

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE POÇOS NO CARIRI OCIDENTAL PARAIBANO

Francisco de Assis da Silveira GONZAGA¹; Gabriela de AGUIAR SILVA²; Lázaro Nóbrega FARIAS³; Edmilson Dantas da SILVA FILHO⁴; Pedro Lucas Nunes da SILVEIRA

Resumo – As rochas cristalinas são formações geológicas presentes em diversos cinturões pré-cambrianos ao redor do mundo, incluindo o Brasil, onde desempenham um papel fundamental na hidrogeologia, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste. No Nordeste, a disponibilidade hídrica é limitada pelo clima semiárido, enquanto no Sudeste, a intensa exploração da água subterrânea afeta sua sustentabilidade. Os aquíferos fissurais, típicos dessas rochas, armazenam água em fraturas e apresentam grande variabilidade nas suas propriedades hidráulicas. Este estudo investigou a qualidade físico-química das águas subterrâneas de poços tubulares no Cariri Ocidental Paraibano, analisando parâmetros como cloretos, dureza, sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica. Os resultados indicaram que a cidade de Sumé apresentou os maiores valores médios de condutividade elétrica (2051 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e cloretos (808 mg/L), sugerindo maior influência da mineralogia local e possível contaminação. Em contrapartida, Ouro Velho apresentou os menores valores médios para todos os parâmetros analisados. A matriz de correlações revelou forte associação entre condutividade elétrica, cloretos e sólidos dissolvidos totais, destacando a influência da composição litológica na qualidade da água subterrânea. Esses achados reforçam a necessidade de um monitoramento contínuo e da adoção de estratégias para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Abstract – Crystalline rocks are geological formations present in several Precambrian belts around the world, including Brazil, where they play a fundamental role in hydrogeology, especially in the Northeast and Southeast regions. In the Northeast, water availability is limited by the semi-arid climate, while in the Southeast, the intense exploitation of groundwater affects its sustainability. Fissure aquifers, typical of these rocks, store water in fractures and present great variability in their hydraulic properties. This study investigated the physical-chemical quality of groundwater from tubular wells in Cariri Oeste Paraibano, analyzing parameters such as chlorides, hardness, total dissolved solids and electrical conductivity. The results indicated that the city of Sumé presented the highest average values of electrical conductivity (2051 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and chlorides (808 mg/L), suggesting a greater influence of local mineralogy and possible contamination. On the other hand, Ouro Velho presented the lowest average values for all analyzed parameters. The correlation matrix revealed a strong association between electrical conductivity, chlorides and total dissolved solids, highlighting the influence of lithological composition on groundwater quality. These findings reinforce the need for continuous monitoring and the adoption of strategies for the sustainable management of water resources.

Palavras-Chave Aquíferos fissurais; Qualidade da água subterrânea; Semiárido Paraibano.

¹ Dr. Instituto Federal da Paraíba (IFPB), franciscoagonzaga@hotmail.com

INTRODUÇÃO

As rochas cristalinas compõem extensos cinturões pré-cambrianos em diversas regiões do mundo. No Brasil, essas formações geológicas são de grande importância hidrogeológica, especialmente no Nordeste e Sudeste. No Nordeste, a disponibilidade hídrica é limitada devido ao clima semiárido, que impede o desenvolvimento de um manto de intemperismo espesso para a formação de aquíferos. Já no Sudeste, a exploração intensiva da água subterrânea para abastecimento urbano e industrial impacta a disponibilidade do recurso (NEVES, 2005).

A captação de água subterrânea em aquíferos fraturados tem ganhado destaque nas últimas décadas, apesar de sua baixa permeabilidade e da complexidade na perfuração de poços. Historicamente, esses aquíferos foram subestimados, mas a crescente demanda hídrica tem impulsionado pesquisas sobre seu potencial para o abastecimento rural e urbano (NEVES, 2005).

Os aquíferos fissurais, típicos de rochas cristalinas, armazenam e conduzem água por meio de fraturas e descontinuidades estruturais. Por serem sistemas heterogêneos e anisotrópicos, suas propriedades hidráulicas variam significativamente. A condutividade hidráulica depende diretamente do grau de fraturamento da rocha, e a porosidade secundária não se distribui uniformemente, dificultando a previsão da exploração sustentável desses aquíferos (GONZAGA, 2011).

Na região semiárida do Cariri Ocidental Paraibano, a perfuração de poços tubulares tem sido uma alternativa essencial para suprir a demanda hídrica da população rural, onde o abastecimento convencional é frequentemente insuficiente. No entanto, a intensificação da exploração e a contaminação decorrente de atividades antrópicas tornam imprescindível o monitoramento da qualidade da água subterrânea (GOMES, 2005).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar a qualidade físico-química das águas subterrâneas de poços tubulares na região do Cariri Ocidental Paraibano, com foco nos parâmetros de cloretos, dureza, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica. Além disso, busca-se compreender a influência da mineralogia das rochas encaixantes na composição dessas águas, contribuindo para um diagnóstico hidroquímico da região e para o planejamento sustentável dos recursos hídricos locais.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1. Caracterização da área estudada

Simplificadamente, a região do cariri ocidental paraibano (Figura 1), apresenta geologia caracterizada pela majoritária presença de granada-biotita-xisto, onde são comumente observados veios quartzo feldspáticos remobilizados e diques pegmatíticos intensamente boudinados devido a tectônica regional (Figura 2). Estão inseridos nesta formação granitoides indiscriminados e biotita-hornblenda-piroxênio-alcalifeldspato granito/sienito, representantes da Suíte Trinfo. Estas unidades são limitadas pelo Complexo Serrinha-Pedro Velho, representado por ortognaisses de composição variando de tonalítico-trondhjemítico à granítico migmatizado, além de migmatitos datados do Paleoproterozóico (Beltrão et al. 2005).

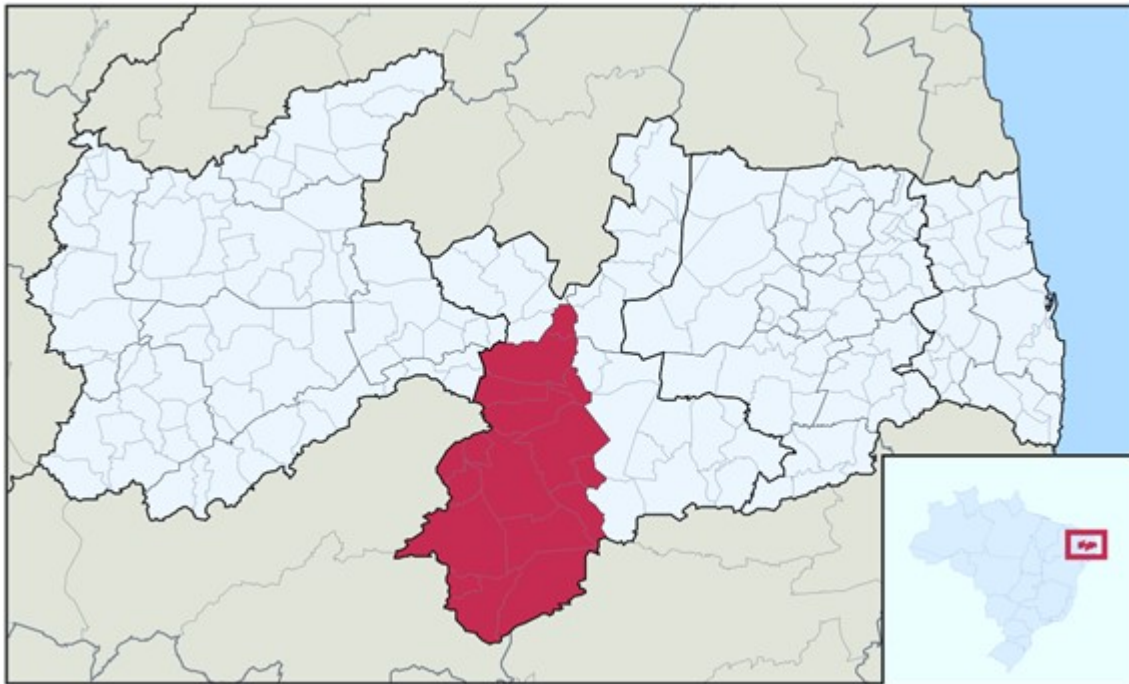


Figura 1 – Mapa de localização do Cariri Ocidental Paraibano.
Fonte: Governo da Paraíba (2016)

1.2. Caracterização geológica

Diferente dos aquíferos granulares, que apresentam porosidade associada aos vazios entre os grãos, os aquíferos fissurais apresentam padrão de armazenamento de água apenas em fraturas, fendas e/ou foliações distribuídas ao longo do corpo rochoso (Gonzaga, 2011). As rochas cristalinas da região de estudo podem ser divididas quanto sua composição química e mineralógica como ácidas e básicas (Figura 2). As rochas de caráter ácido, apresentam predominantemente minerais com maiores teores de Sílica (SiO_2), K e Al. Enquanto as rochas básicas são caracterizadas pela predominância em minerais compostos por Fe, Mg e Ca. Essas diferenças químicas e mineralógicas conferem comportamentos reológicos distintos para esses dois grupos de rochas. Consequentemente, as diferenças no padrão de deformação irão refletir no grau de porosidade secundária e na qualidade da água destes aquíferos (Singhal & Gupta, 2010).

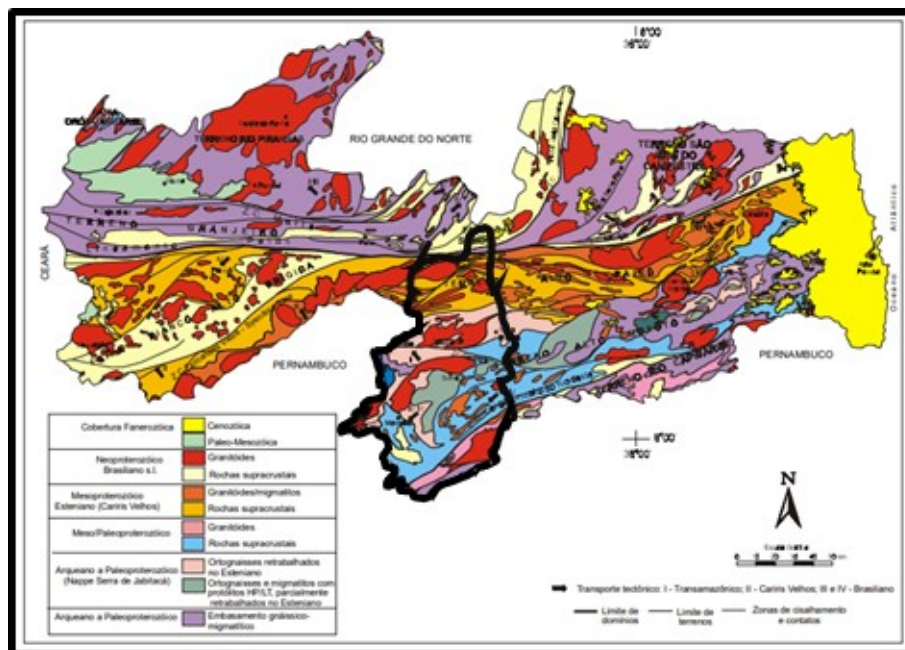


Figura 2 – Mapa Geológico da região do Cariri Ocidental Paraibano.
Fonte: CPRM (2002). Contorno aproximado.

Jardim de Sá *et al.* (2008) descrevem que, durante a percolação da água entre o manto de alteração e a porosidade secundária do maciço rochoso, ocorre o processo de depuração, através processos físico-químicos (troca iônica, decaimento radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio poroso, entre outros) e microbiológicos, responsáveis por modificar suas características. Conforme relata Gonzaga (2006), os parâmetros físico-químicos que caracterizam a água subterrânea, são resultado da composição química inicial que percola o solo, e da evolução geoquímica resultante das litologias atravessadas, aumentando o teor de determinados parâmetros à medida que ela percola o maciço.

Gonzaga (2011) observou que o grau de salinidade e/ou alcalinidade da água subterrânea dessas regiões está diretamente relacionada a dissolução das rochas encaixantes. Este processo é intensamente agravado pelo elevado tempo de residência, resultante do baixo índice de recarga, dessas águas nas rochas cristalinas.

Na escala pontual, praticamente cada poço representa um “aquífero” diferente, com características próprias. As diferenças de produtividade e qualidade de água de poços muito próximos entre si, porém captando condutores hidráulicos diferentes, são, muitas vezes, surpreendentes. Sendo assim, não é consistente fazer regionalizações utilizando-se dados de poços em rochas cristalinas em grandes escalas de observação, como é aplicado em aquíferos sedimentares. Entretanto, para escalas pequenas ($\leq 1:000.000$) é possível definir grandes áreas ou zonas que apresentem uma tendência em relação a um determinado parâmetro analisado (Feitosa & Diniz, 2011).

Feitosa & Diniz *op cit.* reafirmam que, além da aplicação de dessalinizadores, para atender a principal demanda da população local, a locação de poços em ambientes cristalinos deve ser orientada para áreas com tendência de água de melhor qualidade, favorecendo a população e facilitando programas públicos de adequação da água.

2.3 Análises estatísticas

Inicialmente, a seleção dos pontos de amostragem foi realizada com base em um levantamento bibliográfico e em dados geológicos, visando representar as diferentes litologias presentes na área de estudo. Foram considerados aspectos como a profundidade do lençol freático, o uso do solo, as atividades humanas e a proximidade de potenciais fontes de contaminação.

As amostras de água subterrânea foram coletadas durante visitas técnicas, registrando-se informações como coordenadas geográficas e profundidade de amostragem. Em seguida, foram realizadas análises físico-químicas, incluindo a determinação da condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e concentrações de íons Cl⁻ e análise de Dureza Total. As análises seguiram as normas analíticas da APHA (1998) e foram conduzidas por métodos titulométricos e de imersão direta.

Adicionalmente, foram realizadas análises estatísticas para avaliar correlações entre os parâmetros físico-químicos e as características litológicas dos municípios, permitindo uma interpretação mais robusta dos dados. Foram aplicadas estatísticas descritivas e inferenciais para identificar relações significativas entre as variáveis analisadas, utilizando testes de normalidade, correlações de Pearson, conforme a distribuição dos dados.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos resultados das análises físico-químicas, foram realizados testes estatísticos para avaliar a distribuição dos dados e a existência de diferenças significativas entre os municípios estudados. O teste de Shapiro-Wilk foi empregado para verificar a normalidade dos dados, e análises descritivas foram conduzidas para caracterizar os parâmetros avaliados em cada localidade (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos parâmetros analisados.

Parâmetro	Cidade	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	W	p
Condutividade Elétrica	Sumé	4	2051	1321	1649,8	1064	4500	0,732	0,026
	Prata	3	1087	1077	358,4	734	1450	0,999	0,955
	Ouro Velho	3	742	765	52	683	779	0,859	0,265
STD	Sumé	4	1100	798	792,6	531	2274	0,765	0,053
	Prata	3	545	542	179,8	367	726	1.000	0,971
	Ouro Velho	3	372	384	26,4	341	390	0,836	0,203
Cloreto	Sumé	4	808	445	796,8	340	2000	0,693	0,01
	Prata	3	324	321	106,5	219	432	0,999	0,953
	Ouro Velho	3	221	228	15,1	204	232	0,855	0,253
Dureza	Sumé	4	413	262	349	197	933	0,733	0,027
	Prata	3	300	350	180,3	100	450	0,942	0,537
	Ouro Velho	3	163	140	40,4	140	210	0,75	<,001

O teste de Shapiro-Wilk indicou que algumas variáveis não seguem uma distribuição normal ($p < 0,05$), sendo elas: Condutividade Elétrica (Sumé), Cloreto (Sumé) e Dureza (Sumé e Ouro Velho). Dessa forma, análises comparativas entre os municípios devem considerar testes não paramétricos.

Observou-se também que o comportamento da normalidade variou entre os municípios. Em Sumé, os parâmetros apresentaram maior variabilidade e tendência a não normalidade, sugerindo uma possível heterogeneidade nas condições ambientais ou nos fatores de contaminação locais. Em Prata, a maioria dos dados seguiu uma distribuição normal, indicando uma relativa estabilidade nos parâmetros analisados. Já em Ouro Velho, os resultados mostraram uma tendência intermediária, com alguns parâmetros normais e outros não, o que pode indicar condições ambientais de transição entre as características observadas em Sumé e Prata.

Os dados indicam que a cidade de Sumé apresentou os maiores valores médios para Condutividade Elétrica (2051 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e Cloreto (808 mg/L), além de maior dispersão nos resultados. Esses valores sugerem uma variação considerável na qualidade da água, possivelmente associada a fatores ambientais ou antrópicos locais.

A cidade de Prata apresentou valores intermediários, com menor variabilidade nos dados, enquanto Ouro Velho apresentou os menores valores médios para todos os parâmetros analisados, com menor dispersão.

Os resultados sugerem que há variações espaciais importantes na qualidade da água entre os municípios estudados, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e de investigações adicionais para identificar possíveis fontes de contaminação e variações geológicas ou climáticas que possam influenciar os parâmetros analisados.

Além disso, foi construída uma matriz de correlações entre os parâmetros analisados, apresentada na Tabela 2. Essa matriz permite avaliar as relações entre as variáveis e identificar possíveis associações entre elas.

Tabela 2. Matriz de Correlações

	Condutividade Elétrica	STD	Cloreto	Dureza
Condutividade Elétrica	—			
STD	0,989	—		
Cloreto	0,994	0,990	—	
Dureza	0,961	0,941	0,941	—

A Tabela 2 apresenta a matriz de correlações entre os parâmetros físico-químicos analisados. Observa-se que todas as variáveis apresentam correlações positivas e elevadas entre si, com coeficientes superiores a 0,94. A condutividade elétrica apresentou forte correlação com os demais parâmetros, especialmente com o cloreto ($r = 0,994$) e o STD ($r = 0,989$), indicando que esses parâmetros podem estar influenciados por fatores semelhantes. A dureza também demonstrou correlação significativa com as demais variáveis, sugerindo uma possível relação com a composição mineralógica da água.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da qualidade da água subterrânea na região do Cariri Ocidental Paraibano revelou variações significativas entre os municípios estudados, evidenciando a influência da geologia local na composição hidroquímica. A alta condutividade elétrica e os elevados teores de cloretos observados em algumas localidades sugerem possíveis processos de dissolução mineral e influências antrópicas, enquanto as diferenças na dureza da água indicam a diversidade litológica da região. Além disso, a forte correlação entre os parâmetros físico-químicos analisados demonstra que fatores ambientais e geológicos desempenham um papel essencial na qualidade da água subterrânea.

Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo, especialmente em áreas com maior vulnerabilidade à contaminação e salinização. Para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos na região, recomenda-se a adoção de medidas como a proteção das áreas de recarga, o controle da perfuração de poços e a implementação de programas de dessalinização e tratamento da água, assegurando o abastecimento adequado para a população local.

REFERÊNCIAS

- APHA (1998) - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington.
- BELTRÃO B.A. et al. (2005) - Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea

Estado da Paraíba: Diagnóstico do município de Amparo. CPRM. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15788/1/Rel_Amparo.pdf. Acesso em: 07 mar. 2024.

CPRM – SANTOS, E.J.; FERREIRA, C.A.; SILVA JR, J.M.F. (2002) - Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba, [map]. 1:500 000. In: CPRM, Recife, p. 233.

FEITOSA, F. A. C e DINIZ, J. A. O. (2011) - Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, SP, 2011. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28026/18153>. Acesso em: 07 jan 2025.

GOMES, J. L. (2005) - Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil.

GONZAGA, F. A. S. (2011) - Uma Metodologia Para Determinação da Vazão de Exploração em Poços do Sistema Aquífero Cristalino no Cariri Paraibano. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.

GOVERNOR DA PARAÍBA (2016) - Projeto PROCASE: Projeto de Desenvolvimento Sustentável do Cariri, Seridó e Curimataú.

JARDIM DE SÁ, E. F. et al. (2008) - Conceitos de análises estrutural aplicados à hidrogeologia de terrenos cristalinos. In: Hidrogeologia conceitos e aplicações. CPRM, 3ª Ed. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro, RJ. 2008, 835 p.

NEVES, M. A. (2005) - Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R.P. (2010) - Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer Science + Business Media B.V. DOI 10.1007/987-90-481-8799-7_8.