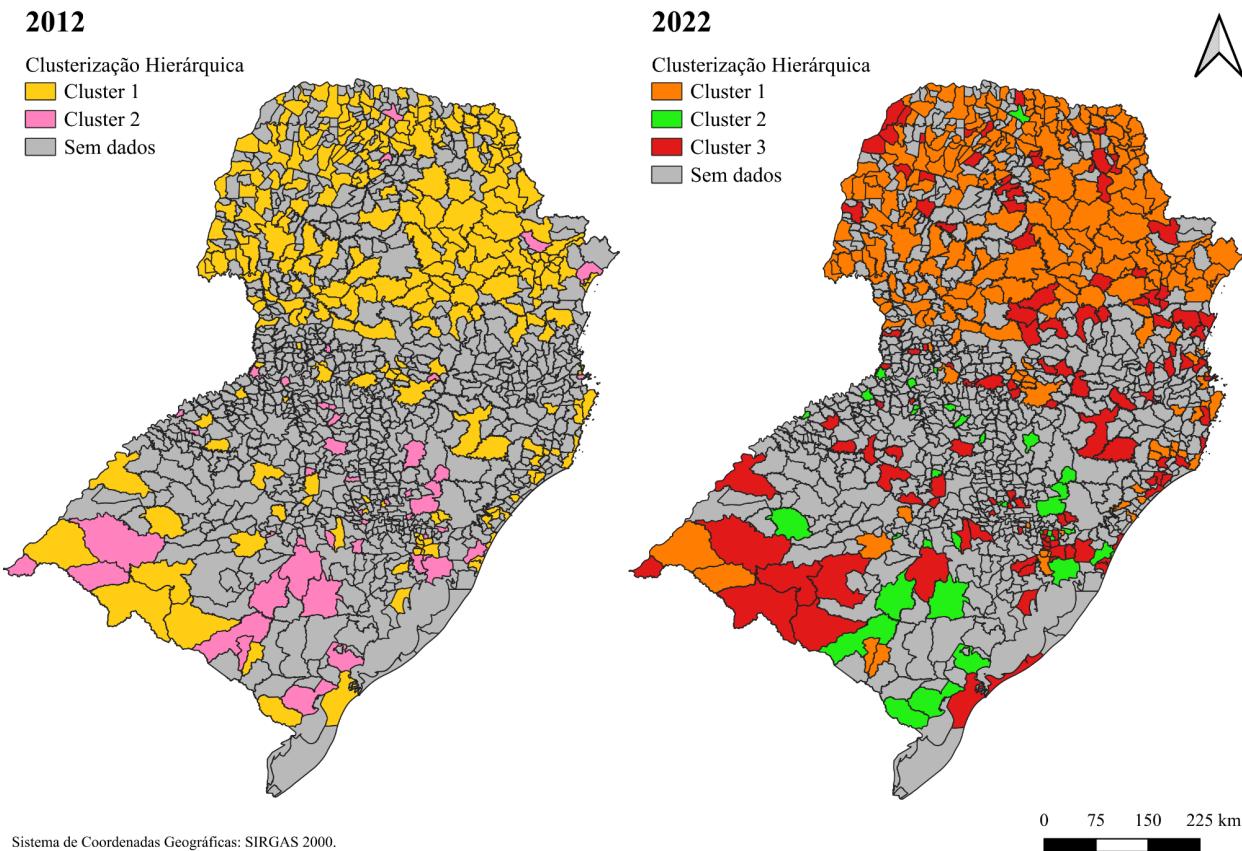
A distribuição geográfica dos clusters em 2012 e 2022 (Figura 3) evidencia disparidades regionais. Em ambos os anos, os municípios do Cluster 1 (alto desempenho em coleta e tratamento) concentraram-se predominantemente no norte e leste do Paraná, regiões economicamente dinâmicas e com maior infraestrutura histórica de saneamento. Já os Clusters 2 e 3 mostraram padrões distintos: em 2012, o Cluster 2 (baixos índices)

dispersou-se pelo interior do Rio Grande do Sul e oeste catarinense, enquanto em 2022, o surgimento do Cluster 3 (baixa coleta mas alto tratamento) destacou municípios próximos às capitais Porto Alegre e Florianópolis.

Destaca-se a elevada proporção de municípios sem dados válidos (áreas em cinza no mapa), especialmente no Rio Grande do Sul (45% em 2022) e em regiões afastadas dos centros urbanos. Essa lacuna limita a análise de áreas críticas, reforçando a necessidade de políticas de incentivo para ampliar a adesão ao SINISA, especialmente em municípios de pequeno porte.

A espacialização combinada à clusterização permitiu identificar padrões territoriais nos serviços de saneamento, contribuindo para compreender quais grupos de municípios demandam maior atenção em aspectos específicos, como coleta ou tratamento. A análise sugere que a maior disponibilidade de dados pode favorecer segmentações mais representativas da realidade regional.

Figura 3 - Evolução espacial dos agrupamentos (clusters) de municípios da Região Sul baseada nos indicadores de saneamento (2012-2022).



Entre 2012 e 2022, observou-se avanço na proporção de municípios da Região Sul do Brasil com dados válidos sobre coleta e tratamento de esgoto, aumentando de 26,2% (311 de 1.188) para 33,3% (397 de 1.191). A evolução foi desigual entre os estados: o Paraná apresentou o maior incremento, passando de 47,6% para 58,4%; Santa Catarina cresceu de 14,3% para 24,4%; e o Rio Grande do Sul manteve cobertura inferior, crescendo de 15,9% para 18,5%.

Apesar da melhora, 797 municípios (67% do total regional) não apresentaram dados válidos em 2022, dos quais 719 (90%) são de pequeno porte, com menos de 20 mil habitantes. Esses municípios concentraram a maior parte da subnotificação ao longo do período, evidenciando o desafio persistente de universalização do saneamento em localidades pequenas, que tradicionalmente enfrentam maiores dificuldades na estruturação dos serviços.

Em termos populacionais, a ausência de dados em 2012 atingia 74% dos municípios, representando 34% da população regional; em 2022, esse percentual caiu para 67% dos municípios e 26% da população. Isso indica que, embora a cobertura populacional com informações válidas tenha aumentado, a falta de dados permanece concentrada nos municípios de menor porte, agravando o viés amostral e limitando análises e planejamento.

Outro aspecto crítico observado nesta pesquisa é a descontinuidade dos dados, pois enquanto 157 municípios passaram a reportar informações em 2022, 71 deixaram de fazê-lo em relação a 2012, comprometendo a consistência da série histórica e dificultando comparações temporais.

A regionalização, prevista pelo Novo Marco Legal do Saneamento, surge como uma possível solução para superar os desafios históricos do setor, especialmente a assimetria entre municípios e as dificuldades na universalização dos serviços. Ao formar blocos regionais, espera-se otimizar recursos, garantir maior eficiência e ampliar a cobertura dos sistemas de esgotamento sanitário.

No entanto, a análise evidencia que o principal desafio permanece na obtenção de dados confiáveis, sobretudo em municípios menores, que são justamente os que apresentam menor cobertura de serviços de esgoto. Essa limitação dificulta a formulação de diagnósticos precisos e compromete a viabilidade dos arranjos regionais.

Além disso, a irregularidade na autodeclaração de informações impacta diretamente a confiabilidade dos dados disponíveis, restringindo a capacidade de monitoramento e planejamento eficazes. Portanto, para que a regionalização possa cumprir seu papel de mecanismo estruturante, é imprescindível fortalecer a adesão sistemática e qualificada à autodeclaração, garantindo diagnósticos mais precisos e suporte para análises e investigações fundamentadas em dados oficiais sobre o avanço do saneamento.

CONCLUSÃO

A clusterização hierárquica demonstrou eficácia na identificação de padrões e desigualdades na prestação dos serviços de esgotamento sanitário na Região Sul, contribuindo para uma análise regional alinhada ao Novo Marco Legal do Saneamento. Entretanto, a limitada disponibilidade e a baixa qualidade dos dados, sobretudo em municípios de menor porte, comprometem a robustez e a confiabilidade dos resultados. A

autodeclaração, apesar de ser uma ferramenta fundamental, apresenta deficiências significativas quanto à padronização e à verificação das informações prestadas.

Dessa forma, para que o avanço no setor possa ser efetivamente quantificado e qualificado, é imprescindível o aprimoramento da coleta, padronização e transparência dos dados, bem como o engajamento sistemático dos municípios aos sistemas de informação, condição essencial para análises consistentes e planejamento efetivo no saneamento básico. Nesse contexto, torna-se imprescindível a adesão ampla e sistemática dos municípios ao SINISA, sistema que, em tese, reunirá informações integradas de todos os eixos do saneamento básico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), pelo apoio institucional que tornou possível a participação neste evento.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 2 maio 2025.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. *Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 3 maio 2025.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. *Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445, de 2007*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 4 maio 2025.

HEINZ, D.; MORENO, G. C. L.; HEIN, N. O saneamento básico nos municípios de Santa Catarina: uma análise cluster. *Revista do Desenvolvimento Regional*, v. 18, n. 1, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26767/1888>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 05 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Malhas Territoriais*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais>. Acesso em: 06 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/>. Acesso em: 07 maio 2025.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, v. 12, p. 2825-2830, 2011. Disponível em: <https://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>. Acesso em: 12 maio 2025.

PINTANEL, S. R.; CECCONELLO, S. T.; CENTENO, L. N. Análise da correlação entre os indicadores de saneamento básico e as doenças de veiculação hídrica em municípios do sul do Rio Grande do Sul. *Revista Ambientale*, v. 13, n. 2, p. 41-52, 2021. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/view/292>. Acesso em: 10 maio 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*: versão 3.34. Open Source Geospatial Foundation, 2023. Disponível em: <https://qgis.org/>. Acesso em: 08 maio 2025.

RODRIGUES, K. C. T. T.; VENSON, A. H.; CAMARA, M. R. G. Distribuição espacial do acesso aos serviços de saneamento básico nas microrregiões brasileiras de 2006 a 2013. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 15, n. 1, p. 137-151, 2019. Disponível em: <https://www.rbgdr.com.br/revista/index.php/rbgdr/article/view/4325>. Acesso em: 11 maio 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO (SINISA). Painel de Indicadores 2024. 2025. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/>. Acesso em: 7 jun. 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Série Histórica de Indicadores. 2023. Disponível em: <https://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/#>. Acesso em: 09 maio 2025.

SOARES, S. R. A.; BERNARDES, R. S.; CORDEIRO NETTO, O. de M. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 18, n. 6, p. 1713-1724, nov. 2002.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, v. 17, p. 261-272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2. Acesso em: 13 maio 2025.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963. DOI: 10.1080/01621459.1963.10500845.