

# ANÁLISE EXPLORATÓRIA E COMPARATIVA DE SÉRIES TEMPORAIS DE NÍVEL DE ÁGUA EM POÇOS DA BACIA DO RIO SANTA MARIA, RIO GRANDE DO SUL

INGRID DE OLIVEIRA CAVALCANTE LIMA<sup>1</sup>; DANIEL GUNNAR FLORES SANHUDO<sup>2</sup>; JULIANA PERTILLE DA SILVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [ingrid.limaoc@gmail.com](mailto:ingrid.limaoc@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – [danielgfsan@gmail.com](mailto:danielgfsan@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas – [juliana.pertill@gmail.com](mailto:juliana.pertill@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

A Bacia do Rio Uruguai representa um dos principais sistemas hídricos do sul do Brasil, fundamental para o abastecimento, agricultura e geração de energia. Dentro dela, a sub-bacia do Rio Santa Maria é crítica para a gestão de águas subterrâneas, demandando monitoramento constante devido às pressões antrópicas e às variações climáticas (FOSTER; HIRATA, 1988).

A análise integrada de múltiplos poços de monitoramento permite compreender o comportamento do aquífero de forma espaço-temporal, fornecendo subsídios para o uso sustentável do recurso. A literatura aponta que a compreensão da dinâmica de águas subterrâneas exige abordagens que capturem simultaneamente variabilidade temporal e espacial (ALLEN et al., 2018).

Este estudo tem como objetivo caracterizar o comportamento temporal e espacial do nível d'água subterrânea na Bacia do Rio Santa Maria, identificando tendências de longo prazo e padrões de sazonalidade nos poços monitorados.

A área de estudo inclui sistemas aquíferos, com destaque para o Aquífero Guarani, especialmente na Formação Pirambóia, composta por arenitos granulares e argilosos de origem eólica úmida (Matzembacher, 2011; Gesicki, 2007).

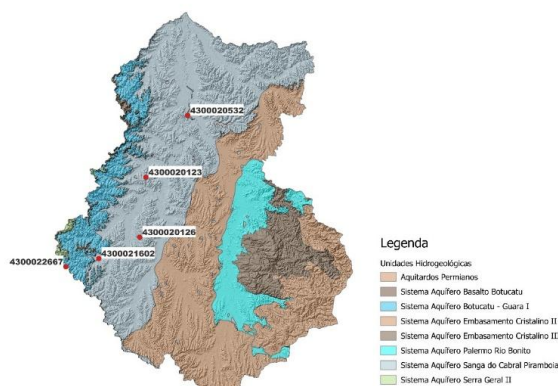
## 2. METODOLOGIA

Foram analisados dados de nível de água subterrânea de cinco poços da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (CPRM, 2025). A Tabela 1 apresenta as principais características e a Figura 1 a localização espacial.

Tabela 1. Características dos pontos de monitoramento e variáveis analisadas

Nº Poço RIMAS	Ponto	Cota do Terreno (m):	Localidade:	UTM (N/S):	UTM (L/O):
4300020123	P1	193,23	ESTÂNCIA SANTA RITA	6622822	679839
4300020126	P2	186,77	ASSENTAMENTO TORRÃO	6594371	676384
4300020532	P3	105,5	ETA CENTRO ROSÁRIO DO SUL	6651981	700378
4300021602	P4	0	CAMPO DE COOPERAÇÃO	6584537	656667
4300022667	P5	222	PARQUE DA HIDRÁULICA – DAE	6580821	640928

Figura 1 – Localização dos poços de monitoramento na Bacia do Rio Santa Maria/RS, em diferentes unidades hidrogeológicas.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A análise estatística incluiu:

1. **Pré-processamento:** organização em DataFrames, ajuste de calendário contínuo, detecção de lacunas e imputação com MICE (Azur et al., 2011).
2. **Testes de estacionariedade e tendência:** ADF, Mann-Kendall e decomposição temporal.
3. **Autocorrelações (ACF e PACF)** e comparações espaciais entre poços.

A aplicação foi feita de forma individual por poço, mas posteriormente integrada em análise comparativa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

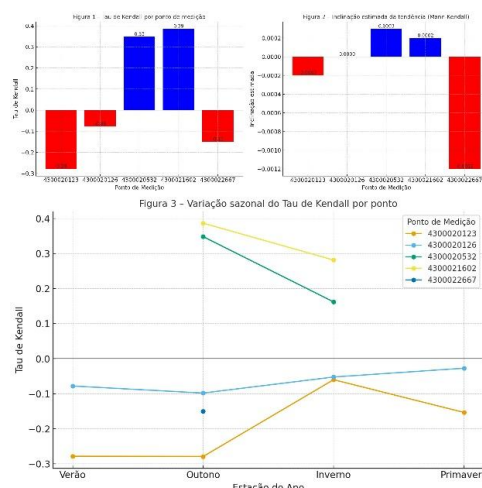
A avaliação dos níveis de água subterrânea nos poços monitorados na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai revelou padrões contrastantes de tendência e estacionariedade, tanto no recorte geral das séries temporais quanto na análise sazonal. A Tabela 2 apresenta a síntese estatística dos testes ADF e Mann-Kendall para os cinco poços considerados. A heterogeneidade espacial e sazonal das tendências foi melhor visualizada nos painéis apresentados na Figura 2, que mostram a distribuição espacial do Tau de Kendall, as inclinações obtidas pelo teste de Mann-Kendall e a variação sazonal do Tau em cada ponto de monitoramento.

Tabela 2. Resultados dos testes ADF e Mann-Kendall para os poços monitorados na Bacia do Rio Uruguai

Ponto	% Faltantes	Estacionariedade (ADF)	Tendência (MK)	Tau de Kendall	Z- score	p- valor	Inclinação (m/dia)
P1	8,03%	Não estacionária	Decrescente	-0,2785	-29,05	<0,001	-0,0002
P2	11,65%	Não estacionária	Decrescente	-0,0780	-8,13	<0,001	-0,0000

P3	10,69%	Estacionária	Crescente	0,3481	34,81	<0,001	0,0003
P4	7,07%	Estacionária	Crescente	0,3865	35,38	<0,001	0,0002
P5	20,44%	Estacionária	Decrescente	-0,1501	-12,90	<0,001	-0,0012

Figura 2 – Distribuição espacial do Tau de Kendall na bacia de estudo (a), comparativo das inclinações estimadas pelo teste de Mann-Kendall (b) e variação sazonal do Tau de Kendall por ponto de monitoramento (c).



Fonte: Resultados do presente estudo (2025).

Os níveis freáticos apresentaram forte heterogeneidade espacial, com P1, P2 e P5 em declínio significativo ( $p < 0,001$ ), enquanto P3 e P4 mostraram tendência crescente, evidenciando resposta não homogênea do aquífero às pressões de recarga e exploração. A inclinação das tendências variou entre os pontos, indo de declínios discretos (P2) a acentuados (-0,0012 m/dia em P5), o que reforça indícios de sobre-exploração local, em consonância com achados de Machado et al. (2018).

A análise sazonal mostrou que P1 e P2 mantêm queda contínua em todas as estações, enquanto P3 e P4 tiveram tendências positivas no outono e inverno, quando a demanda hídrica agrícola é menor. Esse padrão indica que a sazonalidade agrícola regula os níveis freáticos, com maior pressão no verão e primavera, o que corrobora Silveira e Tucci (2014) sobre a influência do clima e do uso da terra no balanço hídrico subterrâneo.

O teste ADF apontou que apenas três séries foram estacionárias, e as funções ACF e PACF revelaram padrões distintos entre os poços. Nos poços não estacionários (P1 e P2), o decaimento lento das autocorrelações indica maior “memória hídrica”, com efeitos de recarga e exploração prolongados, conforme observado por Pousa et al. (2020).

A coexistência de tendências opostas na bacia evidencia a necessidade de gestão adaptativa: poços em declínio (P1, P2 e P5) exigem monitoramento intensivo para mitigar riscos de superexploração; áreas em ascensão (P3 e P4) devem ser preservadas como zonas de recarga; e a sazonalidade precisa ser incorporada ao planejamento de outorgas e uso agrícola. Esses resultados reforçam a importância de integrar monitoramento contínuo, modelagem hidrogeológica e ordenamento territorial, alinhando produção e conservação

conforme recomendações internacionais de gestão descentralizada baseada em indicadores locais (UNESCO 2022).

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo aplicou uma metodologia integrada de análise espaço-temporal, combinando imputação de dados, testes de estacionariedade e tendência, decomposição sazonal e autocorrelações. Os resultados evidenciam a heterogeneidade espacial do aquífero da Bacia do Rio Santa Maria e reforçam a importância do monitoramento contínuo aliado a estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, A. P. et al. Global patterns in groundwater recharge. **Nature**, Londres, v. 562, n. 7725, p. 91-94, 2018.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater Risk Assessment: A Methodology Using Available Data**. Washington: World Bank, 1988.
- SOUZA FILHO, F. A.; PORTELA, M. M. **Estatística Aplicada à Hidrologia**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2018.
- TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis**. Reading: Addison-Wesley, 1977.
- AZUR, M. J. et al. Multiple imputation by chained equations: what is it and how does it work? **International Journal of Methods in Psychiatric Research**, Nova York, v. 20, n. 1, p. 40-49, 2011.
- GESICKI, A. L. D. Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 2007.
- MATZEMBACHER, L. T. Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica da zona de recarga dos sistemas aquíferos Guarani (SAG) na região sudoeste do Rio Grande do Sul. 2011. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2011.
- MACHADO, R. E.; SOUZA, C. F.; ROBAINA, A. D. Tendências de níveis freáticos em aquíferos do Rio Grande do Sul e sua relação com a agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, p. 1-12, 2018.
- POUSA, R. et al. Groundwater recharge in alluvial zones of the Guarani Aquifer System. **Hydrogeology Journal**, Berlim, v. 28, p. 1115-1130, 2020.
- SILVEIRA, A. L. L.; TUCCI, C. E. M. Influência da sazonalidade no balanço hídrico subterrâneo da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 27-40, 2014.
- UNESCO. **Groundwater: Making the invisible visible**. Paris: UNESCO, 2022.