PADRÕES ESTOCÁSTICOS DA DINÂMICA HIDROQUÍMICA DE NASCENTES NA CHAPADA DO ARARIPE

Celme Torres Ferreira da Costa[1]; Levy Duarte Cavalcante de Carvalho[2]; Rosilda Benício de Souza[3]; Paulo Renato Alves Firmino[4];Rayanne Bezerra de Melo[5]; Adélia Alencar Brasil[6]; Ana Rute Pereira Batista[7]; Isaac Felix Victor[8]

RESUMO – A caracterização hidroquímica de nascentes em regiões semiáridas é essencial para compreender os processos que influenciam a qualidade da água e subsidiar ações de gestão e conservação dos recursos hídricos. Este estudo teve como objetivo analisar as relações hidroquímicas entre 23 nascentes da Chapada do Araripe, Ceará, utilizando dados monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh) entre 2021 e 2024. Foram aplicadas técnicas estatísticas exploratórias e multivariadas, incluindo boxplots, Análise de Componentes Principais (ACP) e o algoritmo de agrupamento k-means, com base nas variáveis pH, temperatura, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos. Os resultados evidenciaram elevada heterogeneidade espacial entre as nascentes, indicando diferentes condições hidrogeológicas e distintos padrões de mineralização da água. A ACP demonstrou que os dois primeiros componentes principais explicaram 85,3% da variância total dos dados, permitindo sintetizar a estrutura hidroquímica do sistema e identificar os principais fatores responsáveis pela variabilidade observada. A aplicação do k-means possibilitou a identificação de grupos de nascentes com características hidroquímicas semelhantes, evidenciando a existência de distintos domínios hidrogeoquímicos na área de estudo. Os resultados contribuem para o monitoramento, a conservação das nascentes e o fortalecimento da segurança hídrica regional.

ABSTRACT– The hydrochemical characterization of springs in semiarid regions is essential for understanding the processes that influence water quality and for supporting water resource management and conservation strategies. This study aimed to analyze the hydrochemical relationships among 23 springs located in the Chapada do Araripe, Ceará, Brazil, using data monitored by the Ceará Water Resources Management Company (COGERH) between 2021 and 2024. Exploratory and multivariate statistical techniques were applied, including boxplots, Principal Component Analysis (PCA), and the k-means clustering algorithm, based on the variables pH, temperature, electrical conductivity, and total dissolved solids. The results revealed high spatial heterogeneity among the springs, indicating distinct hydrogeological conditions and different patterns of water mineralization.

[1] Professora titular; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; celme.torres@ufca.edu.br
[2] Engenheiro Civil; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; levy.duarte@aluno.ufca.edu.br
[3] Professora associada; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; rosilda.benicio@ufca.edu.br
[4] Professor titular; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; paulo.firmino@ufca.edu.br
[5] Auxiliar de Engenharia, Cagece; Rua Interventor Francisco Erivânio Cruz, 120 – Centro; (88) 3221-9549; rayannebmelo@gmail.com
[6] Professora substituta, Universidade Regional do Cariri, Crato, Campus Pimenta; adeliaalencar@gmail.com
[7] Engenheira, MPCE; Rua Oliveira Alves Pontes, 145, Lagoa Seca, Juazeiro do Norte; anarutebpereira@gmail.com
[8] Graduando, Engenharia Civil, Bolsista IC/CNPq, Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; felix.isaac@aluno.ufca.edu.br

PCA showed that the first two principal components explained 85.3% of the total data variance, enabling the synthesis of the hydrochemical structure of the system and the identification of the main factors responsible for the observed variability. The application of k-means allowed the identification of groups of springs with similar hydrochemical characteristics, highlighting the existence of distinct hydrogeochemical domains within the study area. The findings contribute to spring monitoring, conservation efforts, and the strengthening of regional water security.

Palavras-Chave – Análise multivariada; Águas subterrâneas; ACP; Hidroquímica; Semiárido.

INTRODUÇÃO

As nascentes desempenham papel fundamental na manutenção dos recursos hídricos, atuando como zonas naturais de descarga dos aquíferos e contribuindo para a sustentabilidade dos ecossistemas e do abastecimento humano. Em regiões semiáridas, sua importância é ampliada pela elevada variabilidade climática e pela irregularidade das precipitações, fatores que tornam os recursos subterrâneos estratégicos para a segurança hídrica (Silva, *et al.,* 2024). Nesse contexto, a Chapada do Araripe destaca-se como uma importante área de recarga hídrica do Nordeste brasileiro, sustentada por formações sedimentares de elevada permeabilidade que favorecem a infiltração, o armazenamento subterrâneo e a ocorrência de numerosas nascentes (DNPM, 1996; ANA, 2015).

Estudos nacionais e internacionais demonstram que a integração entre dados hidroquímicos e técnicas estatísticas multivariadas constitui uma ferramenta eficiente para compreender a dinâmica de sistemas aquíferos e identificar padrões espaciais de qualidade da água (Celico et al., 2006; Fiorillo, 2009; Springer e Stevens, 2009; Lambrakis et al., 2014). Entretanto, ainda são limitadas as investigações voltadas à identificação de padrões hidroquímicos e relações de similaridade entre múltiplas nascentes em ambientes semiáridos brasileiros, especialmente na Chapada do Araripe.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo analisar as relações hidroquímicas entre 23 nascentes da Chapada do Araripe (CE), utilizando dados monitorados entre 2021 e 2024. Para isso, foram aplicadas técnicas estatísticas exploratórias e multivariadas, incluindo Análise de Componentes Principais (ACP) e agrupamento k-means, visando identificar padrões de variabilidade, similaridade e agrupamento hidroquímico entre as nascentes monitoradas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Chapada do Araripe, localizada no sul do estado do Ceará e inserida na Bacia Sedimentar do Araripe (Figura 1), com área aproximada de 8.000 km² (DNPM, 1996). A predominância de arenitos e siltitos de elevada permeabilidade favorece os processos de infiltração e armazenamento subterrâneo, conferindo à região características hidrogeológicas singulares no contexto do Semiárido Brasileiro. O clima predominante é tropical semiárido, com precipitações concentradas

entre janeiro e maio e uma estação seca prolongada, fatores que influenciam diretamente a dinâmica das nascentes (Marra, 2022).

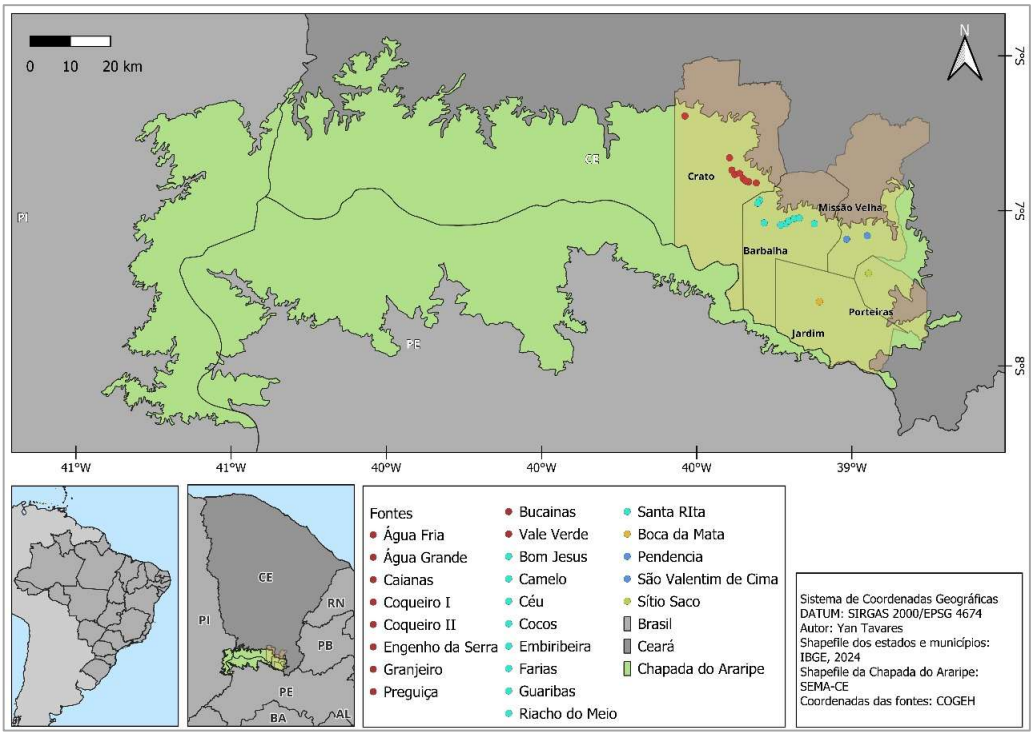


Figura 1 - Localização da área em estudo com indicação das nascentes monitoradas (Fonte: Yan Tavares, 2025)

Foram utilizados dados secundários provenientes de nove campanhas de monitoramento realizadas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh) entre julho de 2021 e março de 2024. As campanhas contemplaram períodos secos e chuvosos e envolveram 23 nascentes distribuídas nos municípios de Crato, Barbalha, Jardim, Missão Velha e Porteiras. Em cada campanha foram obtidas medições de pH, temperatura (T), condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (SDT).

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas, padronizados pelo método z-score e analisados no software R (R Core Team, 2022). Inicialmente foi realizada análise exploratória por meio de boxplots, visando avaliar a distribuição e dispersão das variáveis físico-químicas. Em seguida, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (ACP) para redução da dimensionalidade dos dados e identificação dos principais padrões hidroquímicos. Complementarmente, empregou-se o algoritmo k-means para identificar grupos de nascentes com características semelhantes, tanto nos dados padronizados quanto nos escores gerados pela ACP. Todas as análises estatísticas e representações gráficas foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2022), utilizando os pacotes psych (Revelle, 2024), stats (R Core Team, 2022), factoextra (Kassambara; Mundt, 2020), cluster (Maechler et al.,

2022) e ggplot2 (Wickham, 2016), assegurando a reprodutibilidade e a robustez dos procedimentos analíticos. O Quadro 1 apresenta as 23 nascentes que compõem o conjunto amostral desta pesquisa, distribuídas nos municípios de Crato, Barbalha, Jardim, Missão Velha e Porteiras.

Quadro 1: Localização das nascentes e abreviações utilizadas.

Nascente	Município	Abreviação
Água Fria	Crato	FAFc
Água Grande	Crato	FAGc
Bucainas	Crato	FBUsc
Caiana	Crato	FCAIc
Coqueiro I	Crato	FCIc
Coqueiro II	Crato	FCIIc
Engenho da Serra	Crato	FESc
Granjeiro	Crato	FGRAc
Preguiça	Crato	FPREc
Vale Verde	Crato	FVVc
Saco	Porteiras	FSp
Boca da Mata	Jardim	FBMj

Nascente	Município	Abreviação
Bom Jesus	Barbalha	FBJb
Camelo	Barbalha	FCAMb
Fonte do Céu	Barbalha	FCEUb
Cocos	Barbalha	FCOCb
Embiribeira	Barbalha	FEMBb
Riacho do Meio	Barbalha	FRMb
Guaribas	Barbalha	FGUAb
Santa Rita	Barbalha	FSRb
Levada Farias	Barbalha	LFb
São Valentim de Cima	Missão Velha	FSVmv
Pendência	Missão Velha	FPmv

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise exploratória revelou elevada heterogeneidade hidroquímica entre as nascentes monitoradas, evidenciando a influência de diferentes condições hidrogeológicas, tempos de residência da água subterrânea e processos de interação água-rocha. Entre as variáveis avaliadas, a condutividade elétrica (CE) apresentou a maior variabilidade espacial, enquanto a temperatura exibiu comportamento mais homogêneo.

Os valores de pH (Figura 2) indicaram predominância de águas ligeiramente ácidas, característica típica de aquíferos sedimentares com reduzida influência de minerais carbonáticos e forte contribuição da recarga meteórica (Calheiros et al., 2004; Silva, et al., 2024).

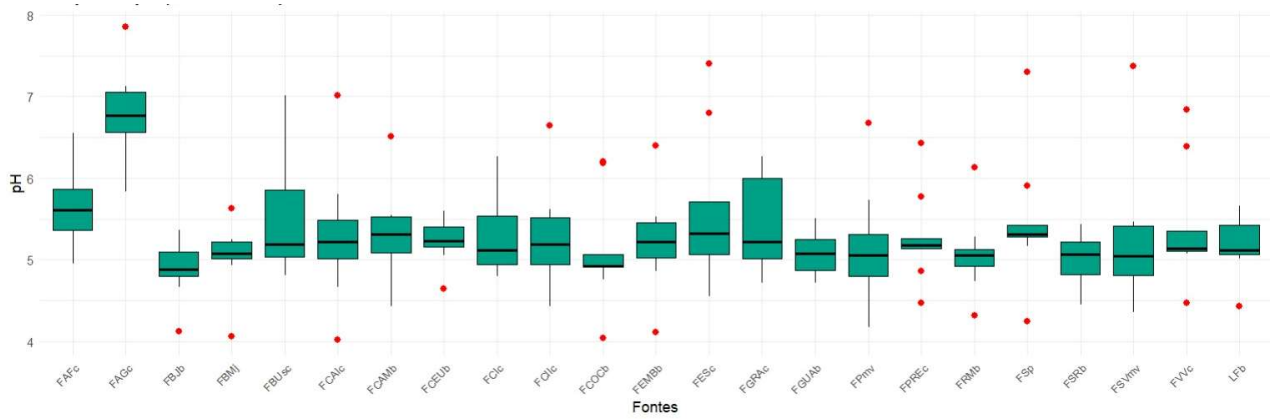


Figura 2 — Distribuição dos valores de pH nas nascentes monitoradas da Chapada do Araripe

Os valores de pH indicaram predominância de águas levemente ácidas, característica frequentemente associada a aquíferos sedimentares submetidos à influência direta da recarga meteórica. As nascentes Fonte Água Grande (FAGc) e Fonte Granjeiro (FGRAc) apresentaram maior dispersão dos valores observados, sugerindo influência de fatores locais relacionados à recarga e à composição geoquímica do meio.

A condutividade elétrica (Figura 3) apresentou ampla variação entre as nascentes, destacando-se Fonte Boca da Mata (FBMj), Fonte Bom Jesus (FBJb), Fonte Engenho da Serra (FESc) e Levada Farias (LFb), que registraram os maiores valores. Esses resultados indicam maior enriquecimento iônico e maior interação água-rocha ao longo dos percursos subterrâneos. Em contraste, as menores condutividades observadas em Fonte Água Fria (FAFc), Fonte Coqueiro I (FCIc) e Fonte do Céu (FCEUb) sugerem águas menos mineralizadas e associadas a processos de recarga mais recentes.

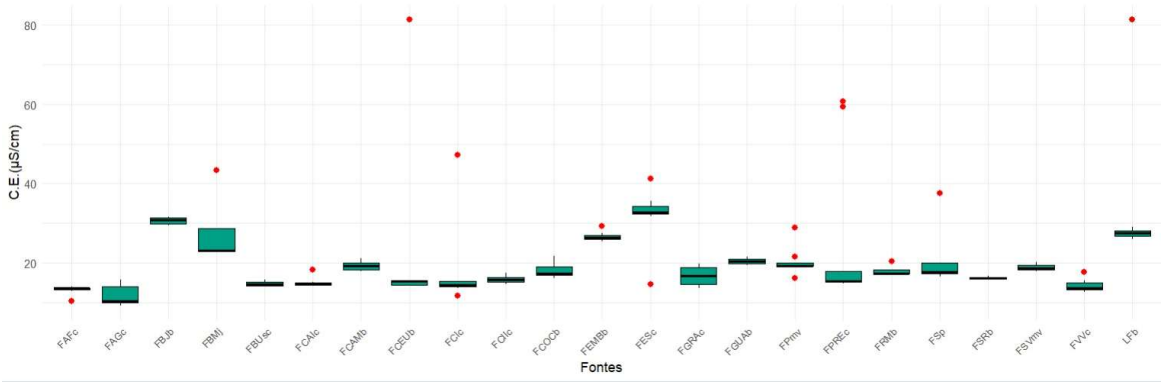


Figura 3 — Condutividade elétrica (µS/cm) das nascentes monitoradas na Chapada do Araripe.

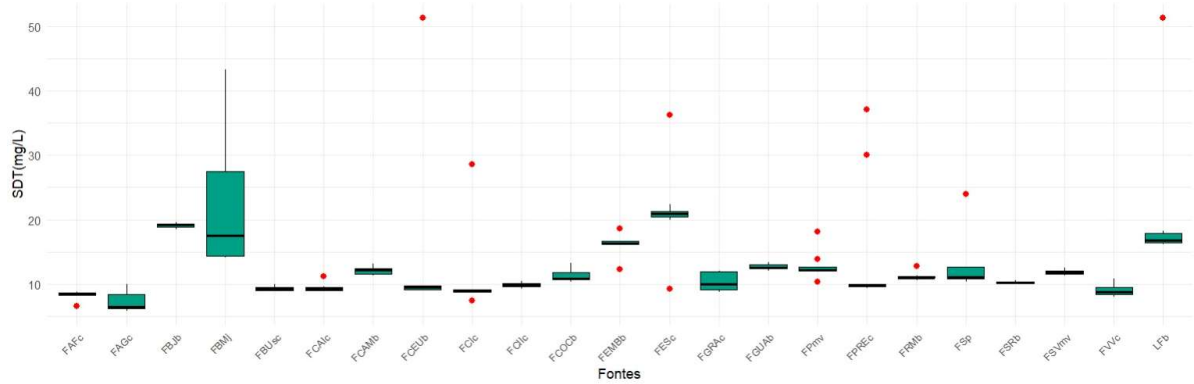


Figura 4 — Distribuição dos valores de Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L) nas nascentes.

Os sólidos totais dissolvidos (SDT) apresentaram comportamento semelhante ao observado para a condutividade elétrica, confirmando diferenças nos níveis de mineralização entre as nascentes. Destaca-se a Fonte Boca da Mata (FBMj), que apresentou os maiores valores e maior variabilidade temporal, indicando possível alternância entre contribuições de fluxos subterrâneos rasos e profundos

(Figura 4). Fontes com baixos valores de SDT, como FAFc, FBUSc e FCEUb, reforçam a presença de águas “jovens”, característica de áreas com recarga rápida e baixos teores minerais, conforme também observado por Costa et al. (2018) em nascentes sedimentares.

A temperatura apresentou a menor variabilidade entre as variáveis analisadas, com valores predominantemente entre 24°C e 27°C. As nascentes Fonte Vale Verde (FVVc), Fonte Coqueiro I (FCIc) e Fonte São Valentim de Cima (FSVmv) apresentaram maior estabilidade térmica, sugerindo predominância de fluxos subterrâneos menos influenciados pelas condições atmosféricas, comportamento frequentemente observado em aquíferos sedimentares (Pereira et al., 2021).

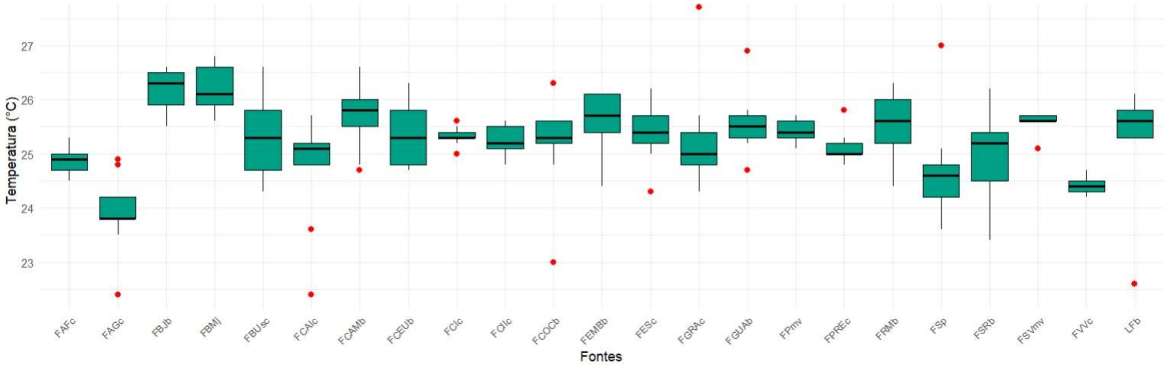


Figura 5 – Distribuição dos valores de temperatura da água nas nascentes monitoradas

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as contribuições percentuais das variáveis analisadas para a formação das componentes principais e para a explicação da variabilidade total dos dados. O primeiro componente principal (CP1) foi responsável por 53,8% da variância total, enquanto o segundo componente (CP2) explicou 31,5%, totalizando 85,3% da variância acumulada. Dessa forma, as duas primeiras componentes retêm a maior parte da informação contida nos dados originais, justificando sua utilização na interpretação dos padrões hidroquímicos observados.

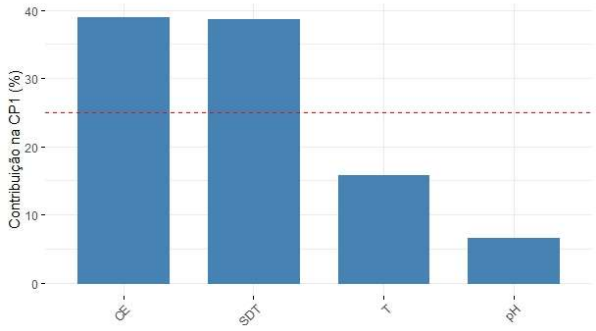


Figura 6 — Variáveis que mais contribuíram na primeira Componente Principal.

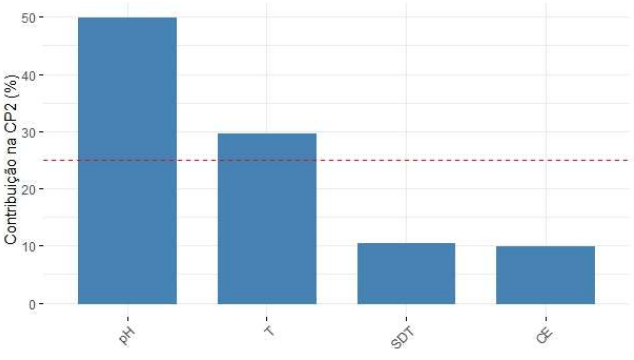


Figura 7 — Variáveis que mais contribuíram na segunda Componente Principal.

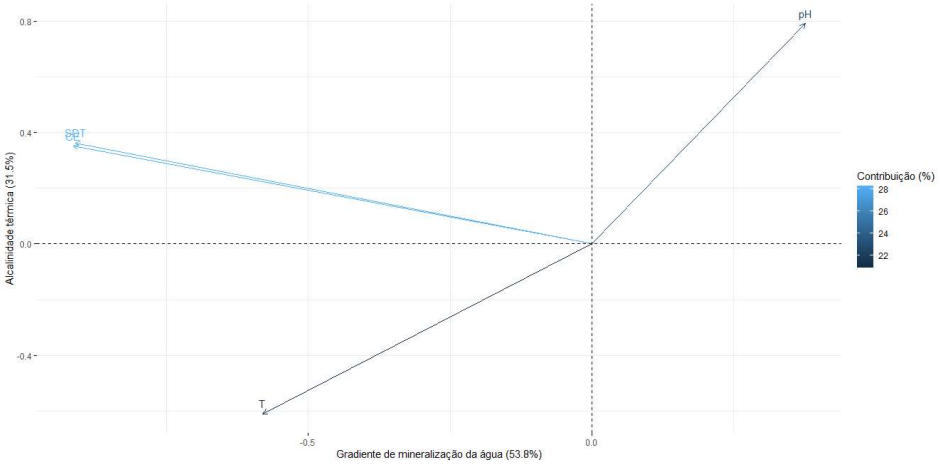


Figura 8 — Contribuição de cada variável na ACP.

O algoritmo k-means foi aplicado aos dados padronizados e aos escores das duas primeiras componentes principais (CP1 e CP2) para avaliar o efeito da redução da dimensionalidade nos agrupamentos. O número ótimo de clusters foi estimado pelos métodos da Silhueta (Rousseeuw, 1987) e do Cotovelo (Han; Kamber, 2011), que indicaram, respectivamente, dois e cinco grupos. Considerando a heterogeneidade hidroquímica das nascentes, adotou-se inicialmente k = 5, resultando em quatro agrupamentos distintos, com pequenas diferenças entre os dados originais e os derivados da ACP. Posteriormente, a adoção de k = 4 produziu três agrupamentos mais consistentes e bem definidos, com maior coerência observada no espaço reduzido da ACP.

A Figura 9 ilustra a distribuição das nascentes no espaço das duas primeiras componentes principais e os agrupamentos obtidos pelo algoritmo k-means.

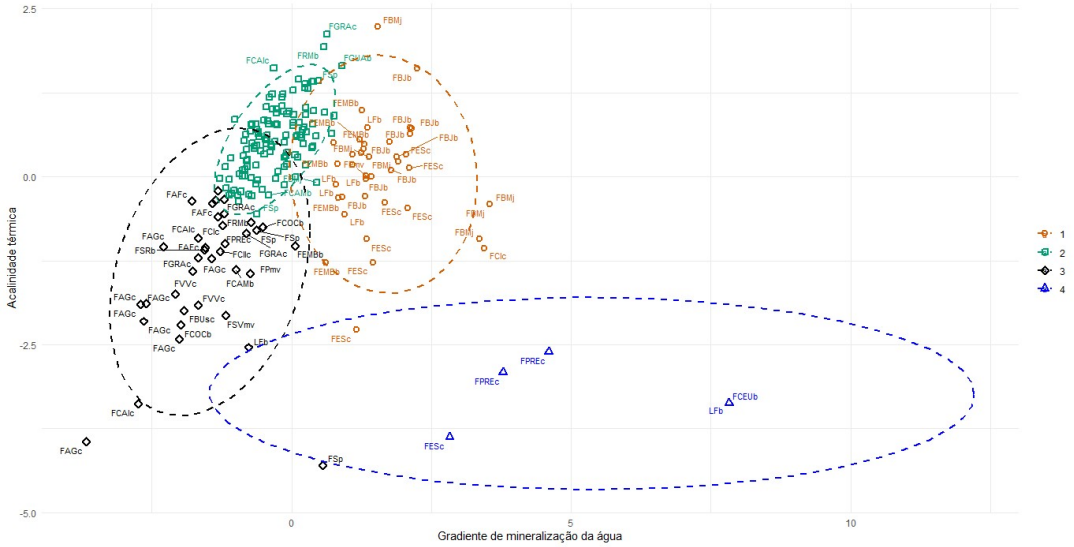


Figura 9 — Nascentes agrupadas pelo k-means

A separação dos grupos evidenciou padrões consistentes de similaridade hidroquímica, indicando que a ACP preservou a estrutura dos dados e permitiu identificar diferentes comportamentos entre as nascentes. Quando esses agrupamentos são analisados em conjunto com a Figura 10, observa-se que sua distribuição espacial acompanha as características geoambientais da Chapada do Araripe. De modo geral, nascentes inseridas em ambientes semelhantes apresentaram comportamento hidroquímico próximo, sugerindo que fatores como cobertura e uso da terra influenciam a variabilidade observada. A Figura 10 ilustra esse contexto, destacando a distribuição da cobertura e uso da terra nos municípios de Crato, Barbalha e Missão Velha (CE), bem como o limite da REVIS Soldadinho-do-Araripe.

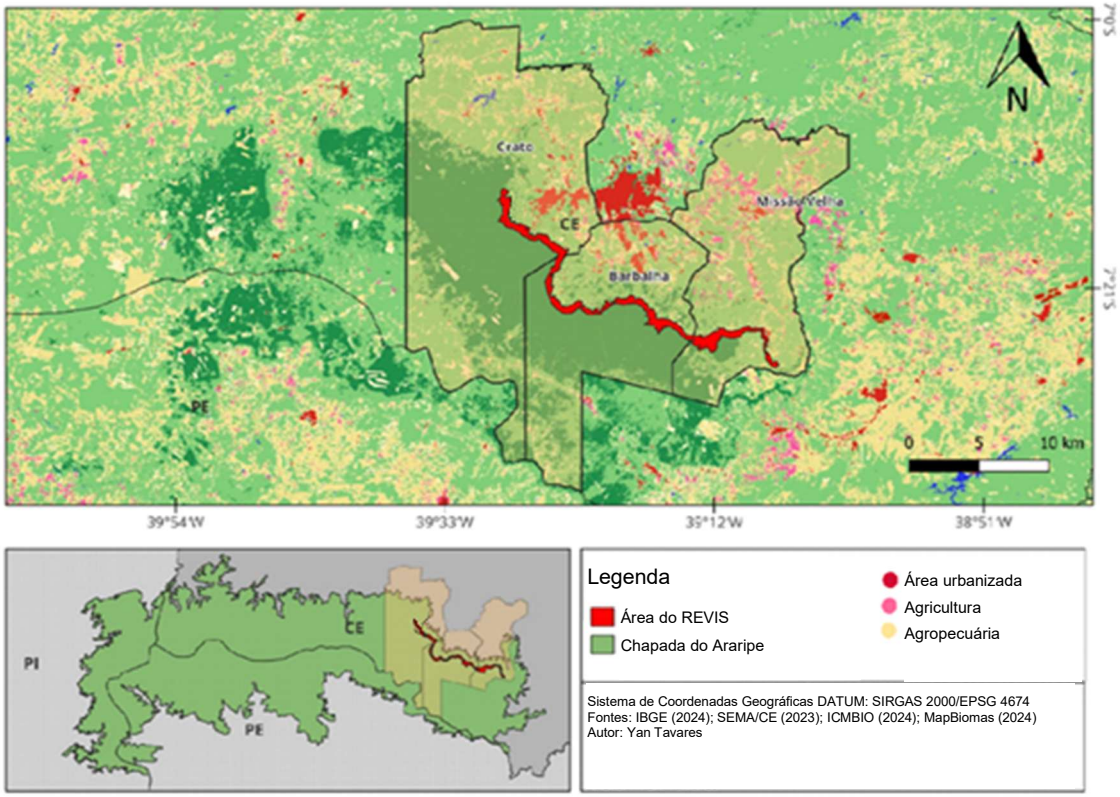


Figura 10 — Contexto espacial das nascentes monitoradas e das classes de uso e cobertura da terra na Chapada do Araripe.

A Figura 10 evidencia o predomínio de formações florestais sobre o maciço da Chapada do Araripe, enquanto as áreas agropecuárias e urbanizadas concentram-se nas porções mais baixas do relevo, próximas aos núcleos urbanos. Esse padrão reforça a importância da REVIS Soldadinho-do-Araripe e das áreas de nascentes para a conservação da biodiversidade e da dinâmica hidrológica regional (MapBiomas, 2024; IBGE, 2024).

De modo geral, as nascentes localizadas em áreas com maior cobertura florestal apresentaram menores valores de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos, indicando águas menos

mineralizadas. Em contrapartida, observou-se uma tendência de maiores valores desses parâmetros nas áreas de transição entre a Chapada e o vale, onde a agropecuária e a expansão urbana são mais intensas. Esse comportamento pode estar relacionado tanto ao maior tempo de contato da água com os materiais geológicos quanto às alterações no uso e ocupação da terra.

Esses resultados mostram que a variabilidade hidroquímica das nascentes está associada não apenas às características do aquífero, mas também ao contexto geográfico em que elas se inserem. A integração entre as análises estatísticas e as informações espaciais permitiu compreender melhor os fatores que influenciam a qualidade das águas e oferece uma base consistente para ações de monitoramento e conservação em outras áreas semiáridas.

De forma geral, os resultados demonstram que a composição hidroquímica das nascentes é marcada por significativa variabilidade espacial, associada à heterogeneidade dos processos hidrogeológicos que atuam na Chapada do Araripe. A aplicação integrada da ACP e do algoritmo k-means permitiu sintetizar essa variabilidade e identificar grupos de nascentes com comportamento hidroquímico semelhante. Esses resultados contribuem para o entendimento da organização espacial das águas subterrâneas na região e reforçam o potencial das técnicas multivariadas como ferramentas de apoio ao monitoramento e à gestão dos recursos hídricos em ambientes semiáridos.

CONCLUSÕES

A análise hidroquímica de 23 nascentes da Chapada do Araripe permitiu identificar elevada heterogeneidade espacial nos parâmetros de qualidade da água, evidenciando a influência de diferentes condições hidrogeológicas sobre a composição das águas subterrâneas. A aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP) demonstrou que os dois primeiros componentes explicaram 85,3% da variância total dos dados, possibilitando a síntese da estrutura hidroquímica do sistema e a identificação dos principais fatores associados à variabilidade observada.

A utilização do algoritmo k-means permitiu reconhecer grupos de nascentes com características hidroquímicas semelhantes, evidenciando a existência de distintos domínios hidrogeoquímicos na área de estudo. Os resultados demonstram o potencial das técnicas multivariadas para a interpretação de conjuntos de dados hidroquímicos complexos e para a identificação de padrões espaciais em sistemas de nascentes.

De modo geral, os achados contribuem para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica hidroquímica das nascentes da Chapada do Araripe e fornecem subsídios para ações de monitoramento, conservação e gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas. Estudos futuros podem incorporar

um maior número de variáveis ambientais e ampliar a série temporal de monitoramento, visando aprofundar a compreensão dos processos que controlam a qualidade das águas subterrâneas na região.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) pela disponibilização dos dados utilizados neste estudo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica e à Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação da Universidade Federal do Cariri (PRPI/UFCA) pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS

ANA — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório pleno*. Brasília: ANA, 2015.

ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 371–389, 2007.

CALHEIROS, R. O. et al. Preservação e recuperação de nascentes. Piracicaba: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ, 2004.

COGERH — Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará. *Relatórios de Monitoramento Hidroambiental das Nascentes da Bacia do Araripe*. Fortaleza: COGERH, 2018.

COSTA, W. D. et al. Caracterização hidrogeoquímica de nascentes em aquíferos sedimentares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 23, e12, 2018.

DNPM — Departamento Nacional de Produção Mineral. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Crato*. Fortaleza: DNPM/CPRM, 1996.

FREeZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

FIORILLO, F. Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 373, p. 290–301, 2009.

GIBBONS, J. D. *Nonparametric statistical inference*. New York: Marcel Dekker, 2003.

HEM, J. D. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Washington: United States Geological Survey, 1985.

HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, v. 24, n. 6, p. 417–441, 1933.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. *factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses*. R package version 1.0.7, 2020.

LAMBRaKIS, N.; ANTONAKOS, A.; PANAGOPOULOS, G. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. *Water Resources Management*, v. 28, p. 1961–1978, 2014.

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Berkeley: University of California Press, 1967. p. 281–297.

MAECHLER, M. et al. *cluster: Cluster analysis basics and extensions*. R package version 2.1.4, 2022.

MARRA, R. C. Caracterização hidrogeoquímica de nascentes em áreas de chapadas sedimentares. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 15, n. 3, p. 1456–1474, 2022.

PEULVAST, J. P.; CLAUDINO-SALES, V. Stepped surfaces and palaeolandforms in the northern Brazilian Nordeste: constraints on models of morphotectonic evolution. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 62, p. 89–122, 2004.

PEREIRA, L. F. et al. Thermal behavior of groundwater springs as indicator of aquifer dynamics in sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, v. 29, p. 2157–2173, 2021.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

REVELLE, W. *psych: Procedures for psychological, psychometric, and personality research*. R package version 2.4.3, 2024.

ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53–65, 1987.

SILVA, A. C.; SOUZA, M. J. N.; GUERRA, A. J. T. Caracterização hidrogeoquímica de nascentes em ambientes sedimentares do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 29, e18, 2024.

SPRINGER, A. E.; STEVENS, L. E. Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal*, v. 17, p. 83–93, 2009.

TÓTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, v. 68, n. 16, p. 4795–4812, 1963.

WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. New York: Springer, 2016.

XU, Y.; BEEKMAN, H. *Groundwater recharge estimation in southern Africa*. Paris: UNESCO, 2003.