



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

SUBSÍDIOS PARA GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS
HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA
– BAHIA

JAMILLE EVANGELISTA ALVES

SALVADOR

2022

**SUBSÍDIOS PARA GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS
HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA
– BAHIA**

Jamille Evangelista Alves

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutora em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de Ciências e
Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI - UFBA.

A474 Alves, Jamille Evangelista

Subsídios para gestão integrada dos recursos hídricos na
Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - BA/ Jamille Evangelista
Alves. – Salvador, 2022.

70 f.

Orientador: Prof. Dr Sérgio Augusto de Moraes Nascimento

Doutorado (Tese) – Universidade Federal da Bahia.
Instituto de Geociências, 2022.

1. Bacia hidrográfica. 2. Hidrogeoquímica. 3. Hidrologia. I.
Nascimento, Sérgio Augusto de Moraes. II. Universidade
Federal da Bahia. III. Título.

CDU 556.5

JAMILLE EVANGELISTA ALVES

**“SUBSÍDIOS PARA GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS
HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA –
BAHIA”**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutora em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 12/08/2022.

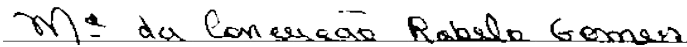
APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA:



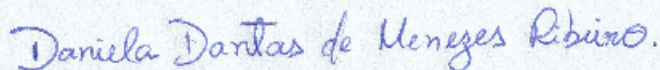
Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento.
Orientador (UFBA)



Dr. Harald Rene Klammler (UFBA)



Dra. Maria da Conceição Rabelo Gomes (UEPA)



Dra. Daniela Dantas de Menezes Ribeiro (Autônoma)



Dra. Rosa Alencar Santana de Almeida (UFRB)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES – Código de financiamento 001.

Agradeço esse trabalho a Deus por me permitir concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais pelo amor, carinho e apoio diário. A minha amada filha, Anna Lis, raio de sol em minha vida. Ao meu companheiro, Thiago Gonçalves, pelo apoio e incentivo.

Ao professor Sérgio Nascimento pela orientação apesar das grandes dificuldades do período da pandemia de covid-19. Ao IGEO/UFBA, ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e Ambientais (NEHMA), e ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Geologia da UFBA.

À Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) pelo acesso aos dados utilizados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio em forma de bolsa, Processo 142241/2017-2.

Aos revisores anônimos das revistas em que os artigos foram submetidos e a banca examinadora por seus comentários e sugestões para melhorar a qualidade dos manuscritos.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC), situada no litoral Sul do Estado da Bahia, teve como objetivo contribuir com fundamentação científica para orientar a gestão integrada dos recursos hídricos na referida área. Foram desenvolvidos dois artigos científicos divulgados nos periódicos: Anuário do Instituto de Geociências e Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais. No primeiro artigo, intitulado “*Intervening factors in the groundwater salinization process, Cachoeira River Basin, Northeastern Brazil*” diagramas hidrogeoquímicos e estatística multivariada foram aplicados com o intuito de identificar os fatores que potencialmente influenciam na salinidade das águas no aquífero cristalino da região de estudo. Os dados utilizados foram provenientes do banco de dados hidrogeológicos da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB). As águas subterrâneas foram classificadas predominantemente como cálcica-bicarbonatada com salinidade variando entre doce e salobra. O cátion que prevalece na região é o Ca^{2+} , enquanto o carbonato e bicarbonato correspondem aos ânions dominantes. Com a análise fatorial foi possível reconhecer dois fatores que explicam, aproximadamente 93% da variância total dos dados. A análise de agrupamentos hierárquica resultou em cinco grupos distintos baseados nas concentrações dos íons dissolvidos. Este estudo indica que os mecanismos naturais que controlam a composição química das águas subterrâneas estão relacionados, principalmente, com o intemperismo das rochas associadas a contribuições da evaporação, e os parâmetros mais significativos na variabilidade da salinidade das águas são o Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , $\text{Fe}_{(\text{total})}$, Cl^- . O segundo artigo teve como título “Precipitação na Bacia do Rio Cachoeira: Variabilidade e Tendências (1970 – 2020)”, este estudo teve como objetivo identificar tendências e variabilidade pluviométricas. Os dados utilizados compreendem séries históricas de precipitações totais mensais de seis estações pluviométricas para o período de 1970 a 2020 (51 anos) obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os testes de Mann-Kendall, Spearman’s Rho e Sen’s slope foram aplicados de maneira satisfatória permitindo a identificação de tendências significativas e magnitude da precipitação. A análise mostrou que tendências estatisticamente não significativas prevalecem na área. Contudo, foi identificada tendência negativa significativa na região centro-oeste em duas estações pluviométricas que caracterizam uma redução em torno de 300 mm de chuva no período estudado. Períodos com extremos de seca/umidade foram reconhecidos e comparados com as fases do ENOS onde identificou-se que 62,5% dos eventos de seca e 42,9% dos eventos chuvosos podem ser relacionados com os fenômenos *El Niño/La Niña*, respectivamente. Com o valor do coeficiente de variação foi reconhecido baixa variabilidade da precipitação na porção leste e elevada variabilidade na parte oeste da área. Os resultados obtidos podem ser utilizados como referência para a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Gestão de recursos hídricos. Hidrogeoquímica. Hidrologia.

ABSTRACT

The present work carried out in the Cachoeira River Basin (CRB), located in the southern portion of the State of Bahia, aimed to contribute with scientific foundations that make it possible to guide the integrated management of water resources in that area. Two scientific articles published in the journals were developed: *Anuário do Instituto de Geociências* and *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*. In the first article, entitled “Intervening factors in the groundwater salinization process, Cachoeira River Basin, Northeastern Brazil”, hydrogeochemical diagrams and multivariate statistics were applied in order to identify the factors that potentially influence the salinity of the waters in the crystalline aquifer of the study region. The data used came from the hydrogeological database of the Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia (CERB). Groundwater was predominantly classified as calcium-bicarbonate with salinity ranging from sweet to brackish. The cation that prevails in the region is Ca^{2+} , while carbonate and bicarbonate correspond to the dominant anions. With the factor analysis it was possible to recognize two factors that explain approximately 93% of the total variance of the data. Hierarchical cluster analysis resulted in 5 distinct clusters based on dissolved ion concentrations. This study indicates that the natural mechanisms that control the chemical composition of groundwater are mainly related to the weathering of rocks associated with evaporation contributions, and the most significant parameters in the variability of water salinity are Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , $\text{Fe}(\text{total})$, Cl^{-} . The second article was entitled "Precipitation in the Cachoeira River Basin: Variability and Trends (1970 - 2020)", this study aimed to identify rainfall trends and variability. The data used comprise historical series of total monthly rainfall from six rainfall stations for the period from 1970 to 2020 (51 years) obtained from the Hydrological Information System (HidroWeb) of the Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). The Mann-Kendall, Spearman's Rho and Sen's slope tests were satisfactorily applied, allowing the identification of significant trends and precipitation magnitude. The analysis showed that statistically non-significant trends prevail in the area. However, a significant negative trend was identified in the central-west region in two rainfall stations that characterize a reduction of around 300 mm of rain in the studied period. Periods with extreme drought/humidity were recognized and compared with ENSO phases where it was identified that 62.5% of drought events and 42.9% of rainy events can be related to El Niño/La Niña phenomena, respectively. With the coefficient of variation, low rainfall variability was recognized in the eastern portion and high variability in the western portion of the area. The results obtained can be used as a reference for the management of water resources in the river basin.

Keywords: Hydrogeochemistry. Hydrographic basin. Hydrology. Water resources management.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	7
CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1: INTERVENING FACTORS IN THE GROUNDWATER SALINIZATION PROCESS, CACHOEIRA RIVER BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL.....	13
CAPÍTULO 3 - ARTIGO 2: PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA, NORDESTE DO BRASIL: TENDÊNCIAS E VARIABILIDADE (1970 – 2020)	35
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES.....	59
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES.....	61
ANEXO A - REGRAS DE FORMATAÇÃO DO ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – ARTIGO 1.....	62
ANEXO B - REGRAS DE FORMATAÇÃO DO BOLETIM DO MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI. CIÊNCIAS NATURAIS – ARTIGO 2.....	66
ANEXO C – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 1.....	69
ANEXO D – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 2.....	70

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

A água é um bem indispensável a vida e um insumo importante para produção de alimentos e de desenvolvimento econômico e social. A disponibilidade da água em quantidade e qualidade sustentável é ameaçada por diversos fatores, entre eles destacam-se a intensificação de atividades antrópicas relacionadas ao crescimento populacional e os eventos associados a mudanças climáticas (Kahsay et al., 2018). De acordo com Esteves (2011) os usos que demandam maiores volumes de água são a irrigação para produção de alimentos (70%), o uso industrial (23%) e o uso doméstico (7%).

O Brasil tem uma condição privilegiada em relação à reserva de água doce quando comparada com a maioria dos países. Porém essa água não tem uma distribuição igualitária ao longo do seu território. Em algumas regiões do país existe uma escassez efetiva e em outras os problemas estão relacionados à redução da qualidade da água disponível (Agência Nacional de Águas e Saneamento, 2013).

A compreensão de que a gestão dos recursos hídricos é um desafio mundial e que o uso inadequado pode reduzir a disponibilidade atual e futura vem impulsionando discussões a respeito de melhores possibilidades de desenvolvimento e utilização desses recursos além do fortalecimento de políticas para enfrentamento desse desafio.

A gestão dos recursos hídricos no Brasil se baseia na aplicação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelecida pela Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (Brasil, 1997) a qual criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e estabeleceu que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do SINGREH.

Desta maneira, a gestão integrada dos recursos hídricos é uma necessidade originada pela complexidade das interações entre as diversas utilizações da água e as consequências sociais, econômicas e ambientais daí decorrentes (Hipólito & Vaz, 2017). Segundo Cunha et al. (1980), a

gestão dos recursos hídricos visa utilizar esses recursos para obter o máximo benefício para a coletividade, assegurando paralelamente a sustentabilidade da sua utilização.

Compreende-se que a sustentabilidade de um ecossistema depende de uma adequada exploração e gestão dos recursos naturais. Lorandi e Cançado (2002) enfatizam que o gerenciamento de uma bacia está diretamente relacionado ao planejamento adequado do uso dos seus recursos, integrando as atividades antrópicas que ali ocorrem. Desta forma, para o planejamento de bacias hidrográficas é necessária uma visão integrada da ação antrópica sobre os recursos hídricos visando sua conservação e/ou a preservação (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2012) considerando ainda o planejamento de intervenções para o uso do solo (Freitas, 2000).

A área desse estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC) que possui uma superfície de drenagem com cerca de 4600 km² e está localizada no litoral Sul do Estado da Bahia, região Nordeste do Brasil. Agrupa os principais municípios desta região (Firmino Alves, Santa Cruz da Vitória, Floresta Azul, Ibicaraí, Jussari, Itapé, Itororó, Itaju do Colônia, Itabuna e Ilhéus) e tem população estimada em, aproximadamente, 600 mil habitantes.

A BHRC é marcada por uma acentuada degradação, resultante de transformações no uso e ocupação do solo e o conseqüente avanço das áreas de pasto sobre a Mata Atlântica, desde o início do século XX. A degradação ambiental desta bacia, somada às mudanças climáticas têm colocado em risco a segurança hídrica da região. A alta vulnerabilidade hídrica da BHRC se tornou mais evidente no biênio 2015/2016, quando a região sofreu uma seca prolongada que resultou numa crise hídrica sem precedentes (UFSB, 2021).

Trabalhos realizados na BHRC indicam que, em função do nível de salinidade, as águas apresentam uma série de limitações com relação ao uso. Santos et al. (2009), através de estudos hidrogeoquímicos, observou que a geologia e o déficit hídrico são os principais fatores na determinação dos níveis de salinidade na bacia do rio Salgado, um dos afluentes do rio Cachoeira. Figueiredo (2005) afirma existir de médio a alto potencial de risco de salinização dos solos na bacia do rio Cachoeira quando as águas são empregadas na irrigação, principalmente, na região da sub-bacia do rio Colônia.

Nesta região o abastecimento urbano é suprido basicamente por pontos de captação superficiais localizados em represas (Cardoso et al., 2020; Sousa et al., 2018), enquanto, de acordo com

informações disponibilizadas nas fichas de descrição dos poços, as áreas rurais e centros industriais utilizam poços tubulares.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) publicou relatório recomendando que a região adotasse novos mananciais para abastecimento e adequasse o sistema já existente (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2010) tendo em vista que em termos de disponibilidade hídrica, a BHRC apresenta uma significativa variação espacial e temporal das vazões decorrente dos níveis de precipitação.

O uso da água subterrânea na BHRC tem sido limitado devido a ocorrência de águas salinas em alguns dos seus setores e, segundo Engelbrecht et al. (2019), em decorrência da escassez de estudos na Bacia do Rio Cachoeira, inexistem subsídios técnicos para o planejamento e manejo dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

A gestão dos recursos hídricos é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver questões de escassez relativa aos corpos hídricos (Gomes, 2013). E embora, a gestão da escassez dependa de medidas de planejamento e políticas públicas, o desenvolvimento de conhecimento científico é essencial para o embasamento de projetos necessários a redução dos seus efeitos (Cirilo et al., 2007). Assim, o objetivo desta pesquisa é contribuir com fundamentação científica que possibilite orientar a gestão integrada dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira.

Os objetivos específicos são (i) Identificar os fatores que determinam a salinização das águas subterrâneas da região através da integração de estudos estatísticos multivariados e hidrogeoquímicos; (ii) Analisar tendências e variabilidade pluviométrica utilizando série temporal de precipitação através de métodos estatísticos não paramétricos com o intuito de contribuir com a ampliação do conhecimento sobre as chuvas identificando possíveis alterações no regime pluviométrico da bacia.

A realização desta pesquisa é fundamentada na necessidade de aplicação de políticas hídricas e ambientais que organizem e proporcionem controle, preservação e sustentabilidade, assim como a análise de medidas que visem promover a redução da degradação com a finalidade de tornar sustentável o sistema hídrico na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira.

Os resultados aqui produzidos podem ser utilizados no planejamento da gestão integrada dos recursos hídricos e contribuir para solucionar ou amenizar a problemática da oferta de água,

consequência do crescimento populacional, ocupação desordenada, escassez de informação atualizada e descentralização dos órgãos de gestão e planejamento.

Os resultados desta pesquisa foram divulgados nos periódicos: (i) Anuário do Instituto de Geociências (ISSN: 1982-3908), (ii) Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais (ISSN:1981-8114).

Referências

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico 2013, 'Alternativas organizacionais para gestão de recursos hídricos'. Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, vol.3, Brasília.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico 2010, 'Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado vol. 2', Engecorps/Cobrape, Brasília.
https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/index.html

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico 2012, Planejamento, manejo e gestão de bacias. Acesso em 6 jun. 2022, <<http://dspace.agencia.gov.br:8080/conhecerhana/2560>>

Brasil. Lei n° 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Da política Nacional de Recursos Hídricos. Acesso em: 15 mai. 2022, <[Cardoso, S.B., Da Cunha, C.F., Engelbrecht, B.Z. & Chang, H.K. 2020, 'Detecção e delimitação de pequenos reservatórios na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Bahia, utilizando imagens multiespectrais', *Holos Environment*, vol. 20, no. 4, pp. 458-75. <https://doi.org/10.14295/holos.v20i4.12391>](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%209.433%2C%20DE%208%20DE%20JANEIRO%20DE%201997.&text=Institui%20a%20Pol%C3%A Dtica%20Nacional%20de,Federal%2C%20e%20altera%20o%20art.>></p>
</div>
<div data-bbox=)

Cirilo, J. A., Cabral, J. J. S. P., Ferreira, J. P. C. L., Oliveira, M. J. P. M., Leitão, T. E., Montenegro, S. M. G. L., Góes, V. C. 2007, *O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semi-áridas*. Editora Universitária UFPE, Recife.

Cunha, L. V., Costa, A. S., Gonçalves, V. & Correia, M. L. 1980, *A gestão da água*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

- Engelbrecht, B. Z., Gonçalves, R. D.; Teramoto, E. H. & Chang, H. K. 2019, 'Disponibilidade hídrica e balanço hídrico da bacia do rio cachoeira na região de Itabuna / Ba', *Revista Geociências Unesp*, vol. 38, no. 3, pp. 731 - 740. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13806>
- Esteves, F. A. 2011, *Fundamentos de limnologia*. 3ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- Figueiredo, A. F. R. 2005, 'Análise do risco de salinização dos solos da bacia hidrográfica do rio Colônia Sul da Bahia', Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz. http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=146272
- Freitas, A. J. 2000, Gestão de recursos hídricos. In: Silva, D. D. Pruski, F.F. (ed.) Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos.
- Gomes, M. da C. R. 2013, 'Análise situacional qualitativa sobre as águas subterrâneas de fortaleza, Ceará – Brasil como subsídio à gestão dos recursos hídricos', Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/17482>
- Hipólito, J. R. & Vaz, A. C. 2017, *Hidrologia e Recursos Hídricos*. IST Press, 3^a ed.
- Kahsay, K. D., Pingale, S. M. & Hatiye, S.D. 2018, 'Impact of climate change on groundwater recharge and base flow in the sub-catchment of Tekeze basin, Ethiopia'. *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 6, pp. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.002>
- Lorandi, R. & Cançado, C. J. 2002, 'Parâmetros físicos para gerenciamento de bacias hidrográficas'. In: Schiavetti, A.; Camargo, A. F. M. (Eds.) Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações. Ilhéus, BA: Editus.
- Santos, J.S., Santos, M.J.S. & Santos, M.L.P. 2009, 'Parâmetros indicativos do processo de salinização em rios urbanos do semiárido brasileiro', *Quim. Nova*, vol. 32, no. 6, pp. 1534-8. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600033>
- Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação 1999, *Projeto RADAMBRASIL, Folha SD.24 – Salvador*, Potencial dos Recursos Hídricos, Rio de Janeiro.

Sousa, L.F., Soares, B.B. & Santana, R.O. 2018, 'Dimensionamento hidrológico para reservatório a fim de sanar as necessidades hídricas de Itabuna-BA', *Estação Científica (UNIFAP)*, vol. 8, no. 2, pp. 69-79. <http://dx.doi.org/10.18468/estcien.2018v8n2.p69-79>

UFSB. Universidade Federal do Sul da Bahia. 2021, Gestão Integrada e Participativa de Bacias Hidrográficas. Acesso em: 15 jan. 2022 <https://ufsb.edu.br/a-ufsb/assessorias/assus/apresentacao?view=article&id=3043;projeto-cachoeira&catid=344>

CAPÍTULO 2

ARTIGO I – INTERVENING FACTORS IN THE GROUNDWATER SALINIZATION PROCESS, CACHOEIRA RIVER BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL

Abstract

Hydrogeochemical diagrams and multivariate statistics were applied herein to identify the factors that potentially influence the salinity of water in the crystalline aquifer of the Cachoeira River Basin region, located in the southern portion of the State of Bahia. Data from the hydrogeological database of the Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB) were applied. The groundwater was predominantly classified as calcium-bicarbonate, with salinity levels ranging from fresh to brackish. The cation that prevails in the region is Ca^{2+} , while carbonate and bicarbonate are the dominant anions. Factor analysis enabled the determination of two factors that explain approximately 93% of the total variance of the data. Hierarchical cluster analysis resulted in five distinct groups based on dissolved ion concentrations. This study indicates that the natural mechanisms that control the chemical composition of groundwater are mainly related to the weathering of rocks and evaporative processes, with the most significant parameters related to the variability of water salinity being Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Fe (total), and Cl^- .

Keywords: Crystalline aquifer; Hydrogeochemistry; Multivariate statistics

Resumo

Diagramas hidrogeoquímicos e estatística multivariada foram aplicados com o objetivo de identificar os fatores que potencialmente influenciam na salinidade das águas no aquífero cristalino da região que engloba a bacia hidrográfica do rio Cachoeira, situado na porção sul do Estado da Bahia. Os dados utilizados são provenientes do banco de dados hidrogeológicos da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB). As águas subterrâneas foram classificadas predominantemente como cálcica-bicarbonatada com salinidade variando entre doce e salobra. O cátion que prevalece na região é o Ca^{2+} , enquanto o carbonato e bicarbonato correspondem aos ânions dominantes. Com a análise fatorial foi possível reconhecer dois fatores que explicam, aproximadamente 93% da variância total dos dados. A análise de agrupamentos hierárquicos resultou em 5 grupos distintos baseados nas concentrações dos íons dissolvidos. Este estudo indica que os mecanismos naturais que controlam a composição química das águas subterrâneas estão relacionados, principalmente, com o intemperismo das rochas associadas a contribuições da evaporação, e os parâmetros mais significativos na variabilidade da salinidade das águas são o Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Fe (total), Cl^- .

Palavras-chave: Aquífero cristalino; Estatística multivariada; Hidrogeoquímica

1 Introduction

The chemical composition of groundwater is influenced by several factors such as the rock type, water residence time in the aquifer, mineral dissolution rate, and geochemical processes that occur along the flow (Appelo & Postma 2005). Many studies relate the water–rock interactions to the chemical composition of the groundwater, as the components define its quality. In this context, Gomes & Franca (2019) state that the studying the groundwater chemistry can provide information on anthropogenic interference and dissolution/precipitation processes. Water salinization, a frequent problem in northeastern Brazil, can affect freshwater reservoirs, and poses a risk for human health and to many natural systems (Alves et al. 2021). The literature (Fontes et al. 2015; Guo et al. 2018; Jia et al. 2020) highlights that salinization occurs as a function of climatic conditions, reservoir age, rock solubility, marine aerosol deposition, etc.

Studies carried out in the Cachoeira River Basin (CRB) indicate that, owing to the level of salinity, the waters only have a limited usability. Paula, Rego & Santos (2008), through hydrogeochemical studies, observed that the geology and water deficits are the main factors that determine salinity levels in the Salgado River Basin, a tributary of the Cachoeira River. Figueiredo (2005) stated that there is a medium to high potential for the risk of salinization of soils in the Cachoeira River Basin when the water is used for irrigation, mainly in the sub-basin region of the Colônia River. In this region, urban water supply occurs through superficial catchment points along dam reservoirs (Cardoso et al. 2020; Sousa, Soares & Santana 2018), while according to information provided in the well description sheets, rural areas and industrial centers use tubular wells. The Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) published a report that recommended the adoption of new water sources in the region and adaptation of the existing system (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico 2010), considering that in terms of water availability, the CRB presents significant spatial and temporal variations in flows owing to rainfall levels.

The CRB's groundwater use has been limited because of the occurrence of saline water in some of its sections, and according to Engelbrecht et al. (2019), owing to the lack of studies on the CRB, there are no technical guidelines for the planning and management of surface and underground water resources, with uncertainties persisting as to the volume of water that can be exploited in a sustainable manner. However, it is believed that these waters constitute a relevant

resource, mainly in dry periods, because despite having a medium hydrogeological potential, they are very important, considering that they cover a large area (Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação 1999).

Hence, the objective of the present study is to identify the groundwater salinization factors in the Cachoeira River Basin, Bahia (Brazil) through the integration of multivariate statistical and hydrogeochemical studies. This can help define the variables that result in salinization, benefiting the qualitative management of waters and enabling the maximization of the integrated use of the region's water resources.

2 Study Area

The CRB, located in the northeastern Brazil, has an area of approximately 4,500 km², and covers 10 municipalities (Firmino Alves, Santa Cruz da Vitória, Floresta Azul, Ibicarai, Jussari, Itapé, Itororó, Itaju do Colônia, Itabuna, and Ilhéus) with approximately 600,000 inhabitants. The main watercourses that compose the CRB are the Colônia, Salgado, and Cachoeira rivers. The study area represents an important socio-ecological system for southern Bahia, as it contains medium and small locations with rural characteristics that are undergoing progressive urban and industrial growth. Agricultural activity consists of the shaded cultivation of cocoa in the Atlantic Forest areas and extensive cattle ranching in the Itabuna–Itapetinga Depression (Paula, Silva & Souza 2012).

Located in the eastern portion of the São Francisco Craton, the area is part of the geological domain of the Itabuna–Salvador–Curaçá Belt that formed during the Paleoproterozoic as a result of the collision between the Gavião, Jequié, and Serrinha blocks. Currently, this region is completely eroded in the central portion, with an exposed crystalline basement of high-grade metamorphic rocks (Vlach & Lama 2002). The Itabuna Belt consists of granulitic rocks with predominant tonalitic, trondhjemitic and gabbroic compositions. Kinzigitic gneisses, quartzites, iron formations, manganese formations, and a barite outcrop in tectonic intercalations of a tectonic nature also exist (Barbosa & Dominguez 1996). The mineralogical composition of the main lithologies of the Itabuna Belt was provided by Barbosa et al. (2003).

Due to regional geological conditions, the hydrogeological domain of crystalline rocks constitutes a fissure aquifer in the basin area. Hydrogeologically, these rocks function as

reservoirs that have secondary permeability, with water circulation occurring through fractures and open and interconnected joints. The aquifer's recharge mostly occurs from the infiltration of meteoric waters (Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação 1999). Previous studies have revealed a considerable hydrogeochemical versatility in the composition of groundwater in the BHRC area (Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação 1999; IBGE 2013; Teramoto et al. 2018). These studies identified the presence of bicarbonate (sodium, mixed, calcium), sodium (mixed), chlorinated (mixed), and sulfated (mixed) facies in the granulitic rocks. Notably, the granulitic rocks of the Itabuna Belt are predominant in the area and have important hydrogeological potential. In other lithologies, only bicarbonate (sodium and calcium) facies have been classified.

In the study area, three distinct climatic domains can be identified according to the Koppen classification: humid tropical climate (Af), monsoon climate (Am), and tropical climate with dry winter season (Aw), with an average annual precipitation of 800 mm. The water deficit presents considerable variations from the upper course of the basin (highest levels) towards the coast.

The predominant soil classes in the area include haploid chernossol, eutrophic red–yellow argisol, dystrophic red–yellow argisol, dystrophic red–yellow latosol, dystrophic yellow latosol, and hydromorphic spodosol. The main chemical attributes of soils are available from Nacif (2000), whose studies have indicated the presence of vermiculite and smectite clays in chernosol, and kaolinite in argisols and yellow latosols, while in the red–yellow latosol, there is the presence of gibbsite. X-ray diffractometry performed on the chernosol silt fraction (B horizons) has revealed the presence of plagioclases, nepheline, biotite and quartz.

3 Materials and Methods

The present study was developed from the compilation of 19 groundwater samples from a crystalline aquifer provided by the Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB) distributed at the CRB. The Resolution of the Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) No. 357 of March 17, 2005 (Conselho Nacional do Meio Ambiente 2005), which provides guidelines for the classification of water bodies adopts definitions for the classification of fresh, brackish, and saline waters. This classification was used herein, using Qualigraf software version 1.17 (Mobus 2014), to calculate salinity using total dissolved solids (TDS)

levels. The ionic classification of waters was performed using the Piper's triangular diagram (Piper 1944).

The origin of the chemical composition of groundwater was identified using the method proposed by Gibbs (1970), where the relationship between the cations Ca^{2+} and Na^+ and the anions Cl^- and HCO_3^- versus TDS is plotted in a diagram to identify the natural mechanisms responsible for the composition of water: atmospheric precipitation, weathering, and evaporation. This method was chosen owing to its frequent application in the literature (Aghazadeh, Chitsazan & Golestan 2017; Hui et al. 2021; Kumar et al. 2015). The chloro-alkaline indices (CAI) were applied to investigate the occurrence of ionic exchange reactions that generally occur between clay minerals, and the permanence or movement of groundwater in the aquifer (Tarawneh, Janardhana & Ahmed 2019). Positive index values indicate the involvement of direct ion exchange reactions (base exchange) and negative index values suggest reverse ion exchange (chloro-alkaline imbalance) (Zhang et al. 2020).

The speciation modeling and saturation index (SI) calculations were developed using PHREEQC Interactive software version 3.6.2 (Parkhurst & Appelo 2013). Changes in the saturation state were used to identify important reactions in the control for the composition of water (Trabelsi & Zouari 2019). When the SI values are positive, there are appropriate physical and chemical conditions for the precipitation of mineral phases, that is, the groundwater is supersaturated in relation to a specific mineral. Otherwise, when the SI is negative, the dissociated products do not precipitate owing to the undersaturated condition (Chidambaram et al. 2011).

To identify the groups of variables that interrelate and result in the salinization of the waters, multivariate statistics were applied through the factor analysis technique. Cloutier et al. (2008) and Gomes & Franca (2019) applied this technique in different regions as a qualitative water management tool. Multivariate statistical analysis was performed using SPSS Statistics version 27 and Minitab version 19 software. Hierarchical cluster analysis was applied to classify the groups based on their similarities. To that end, standardized variables, the Ward connection method (minimum variance method) and the Euclidean Distance for the formation of the similarity matrix were used (Palácio et al. 2009).

4 Results and Discussion

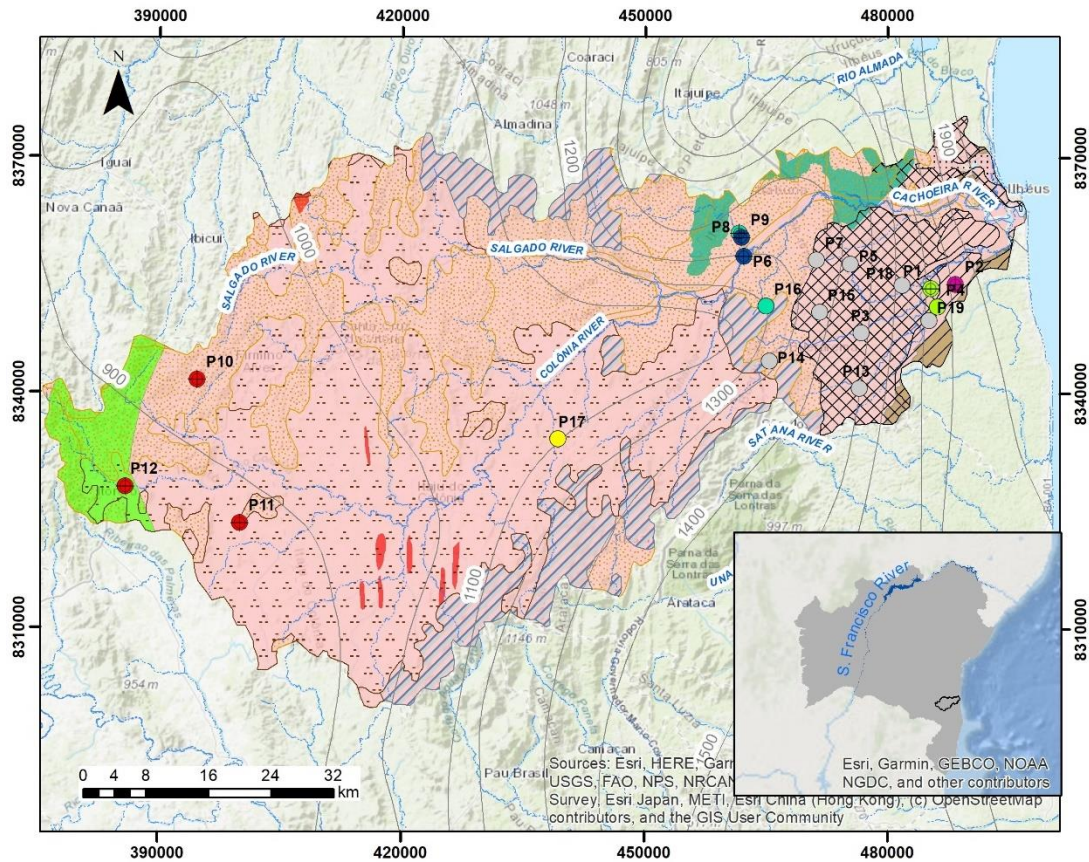
4.1 Hydrogeochemistry

A descriptive summary of the analyzed parameters is presented in Table 1. The variables exhibited a high level of dispersion evidenced by the high values of standard deviation, as well as strong asymmetry. The pH varied between 4.88 and 8.78, indicating the presence of acidic to slightly alkaline groundwater. The electrical conductivity (EC) varied between 75.80 and 9440.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, with an average value of 1838.43 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 21.05% of the studied samples had an EC up to 250.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 36.84% had values between 250.00 to 750.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, and 42.11% had values above 750.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, indicating the wide variation in the concentration of salts dissolved in the groundwater. Salinity, represented by the total dissolved solids (TDS), presented the following classification: 57.90% of the waters were fresh and 42.10% were brackish.

Table 1 Descriptive summary of the analyzed parameters.

Parameter	N	Average	Median	Minimum	Maximum	Variance	Standard deviation
EC	19	1838.43	647.90	75.80	9440.00	7344306.50	2710.40
pH	19	7.30	7.33	4.88	8.78	1.01	1.01
TH	19	641.18	106.00	16.40	4960.00	1659052.31	1288.04
Turbidity	19	18.93	3.35	0.00	135.00	1417.38	37.65
Acidity	19	2.96	1.10	0.00	16.30	25.47	5.05
TDS	19	1195.01	421.10	49.30	6136.00	3102978.97	1761.53
Na ⁺	19	142.68	73.60	8.00	456.00	22282.63	149.27
K ⁺	19	8.91	2.46	1.00	55.50	256.65	16.02
Ca ²⁺	19	327.34	62.20	3.60	2230.00	380641.53	616.96
Mg ²⁺	19	76.15	12.30	2.00	662.00	27181.16	164.87
CO ₃ ²⁻	19	6.60	0.00	0.00	64.50	283.33	16.83
HCO ₃ ⁻	19	205.74	162.00	12.30	506.00	22235.65	149.12
Cl ⁻	19	391.27	18.20	5.47	2280.00	493699.50	702.64
SO ₄ ²⁻	19	139.75	7.16	0.68	1860.00	177510.39	421.32
F ⁻	19	1.01	0.27	0.00	7.18	3.52	1.88
NO ₂ ⁻	19	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01
NO ₃ ⁻	19	0.14	0.05	0.00	1.18	0.08	0.28
SiO ₂	19	47.82	53.90	0.80	92.20	668.28	25.85
Fe _{total}	19	1.63	0.39	0.06	9.81	7.41	2,72

It was identified that the hydrochemistry in the crystalline aquifer presented a considerably varied classification (Figure 1). The waters were classified as calcium-bicarbonate (42.1%), calcium-chloride (15.8%), mixed-chloride (10.5%), sodium-chloride (10.5%), sodium-bicarbonate (10.5%), sodium-mixed (5.2%) and mixed-mixed (5.2%). This wide variation suggests that various chemical processes occur in the subsurface.



Cartograph conventions

- Cachoeira River Basin
 - Isohyet line
 - Rivers
- | | | |
|--|---|--|
| <p>Water class according Piper diagram</p> <ul style="list-style-type: none"> Calcium-Bicarbonate Calcium-Chloride Mixed-Chloride Mixed-Mixed Sodium-Chloride Sodium-Bicarbonate Sodium-Mixed | <p>Water class - TDS</p> <ul style="list-style-type: none"> Fresh Water Brackish Water <p>Geology - lithology</p> <ul style="list-style-type: none"> Mafic/ ultramafic rocks Undifferentiated granulites Sedimentary cover Syenites Orthogneiss | <p>Soils Brazilian class</p> <ul style="list-style-type: none"> Dystrophic red-yellow argisol Eutrophic red-yellow argisol Haploid chernossol Hydromorphic spodosol Dystrophic yellow latosol Dystrophic red-yellow latosol |
|--|---|--|

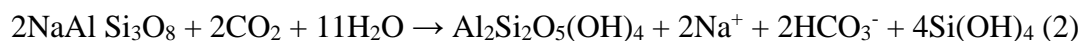
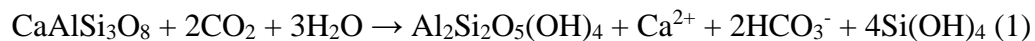
Figure 1 Simplified geological map of the study area showing analyzed wells, soil classes, and water classification based on total dissolved solids and Piper diagram, and the isohyet line.

Calcium-bicarbonate waters (P3, P5, P7, P13, P14, P15, P18, and P19), classified as fresh, were identified in the eastern portion of the basin, a region with a high rainfall rate influenced by the Af climate. Calcium-chloride waters (P10, P11, and P12) were noted in the western portion of the area with an Aw climate, presenting the highest levels of TDS among the analyzed wells and

characterized brackish waters. The mixed-mixed water (P17) was found in the central portion of the basin, with Am climate, showing the lowest TDS content.

From the analysis of ionic relationships, calcium is the cation that prevails in the region, while carbonate and bicarbonate are the dominant anions. Calcium was mostly found in the form of Ca^{+2} and secondarily as CaCO_3 . Carbon, present in the bicarbonate anion, predominantly occurred in the HCO_3^- form and to a lesser extent as CO_2 , CO_3^{2-} , and CaCO_3 .

Trabelsi & Zouari (2019) linked the sources of bicarbonate concentrations in groundwater to the dissolution of carbonate minerals, and CO_2 from soils or bacterial degradation of organic contaminants. Teramoto & Chang (2020), when considering the absence of carbonate rocks in the CRB area, argued that the presence of HCO_3^- , the main anion in the groundwater, indicated water–rock interactions. As the substrate of the area predominantly corresponds to granulites of tonalitic, trondhjemitic, or gabric composition with mineralogical assemblages of hornblende and plagioclase, the reactions presented in Equations 1, 2 (plagioclase hydrolysis), and 3 (amphibole hydrolysis) represent the water–rock interactions wherein HCO_3^- is produced by the hydrolysis of silicates:



The presence of chlorinated waters, according to Gomes & Cavalcante (2017), is related to marine aerosol deposition and evaporation, which increase the chloride concentration in the groundwater, favored by the proximity to the Atlantic Ocean. In studies carried out by Engelbrecht et al. (2019) it was identified that evapotranspiration rates in the CRB area are up to 85%, indicating that this is an important factor. Thus, the concentrations of Cl^- , as well as Na^+ , SO_4^{2-} , and Mg^{2+} , can be related to the interaction of precipitated meteoric waters with marine aerosols and subsequent evaporation (Teramoto et al. 2019).

Santos, Santos & Santos (2009) indicated that Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} are important indicative parameters of the process of concentration by the evaporation of chemical species dissolved in

the waters of superficial reservoirs in the Brazilian semiarid region. Araújo et al. (2015) and Teramoto & Chang (2020) verified that the number of marine aerosols deposited in different sampling points of the Cachoeira River is significant, accounting for significant fluxes of Na^+ , Mg^{2+} , and Cl^- ions. However, as per the reactions presented in Equations 1 to 3, the presence of Ca^{2+} , Na^+ , and Mg^{2+} ions can also result from the hydrolysis of silicates.

The Gibbs diagram (Figure 2) indicates that the natural mechanisms that control the major ionic composition of groundwater in the study area are related to rock weathering and evaporation. The freshwater samples classified as calcium-bicarbonate are associated with granulites and latosols. Bicarbonate, the dominant anion in the area, has its source associated with the water–rock interactions through the hydrolysis reaction of silicates, or as described in the Gibbs diagram, with the weathering of rocks. Evaporation is the dominant process that controls the composition of the brackish water samples classified as calcium-chloride in this study.

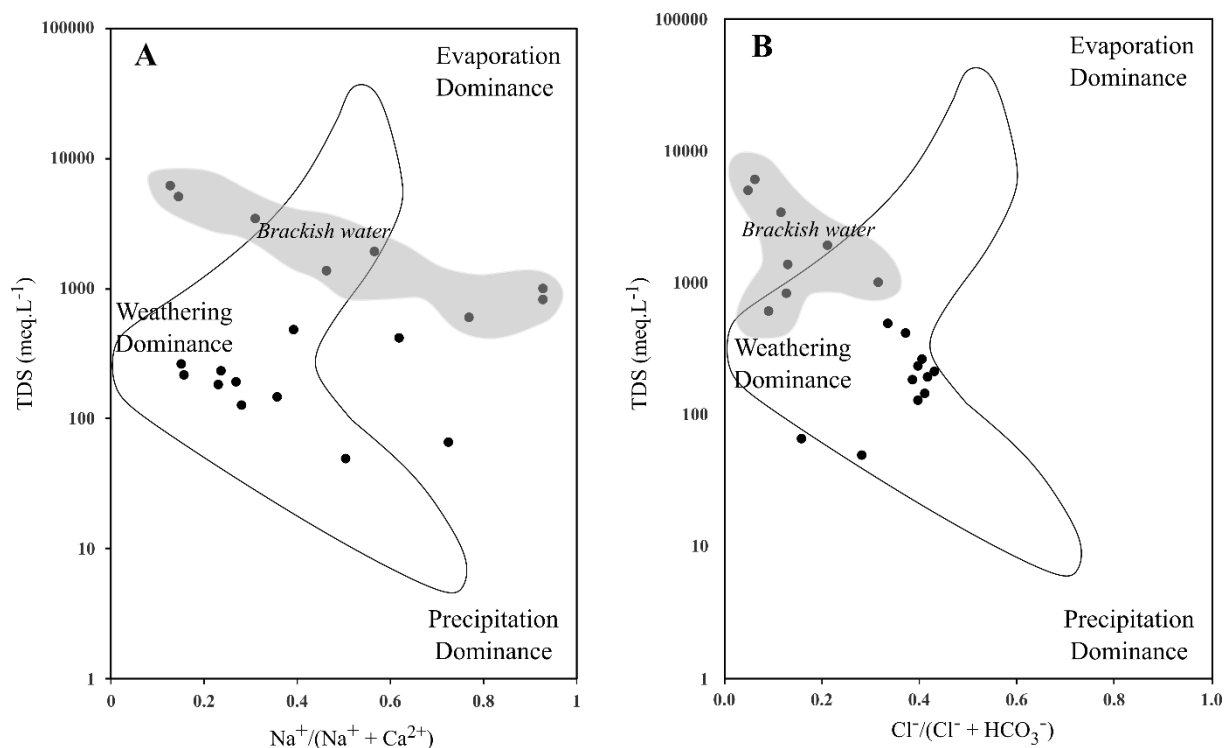


Figure 2 Gibbs diagram indicating the mechanisms that determine the main ionic composition of the waters: A. TDS versus Gibbs's ratio I; B. TDS versus Gibbs's ratio II.

The groundwater in the study area was characterized with positive and negative values of CAI-I and CAI-II (Table 2). At 4 sites, CAI-I and II were found to be positive, indicating direct ion exchange, and at 15 sites, CAI-I and II were negative, indicating a reverse exchange reaction.

Table 2 Calculated parameters for the assessment of hydrochemical processes.

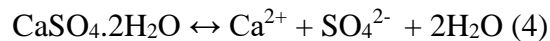
Wells	$CAI - I = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}$	$CAI - II = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{(SO_4^{2-} + HCO_3^- + NO_3^-)}$
P1	-2.95	-0.94
P2	-1.67	-1.32
P3	-0.80	-0.13
P4	-25.33	-0.95
P5	-0.72	-0.15
P6	-0.08	-0.12
P7	-0.89	-0.36
P8	-0.24	-0.84
P9	0.48	2.77
P10	0.80	8.55
P11	0.34	0.90
P12	0.75	0.98
P13	-3.45	-0.40
P14	-2.68	-0.35
P15	-2.86	-0.51
P16	-0.55	-0.58
P17	-0.77	-0.35
P18	-1.55	-0.22
P19	-2.46	-0.17

During the direct ion exchange reaction, Na^+ ($\pm K^+$) ions from the surface of clay minerals are displaced by Ca^{2+} ($\pm Mg^{2+}$) ions present in the water, resulting in the enrichment of water in Na^+ ($\pm K^+$) (Alves et al. 2021). Direct ion exchange with clay materials is generally observed when water is being salinized (Slama & Bouhlila 2017). This situation was observed in samples P9, P10, P11 and P12. Theoretically, the Na^+ rich smectites from the aquifer matrix can provide the ions for the solution. In the reverse ion exchange reaction, the opposite occurs: part of the Ca^{2+} ($\pm Mg^{2+}$) ions present in clay minerals are exchanged for Na^+ ($\pm K^+$) and there is an increase in the concentration of Ca^{2+} ($\pm Mg^{2+}$) in the solution (Dinka 2019; Huang et al. 2018), as confirmed by the analysis of the ionic relationships of groundwater that identified Ca^{2+} as the predominant cation. According to Silva, Barbosa & Santos (2021) the reverse ion exchange process is a significant result of the weathering of silicates, which are common minerals in the study area.

Salts dissolved in their ionic form are responsible for the salinity of water, so the analysis of the chemical speciation parameters allows the identification of the elements that cause the

salinization of groundwater in the CRB area. Carbon was available in 73.68% of the samples in the form of HCO_3^- and in 21.05% as CO_3^{2-} . Calcium, chloride, fluoride, potassium, magnesium and sodium were found only in the following forms: Ca^{2+} , Cl^- , F^- , K^+ , Mg^{2+} , and Na^+ , respectively. Ferrous iron was prevalent as Fe^{2+} (78.95%), as well as $\text{Fe}(\text{OH})^{3-}$, $\text{Fe}(\text{OH})^+$, and $\text{Fe}(\text{OH})_2$. When in the ferric state (Fe^{3+}), it was found as $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (57.89%), $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, and $\text{Fe}(\text{OH})^4$, which according to Gomes et al. (2017), are insoluble forms that precipitate in case of a high turbidity.

The negative SI of the groundwater for halite, gypsum, fluorite, chrysotile, and siderite demonstrated the undersaturation of these minerals. The strong correlations between gypsum IS versus TDS (correlation coefficient $R^2 = 0.82$) and halite IS versus TDS (correlation coefficient $R^2 = 0.87$) indicate that these minerals remain dissolved during the flow of groundwater in the samples used in modeling. Gypsum (CaSO_4) dissolves in the water to produce Ca^{2+} and SO_4^{2-} , according to the reaction in Equation 4:



The dissolution of halite and gypsum can lead to significant increases in Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , and SO_4^{2-} .

4.2 Multivariate Statistical Analysis

Table 3 shows the correlation matrix for the twelve attributes that were used in the factor analysis. From a total of 66 correlation coefficients, 100% had significant values. Of these, approximately 74% were in the range $0.6 \leq |r| < 0.9$, indicating a strong correlation according to Palácio et al. (2011). The remaining 26% were in the range $0.3 \leq |r| < 0.6$, indicating moderate correlation.

It appears that there was a strong correlation between electrical conductivity and chloride ($r = 0.98$), calcium ($r = 0.98$), magnesium ($r = 0.94$), potassium ($r = 0.91$), sulfate ($r = 0.74$) and sodium ($r = 0.72$), indicating the possible influence of these ions on the increase in water salinity in the area. Chloride demonstrated a strong correlation with TDS ($r = 0.98$), electrical conductivity ($r = 0.98$), calcium ($r = 0.96$), potassium ($r = 0.92$), magnesium ($r = 0.91$), total iron ($r = 0.90$), sulfate ($r = 0.65$), and sodium ($r = 0.65$), indicating, once again, the relationship of

these ions with the increase in water salinity. Chloride is also a good indicator of the effect of evaporation/evapotranspiration.

Table 3 Correlation matrix between the physical-chemical parameters of groundwater.

	TDS	EC	TUR	TH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
EC	1.00										
TUR	0.94	0.94									
TH	0.96	0.96	0.97								
Na ⁺	0.72	0.72	0.48	0.54							
K ⁺	0.91	0.91	0.96	0.95	0.39						
Ca ²⁺	0.98	0.98	0.98	0.99	0.58	0.95					
Mg ²⁺	0.94	0.94	0.96	0.99	0.50	0.94	0.97				
Cl ⁻	0.98	0.98	0.93	0.94	0.65	0.92	0.96	0.91			
SO ₄ ²⁻	0.74	0.74	0.78	0.84	0.41	0.72	0.79	0.88	0.65		
HCO ₃ ⁻	0.59	0.59	0.39	0.46	0.81	0.31	0.49	0.44	0.48	0.41	
Fe _{total}	0.91	0.91	0.99	0.95	0.44	0.95	0.96	0.94	0.90	0.76	0.38

Total iron was strongly correlated with calcium ($r=0.96$), electrical conductivity ($r=0.91$), TDS ($r=0.91$), and chloride ($r=0.90$). It is a frequent component of groundwater coming from ferromagnesian minerals. At the CRB, the high levels of iron are likely related to the significant presence of rocks and mafic dikes, which supply substantial amounts of iron oxides to some soils (Nacif 2000). The content in the studied wells varied between 0.08 and 9.81 mg.L⁻¹. Bicarbonate only showed a strong correlation with sodium ($r = 0.81$). Bicarbonate can form the highly water-soluble sodium bicarbonate salt (NaHCO₃). The Na⁺ ion can originate from the dissolution of silicates, the evaporation of water containing marine aerosols (Teramoto & Chang 2020), or ionic exchanges between water and clay minerals. The moderate correlation between bicarbonate with TDS and EC ($r = 0.59$) indicates a low influence on the salinization of the area. The correlation with calcium ($r = 0.49$) and magnesium ($r = 0.44$) may reflect that the predominant origin of these ions is the weathering of silicates and not carbonate dissolution (Morán-Ramírez et al. 2016). The absence of carbonate rocks in the study area should also be considered, thus strengthening the indication that the hydrolysis of silicates is the main reaction for the water–rock interactions.

Three factorial analysis simulations were carried out to obtain better results in the applied convenience tests. In the first one, all 18 physical–chemical parameters were used. The KMO index showed a result of 0.507 and the Bartlett’s sphericity test did not present significance (p

<0.01), indicating that the variables analyzed were not correlated. In the second simulation, the three parameters (pH, SiO₂, and NO₂⁻) that exhibited low communalities, less than 0.600 (Franca et al. 2018), were excluded as this indicates a low level of explanation of the parameter by these factors. The KMO index and Bartlett's sphericity test still indicated insignificance. In the third simulation, the parameters NO₃⁻, F⁻, and CO₃²⁻ were eliminated, as once again, they presented low communalities. The model developed with twelve parameters proved to be favorable with a KMO index of 0.776 and Bartlett's sphericity test was significant at p <0.01.

The factor analysis showed two factors with eigen values greater than 1.0. The first factor explained the total variance of the attributes by approximately 70% and the second by 23%. These results indicate that the two factors represent approximately 93% of the total variance of the data (Table 4).

Table 4 Factor loads, communalities and variance explained by the factor analysis of the 12 attributes analyzed after rotation by the varimax method.

Variables	Factorial Loads		Communalities
	Factor 1	Factor 2	
TDS	0.861	-0.497	0.989
EC	0.861	-0.497	0.989
Turbidity	0.961	-0.228	0.976
TH	0.951	-0.300	0.994
Na ⁺	0.285	-0.919	0.926
K ⁺	0.968	-0.130	0.953
Ca ²⁺	0.935	-0.339	0.989
Mg ²⁺	0.952	-0.260	0.975
Cl ⁻	0.871	-0.405	0.922
SO ₄ ²⁻	0.791	-0.221	0.675
HCO ₃ ⁻	0.188	-0.922	0.885
Fe _{total}	0.953	-0.193	0.945
Variance explained by factors (%)	8.4369	2.7802	11.2171
Accumulated variance (%)	0.703	0.232	0.935

With approximately 70% of the explanation of the total variance of the attributes, Factor 1 demonstrated a high positive correlation between the attributes TDS, EC, turbidity, TH, potassium, calcium, magnesium, chloride, sulfate, and iron, with factorial loads greater than 0.791, indicating that they most significantly controlled characterization of the water salinity. The variables with the highest factorial loads, were K⁺ (0.968), turbidity (0.961), Fe_{total} (0.953), Mg²⁺ (0.952), TH (0.951), and Ca²⁺ (0.935). According to Brodnjak-Vončina et al. (2002), the variables in question may be linked to the natural weathering process of the geological

components of rocks and soils. Potassium has a clay-origin, while iron and magnesium sources are related to ferromagnesian rocks and minerals, with calcium being related to the calcium plagioclases of mafic/ultramafic rocks and to chernosols.

Factor 2, with approximately 21% of the explanation of the total variance of the attributes, showed a high correlation between bicarbonate and sodium, reinforcing the hypothesis of the presence of sodium bicarbonate, which contributes minimally to the salinity of groundwater. The identified factorial loads were: -0.932 and -0.910, respectively. Thus, the indicators that represent these factors were defined as factor 1: groundwater mineralization component related to chemical weathering and evapotranspiration; and factor 2: groundwater mineralization component associated with the presence of soluble salts.

The multivariate cluster analysis technique, applied to the attributes explained by factors 1 and 2 from the factor analysis, grouped samples with chemically similar characteristics. The groups obtained were defined by the first major difference between the rescheduled cluster coefficients. The parameters for factor 1 generated two similar groups (Figure 3), with a cut-off point of nine. Group 1, from factor 1 comprised 84% (16 wells) of the groundwater samples. It was characterized by waters with substantial chemical variability. The wells were in the central-eastern portion of the basin, an area with high rainfall where latosols predominate. Group 2, from factor 1 comprised three wells (16% of the groundwater samples) that were distinguished from the others because they were in a different climatic band in the extreme western part of the basin with lower average rainfall. These had water with the highest level of salinity in the area, with EC between 1090 and 2280 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. These wells were associated with chernosols and argisols. Factor 2 parameters generated three similar groups, with a cut-off point of four. Group 1, from factor 2 comprised four wells. The samples had a sodium content between 316 and 456 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, with an average of 368.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The average concentration of bicarbonate ions was 453 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. This group characterized wells with high salinity levels (P1, P6, P11, and P12). Group 2, from factor 2 comprised six wells, wherein the average sodium content was 181.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The bicarbonate varied between 59.9 and 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. This group represented the wells with an intermediate level of salinity (P2, P4, P7, P8, P9, and P10). Group 3, from factor 2 comprised nine wells. Groundwater samples in this group had a sodium content between 8 and 28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

The maximum bicarbonate concentration was 181 mg.L⁻¹. This group included wells with low salinity levels.

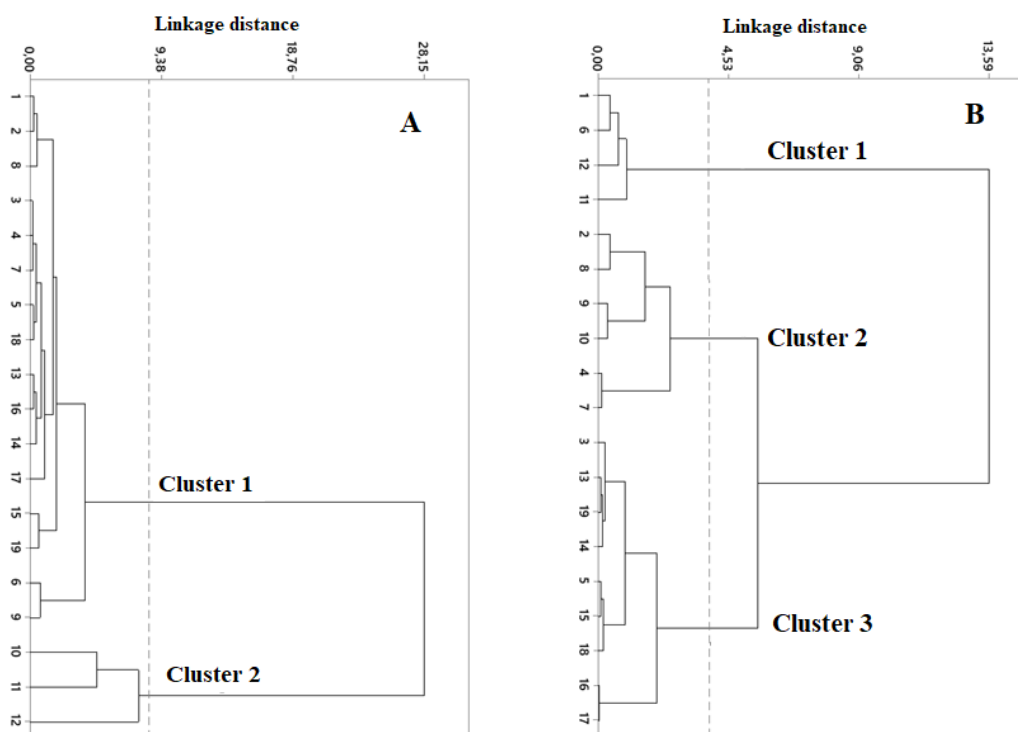


Figure 3 Dendrogram resulting from the hierarchical grouping analysis of the variables explained by: A. Factor 1; B. Factor 2.

5 Conclusions

In the present study, the combined use of hydrogeochemical diagrams and multivariate statistical analysis to understand the factors that lead to water salinization proved to be efficient. The geochemical composition of the groundwater comprises two main types: calcium-bicarbonate and calcium-chloride. The salinity distribution indicates that fresh and brackish water can be found and that climatic characteristics influence their chemical quality. The western portion, with a climate characterized by low humidity and scarce rainfall, presents groundwater that is more mineralized than that in the eastern portion of the area. The increase in salinity, related to the increasing concentrations of Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, and SO₄²⁻, is associated with the effect of direct ion exchange during the contact between rock and water, evidenced by the saturation index and the chloro-alkaline index. Meanwhile, Fe_{total}, Mg²⁺ and HCO₃⁻ sources are related to chemical weathering during the silicate hydrolysis reaction. Although HCO₃⁻ is the most abundant ion in

the groundwater in the study area, it is not a dominant element in salinization. Water quality is also related to the evapotranspiration process. The proximity of the study area to the Atlantic Ocean causes marine aerosols to be transported and deposited, often concentrating K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , and Cl^- ions. The multivariate statistical analysis allowed the identification of the parameters responsible for the variations in water quality and confirmed the role of the geochemical process of water–rock interactions, with weathering and evapotranspiration explaining the water salinization in the region. The present study contributed to enhancing the understanding of the processes that result in salinization and affect water quality, supporting the development of planning and sustainability strategies for water resources.

6 Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. The first author was funded by grant 142241/2017-2, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

7 References

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico 2010, *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado*, vol. 2, Engecorps/Cobrape. — Brasília. https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/index.html
- Aghazadeh, N., Chitsazan, M. & Golestan, Y. 2017, 'Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran', *Appl Water Sci*, vol. 7, no. 7, pp. 3599–616. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0498-9>
- Alves, J. do P.H., Lima, M.H.R., Dória, J.R., Silva, I.S. & Monteiro, A.S.C. 2021, 'Hydrogeochemical characterization of reservoir waters undergoing salinization processes in Northeastern Brazil', *RBRH*, vol. 26, no. 24. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210043>
- Appelo, C.A.J. & Postma, D. 2005, *Geochemistry, Groundwater And Pollution*, 2nd edn, The Netherlands, Amsterdam.
- Araújo, T.G., Souza, M.F.L., Mello, W.Z. & Silva, D.M.L. 2015, 'Bulk Atmospheric Deposition of Major Ions and Dissolved Organic Nitrogen in the Lower Course of a Tropical River

- Basin, Southern Bahia, Brazil', *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 26, no. 8, pp. 1692-701.
<http://dx.doi.org/10.5935/0103-5053.20150143>
- Barbosa, J.S.F., Correa-Gomes, L.C., Marinho, M.M. & Silva, F.C.A. 2003, 'Geologia Do Segmento Sul Do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 33, no. 1, pp. 33–48.
- Barbosa, J.S.F. & Dominguez, J.M.L. 1996, *Texto Explicativo para o Mapa Geológico da Bahia ao Milionésimo*, SICM/SGM, Edição Especial, Salvador.
- Brodnjak-Vončina, D., Dobcnik, D., Novic, M. & Zupan, J. 2002, 'Chemometrics characterisation of the quality of river water', *Analytica Chimica Acta*, vol. 462, no. 1, pp. 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)00298-2)
- Cardoso, S.B., Da Cunha, C.F., Engelbrecht, B.Z. & Chang, H.K. 2020, 'Detecção e delimitação de pequenos reservatórios na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Bahia, utilizando imagens multiespectrais', *Holos Environment*, vol. 20, no. 4, pp. 458-75.
<https://doi.org/10.14295/holos.v20i4.12391>
- Chidambaram, S., Karmegam, U., Sasidhar, P. Prasanna, M.V. & Manivannan, R. 2011, 'Significance of saturation index of certain clay minerals in shallow coastal groundwater, in and around Kalpakkam, Tamil Nadu, India', *Journal of Earth System Science*, vol. 120, no. 5, pp. 897–909. <https://doi.org/10.1007/s12040-011-0105-2>.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R. & Savard, M. M. 2008, 'Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system', *Journal of Hydrology*, vol. 353, no. 3, pp. 294–313.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente 2005, *Resolução 357, de 17 de março de 2005, Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*, Diário Oficial da União, Brasília
http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450

- Dinka, M.O. 2019, 'Groundwater property and composition variability under long-term irrigated area of Wonji Plain, Ethiopia', *Journal of Water and Land Development*, vol. 41, no. 1, pp. 37–46. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0025>.
- Engelbrecht, B.Z., Gonçalves, R.D.; Teramoto, E.H. & Chang, H.K. 2019, 'Disponibilidade hídrica e balanço hídrico da bacia do rio cachoeira na região de Itabuna/Ba', *Revista Geociências Unesp*, vol. 38, no. 3, pp. 731 - 40. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13806>
- Figueiredo, A.F.R. 2005, 'Análise do risco de salinização dos solos da bacia hidrográfica do rio Colônia Sul da Bahia', Master thesis, Universidade Estadual de Santa Cruz. http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=146272
- Fontes, A.S., Zucchi, M.R., Medeiros, Y.D.P., & Azevedo, A.E.G. 2015, 'Avaliação dos fatores intervenientes no processo de salinização em reservatórios superficiais do semiárido brasileiro', *RBRH*, vol. 20, no. 3, pp. 708-21. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n3.p708-721>
- Franca, R., Gomes, M., Silva, F. da, Lima, M. & Frischkorn, H. 2018, 'Análise multivariada dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas em Juazeiro do Norte – CE (Brasil)', *Águas Subterrâneas*, vol. 32, pp. 106–13. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28890>
- Gibbs, R.J. 1970, 'Mechanisms Controlling World Water Chemistry', *Science, New Series*, vol. 170, no. 3962, pp. 1088–90. <http://dx.doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- Gomes, M. da C.R. & Cavalcante, I.N. 2017, 'Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea', *Águas Subterrâneas*, vol. 31, no. 1, pp. 134–49. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28617>
- Gomes, M. da C.R. & Franca, R.M. da. 2019, 'Uso Da Análise Multivariada Para Subsidiar No Monitoramento Da Qualidade Da Água Subterrânea Na Bacia Sedimentar Do Araripe, Sul Do Estado Do Ceará', *Geociências*, vol. 38, no. 1, pp. 195–205. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i1.13052>

- Gomes, M. da C.R., Mendonça, L.A.R., Lima, M.G. de S. & Araújo, A.O. 2017, 'Similaridade De Atributos Físico-Químicos Com Uso De Análise Multivariada Aplicada À Gestão Qualitativa De Águas Subterrâneas', *Geociências*, vol. 36, no. 2, pp. 325–37. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i2.12591>
- Guo, J., Zhou, X., Wang, L., Zhang, Y., Shen, X., Zhou, H., Ye, S., & Fang, B. 2018, 'Hydrogeochemical characteristics and sources of salinity of the springs near Wenquanzhen in the eastern Sichuan Basin, China', *Hydrogeology Journal*, vol. 26, no. 4, pp. 1137–51. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-017-1692-z>
- Huang, X., Wang, G., Liang, X., Cui, L., Ma, L. & Xu, Q. 2018, 'Hydrochemical and Stable Isotope (δD and $\delta^{18}O$) Characteristics of Groundwater and Hydrogeochemical Processes in the Ningxiaota Coalfield, Northwest China', *Mine Water and the Environment*, vol. 37, no. 1, pp. 119–36. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0477-x>
- Hui, T., Jizhong, D., Shimin, M., Zhuang, K. & Yan, G. 2021, 'Application of water quality index and multivariate statistical analysis in the hydrogeochemical assessment of shallow groundwater in Hailun, northeast China', *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 651–67. <https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1749827>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2013, *Hidrogeoquímica dos Mananciais Subterrâneos da Região Nordeste do Brasil*, viewed 20 October 2021, < http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_hidrogeologico_e_hidroquimico/mapas/regionais/nordeste_hidroquimica_subterraneo.pdf >.
- Jia, H., Qian, H., Zheng, L., Feng, W., Wang, H., & Gao, Y. 2020, 'Alterations to groundwater chemistry due to modern water transfer for irrigation over decades', *Science of the Total Environment*, vol. 717. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137170>
- Kumar, S., Logeshkumaran, A., Magesha, N.S., Godson, P.S. & Chandrasekar, N. 2015, 'Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India', *Applied Water Science*, vol. 5, no. 4, pp. 335–43. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0196-4>

- Mobus, G. 2014, *Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas de água*, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME, Fortaleza, viewed 12 April 2020, < <http://www5.funceme.br/qualigraf/app/pagina/show/2> >.
- Morán-Ramírez, J., Ledesma-Ruiz, R., Mahlknecht, J., & Ramos-Leal, J.A. 2016, 'Rockwater interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling', *Applied Geochemistry*, vol. 68, pp. 79-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.008>.
- Nacif, P.G.S. 2000, 'Ambientes naturais da bacia hidrográfica do rio Cachoeira, com ênfase aos domínios pedológicos', PhD thesis, Universidade Federal de Viçosa. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/10732>
- Palácio, H.A. de Q., Andrade, E.M. de, Lopes, F.B., Alexandre, D.M.B. & Arraes, F.D.D. 2009, 'Similaridade da qualidade das águas superficiais da bacia do Curu, Ceará', *Ciência Rural*, vol. 39, no. 9, pp. 2494–500. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000900017>
- Palácio, H.A. de Q., Araujo Neto, J.R., Meireles, A.C.M., Andrade, E.M., Santos, J.C.N., & Chaves, L.C.G. 2011, 'Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas', *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, no. 4, pp. 395–402. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400011>
- Parkhurst, D.L. & Appelo, C.A.J. 2013, *Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, viewed 14 May 2021, <<https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>>.
- Paula, F.C.F. de, Silva, D.M.L. da & Souza, C.M. 2012, 'Fluvial Hydrochemistry at East Bahia Watersheds', *Revista Virtual de Química*, vol. 4, no. 4. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20120028>.
- Paula, F., Rego, N. & Santos, J.W. 2008, 'Tipologia Fluvial da Bacia Hidrográfica do Rio Salgado - Sul da Bahia', *RBRH*, vol. 13, no. 1, pp. 217–26. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p217-226>.

- Piper, A.M. 1944, 'A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses', *Transactions American Geophysical Union*, vol. 25, no. 6, pp. 914–28. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- Santos, J.S., Santos, M.J.S. & Santos, M.L.P. 2009, 'Parâmetros indicativos do processo de salinização em rios urbanos do semi-árido brasileiro', *Quim. Nova*, vol. 32, no. 6, pp. 1534–8. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600033>
- Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação 1999, *Projeto RADAMBRASIL, Folha SD.24 – Salvador, Potencial dos Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro.
- Silva, J.A., Barbosa, N.S. & Santos, C.B. 2021, 'Processos Hidrogeoquímicos e Evolução das Águas Subterrâneas do Aquífero Cristalino da Folha Amargosa, SD.24-VD-II, Centro-Sul da Bahia', *Águas Subterrâneas*, vol. 35, no. 2. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v35i2.30023>
- Slama, F., & Bouhlila, R. 2017, 'Multivariate statistical analysis and hydrogeochemical modelling of seawater-freshwater mixing along selected flow paths: case of Korba coastal aquifer Tunisia', *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 198, pp. 636–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.005>
- Sousa, L.F., Soares, B.B. & Santana, R.O. 2018, 'Dimensionamento hidrológico para reservatório a fim de sanar as necessidades hídricas de Itabuna-BA', *Estação Científica (UNIFAP)*, vol. 8, no. 2, pp. 69–79. <http://dx.doi.org/10.18468/estcien.2018v8n2.p69-79>
- Tarawneh, M.S.M., Janardhana, M.R. & Ahmed, M.M. 2019, 'Hydrochemical processes and groundwater quality assessment in North eastern region of Jordan valley, Jordan', *HydroResearch*, vol. 2, pp. 129–45. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.02.001>
- Teramoto, E.H. & Chang, H.K. 2020, 'Avaliação de processos naturais de salinização de águas subterrâneas na porção leste da bacia do rio cachoeira, Bahia', *Revista do Instituto Geológico*, vol. 41, no. 2, pp. 15–32. <https://doi.org/10.33958/revig.v41i2.680>
- Teramoto, E.H.; Engelbrecht, B.Z.; Gonçalves, R.D.; Chang, H.K. 2018, Caracterização hidroquímica e isotópica dos aquíferos fissurais da região de Itabuna/BA. *Águas Subterrâneas*, vol. 32, no. 2, pp. 228–36. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i2.29151>

- Teramoto, E.H., Gonçalves, R.D., Stradioto, M.R., Engelbrecht, B.Z. & Chang, H.K. 2019, 'Modelagem da Interação Água/Rocha nos Aquíferos Fraturados da Região de Itabuna/BA', *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*, vol. 42, no. 1, pp. 735-41. http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_735_741
- Trabelsi, R. & Zouari, K. 2019, 'Coupled geochemical modeling and multivariate statistical analysis approach for the assessment of groundwater quality in irrigated areas: A study from North Eastern of Tunisia', *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 8, pp. 413–27. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.006>.
- Vlach, S.R.F. & Lama, E.A.D. 2002, 'Idades Th-U-PbT de monazita e geotermobarometria de rochas metapelíticas de alto grau do sistema orogênico Itabuna-Salvador-Curaçá, BA, Brasil: um estudo em microsonda eletrônica', *Geologia USP. Série Científica*, vol. 2, pp. 9–22. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2002000100004>
- Zhang, B., Zhao, D., Zhou, P., Qu, S., Liao, F. & Wang, G. 2020, 'Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Dominant Water–Rock Interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China', *Water*, vol. 12, no. 3, p. 836. <https://doi.org/10.3390/w12030836>.

CAPÍTULO 3

ARTIGO II – PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CACHOEIRA, NORDESTE DO BRASIL: TENDÊNCIAS E VARIABILIDADE (1970 – 2020)

Abstract

This study aimed to identify annual and seasonal rainfall trends and variability in the Cachoeira River Basin, State of Bahia (Northeastern Brazil). The data used comprise historical series of monthly total rainfall from six rainfall stations for 1970–2020 (51 years) obtained from the Hydrological Information System (HidroWeb) of the Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). The Mann-Kendall, Spearman's Rho and Sen's slope tests were satisfactorily applied, allowing the identification of significant trends and magnitudes of precipitation. The analysis showed that statistically non-significant trends prevail in the area. However, a significant negative trend was identified in the central-west region in two rainfall stations that characterize a reduction of around 300 mm of rain in the studied period. Periods with extreme drought/humidity were recognized and compared with ENSO phases where it was identified that 62.5% of drought events and 42.9% of rainy events can be related to *El Niño/La Niña* phenomena, respectively. With the CV, low rainfall variability was recognized in the eastern portion of the BHRC and high variability in the western part of the area. The results obtained can be used as a reference for the management of water resources in hydrographic basins.

Keywords: Mann-Kendall test. Nonparametric statistic. Spearman's Rho. Watershed hydrology.

Resumo

Este estudo tem como objetivo identificar tendências e variabilidade pluviométricas na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, região Nordeste do Brasil. Os dados utilizados compreendem séries históricas de precipitações totais mensais de seis estações pluviométricas para o período de 1970 a 2020 (51 anos) obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os testes de Mann-Kendall, Spearman's Rho e Sen's slope foram aplicados de maneira satisfatória permitindo a identificação de tendências significativas e magnitude da precipitação. A análise mostrou que tendências estatisticamente não significativas prevalecem na área. Contudo, foi identificada tendência negativa significativa na região centro-oeste em duas estações pluviométricas que caracterizam uma redução em torno de 300 mm de chuva no período estudado. Períodos com extremos de seca/umidade foram reconhecidos e comparados com as fases do ENOS onde identificou-se que 62,5% dos eventos de seca e 42,9% dos eventos chuvosos podem ser relacionados com os fenômenos *El Niño/La Niña*, respectivamente. Com o coeficiente de variação foi reconhecido baixa variabilidade da precipitação na porção leste e elevada variabilidade na parte oeste da área. Os resultados obtidos podem ser utilizados como referência para a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Estatística não paramétrica. Hidrologia de bacias hidrográficas. Mann-Kendall. Spearman's Rho.

1 Introdução

A precipitação pluvial é de grande importância na caracterização do clima de uma região (Leite et al., 2010) pois o excesso ou escassez podem afetar as atividades econômicas, o abastecimento doméstico e industrial de água, a irrigação e a geração hidroelétrica, como também a segurança e a qualidade dos ambientes naturais e urbanos, por meio do aumento de cheias, secas e da erosão, com conseqüente decréscimo da qualidade da água e da diversidade dos ecossistemas (Chaves & Piau, 2008).

Pesquisas que avaliam o comportamento das precipitações são necessárias para planejamento econômico, social e ambiental pois suas variações podem afetar significativamente a forma de ocupação humana de uma região (Guedes et al., 2019; Lira et al., 2020). A análise espaço-temporal da precipitação tem grande aplicabilidade na construção civil, dimensionamento de reservatórios de água, planejamento de atividades turísticas e esportivas e na agricultura (Silva et al., 2003). Assim, entende-se que a variabilidade temporal e espacial das chuvas está diretamente relacionada com a disponibilidade e a gestão dos recursos hídricos (Yan et al., 2017).

A análise de tendência em série temporal, empregada para avaliar padrões de comportamento a longo prazo, pode ser aplicada em diferentes variáveis hidroclimáticas. Sua importância está relacionada com a identificação de padrões de crescimento/ decréscimo no espaço de tempo analisado e com a implementação de planos de gestão com propósito de reduzir o estresse hídrico (Sarkar et al., 2021).

Pesquisas envolvendo análises de tendências e variabilidade de precipitação são amplamente utilizadas em diversas regiões do Brasil e do mundo (Chu et al., 2014; Yang et al., 2017; Guedes et al., 2019; Lira et al., 2020; Malik et al., 2020; Qin et al., 2020) por conta de seus efeitos sobre o ciclo hidrológico, a gestão de recursos hídricos, o meio ambiente, as atividades agrícolas e a produção de alimentos (Sarkar et al., 2021). Em escala de bacia hidrográfica podem ser citados os trabalhos realizados na Bacia do Reservatório de Miyun, China (Yan et al., 2017), Bacia do Rio Limpopo, África do Sul (Mosase & Ahiablame, 2018) e Bacia do Rio Adige, Itália (Mallucci et

al., 2019). Esses estudos se concentraram em avaliar as variações anuais e sazonais da precipitação, temperatura e/ou vazão.

No Brasil, Zilli et al. (2017) avaliou tendências de precipitação extremas na região Sudeste onde identificou que estas são influenciadas pela proximidade de grandes centros urbanos e pelas características topográficas. No Sul do Brasil, Guedes et al. (2019) comparou o *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) com a variação na precipitação. Enquanto que na região Norte, Lira et al. (2020) observou a ocorrência de mudanças significativas na tendência da precipitação com aumento dos totais pluviométricos na ordem de 15 mm/ano.

Carvalho et al. (2020) investigou tendências de precipitação e temperatura a partir de 45 estações distribuídas na região Nordeste (Brasil) com série temporal de no mínimo 30 anos. Os resultados indicaram aumentos de temperatura e reduções na precipitação anual total e também no número de dias chuvosos. Souza e Nascimento (2020), em estudos realizados na região hidrográfica do Recôncavo Sul (Bahia) observou regime homogêneo de precipitação no período entre 1985 e 2010 prevalecendo tendências não significativas.

A região da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC) apresenta problemas derivados da escassez periódica de água que interfere no abastecimento e conseqüentemente, na ocupação desordenada do solo. Nesta área o abastecimento urbano é suprido basicamente por pontos de captação superficiais localizados em represas (Cardoso et al., 2020; Sousa et al., 2018), enquanto, de acordo com informações disponibilizadas nas fichas de descrição dos poços tubulares, as áreas rurais e centros industriais utilizam poços tubulares. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) publicou relatório recomendando que a região adotasse novos mananciais para abastecimento e adequasse o sistema já existente (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2010) tendo em vista que em termos de disponibilidade hídrica, a BHRC apresenta uma significativa variação espacial e temporal das vazões decorrente dos níveis de precipitação.

Deste modo, compreende-se que informações hidrológicas são necessárias para gestão e planejamento dos recursos hídricos. Portanto, a análise da variabilidade da chuva tem sua relevância relacionada com o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (Sarkar et al., 2021). Assim, o objetivo deste estudo é analisar tendências e variabilidade pluviométrica em período anual e sazonal na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (Bahia) utilizando série temporal de precipitação para o período de 1970 a 2020. Os resultados fornecerão padrões de comportamento

que poderão auxiliar na gestão dos recursos hídricos possibilitando planejamento de desenvolvimento mais adequado que o atual para os centros urbanos e zonas rurais.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) corresponde a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC), situada na porção Sul do Estado da Bahia, região Nordeste do Brasil. Com área de, aproximadamente, 4.500 km² abrange 10 municípios onde vivem cerca de 600.000 habitantes.

O relevo caracteriza um fator determinante das variações pluviométricas na BHRC. A elevação gradativa do terreno, sentido Leste-Oeste, constitui uma barreira orográfica em relação à unidade geomorfológica Depressão Itabuna-Itapetinga, condicionando, dessa forma, o aparecimento de diferentes zonas climáticas (Nacif, 2000). As amplitudes altimétricas são significativas. Os trechos mais baixos, situados nos vales dos rios, chegam a menos de 150 m de altitude, enquanto os mais elevados, representados pelos topos residuais formados principalmente pelas rochas do Complexo Jequié, atingem altitudes maiores que 1000 m (Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação, 1999).

A precipitação apresenta consideráveis variações ao longo da área. Os totais pluviométricos anuais se subdividem decrescendo do litoral, com cerca de 2000 mm, para o oeste como pode ser observado nas isoietas da Figura 1. Na porção ocidental os totais anuais decrescem para menos de 900 mm (Nacif, 2000).

O clima, de acordo com a classificação de Koppen (1948), apresenta significativa variação de leste a oeste sendo identificados três domínios: clima tropical úmido (Af), clima de monção (Am) e clima tropical com estação seca de inverno (Aw).

Com relação a vegetação, na porção oeste e centro-norte da BHRC as Florestas Deciduais e Semideciduais originais foram gradativamente devastadas e transformadas em pastagens. Enquanto que na região centro-leste o uso do solo está caracterizado por cultivos perenes, onde destaca-se o cacau, que representa a principal cultura dessa região (Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação, 1999). De acordo com o Plano Estratégico para Revitalização da Bacia do Rio Cachoeira (Secretaria do Meio Ambiente, 2017) as áreas degradadas e muito

degradadas localizam-se essencialmente na porção central e oeste da bacia, em oposição, a região oriental concentra áreas pouco degradadas a conservadas.

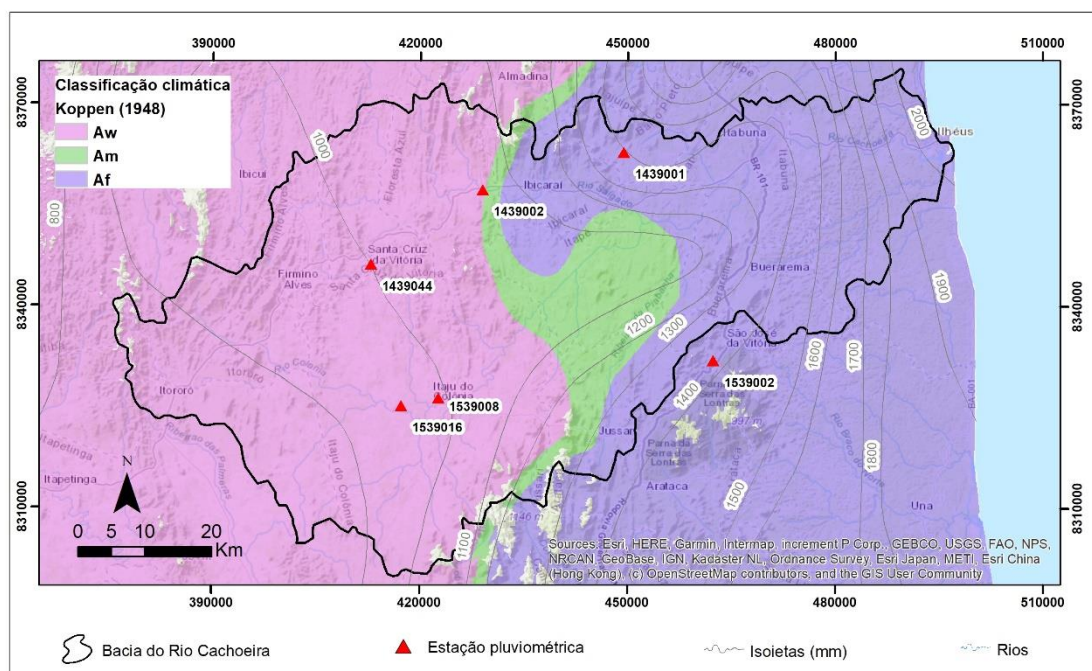


Figura 1. Mapa de localização da BHRC com as estações pluviométricas, isoietas (mm) e tipos climáticos de acordo com Koppen (1948).

Figure 1 BHRC location map with rainfall stations, isohyets (mm) and climate types according to Koppen (1948).

O arcabouço geológico é formado, predominantemente, pelo Complexo Itabuna, constituído por rochas granulíticas com composições tonalíticas, trondhjemíticas e/ou gábricas (Barbosa & Dominguez, 1996), pelo Complexo Jequié, formado por rochas metamórficas da fácies granulito, metatexitos, diatexitos e gnaisses, e por pequenos corpos básicos e ultrabásicos intrusivos (Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação, 1999).

2.2 Dados

Os dados utilizados foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). Compreendem séries históricas de precipitações totais mensais de seis estações pluviométricas (Tabela 1) observadas no período de

janeiro de 1970 a dezembro de 2020, totalizando 51 anos de informações hidrológicas. Este período de dados satisfaz a recomendação mínima de 30 anos estabelecido pela *World Meteorological Organization* (WMO, 1989) para cálculos climatológicos.

Tabela 1. Localização geográfica das estações pluviométricas.

Table 1 Geographic location of rainfall stations.

Estação Pluviométrica	Localidade	Latitude	Longitude
		(°)	
1439001	Lomanto Júnior	-14,81	-39,47
1439002	Floresta Azul	-14,86	-39,66
1439044	Sta. Cruz da Vitória	-14,96	-39,81
1539002	São José	-15,09	-39,35
1539008	Itajú do Colônia	-15,14	-39,72
1539016	Fazenda Manaus	-15,15	-39,77

As estações pluviométricas selecionadas apresentaram algumas falhas (menos de 7% de dados faltantes). O preenchimento das falhas foi elaborado pelo método da regressão linear simples (Tucci, 2007).

Os totais mensais selecionados formaram o conjunto de dados de precipitação sazonal que compreende as estações primavera (setembro a novembro), verão (dezembro a fevereiro), outono (março a maio), inverno (junho a agosto) e anual (janeiro a dezembro).

2.3 Período chuvoso/ seco

Com os dados de média e desvio padrão foram estabelecidas 3 classes para avaliação do padrão de precipitação anual:

- i. média + desvio padrão → período chuvoso.
- ii. média → período normal.
- iii. média – desvio padrão → período seco.

Em seguida, essas classes foram comparadas com as fases de atuação do fenômeno atmosférico-oceânico ENOS a partir de informações do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE, 2022) conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Períodos de ocorrência do *El Niño* e *La Niña* para período de 1968 a 2020.Table 2 Periods of *El Niño* and *La Niña* occurrence for the period from 1968 to 2020.

El Niño			La Niña		
1968 - 1970	1972 - 1973	1976 - 1977	1970 - 1971	1973 - 1976	1983 - 1984
1977 - 1978	1979 - 1980	1982 - 1983	1984 - 1985	1988 - 1989	1995 - 1996
1986 - 1988	1990 - 1993	1994 - 1995	1998 - 2001	2007 - 2008	2010 - 2011
1997 - 1998	2002 - 2003	2004 - 2005	2017 - 2018	-	-
2006 - 2007	2009 - 2010	2015 - 2016			

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2022)

2.4 Coeficiente de variação

Para expressar a variabilidade anual e sazonal dos dados, aplicou-se o coeficiente de variação (CV) que representa uma relação entre o desvio padrão (s) e a média (\bar{x}) do conjunto de dados, expressa em porcentagem através da Equação (1):

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (1)$$

Quanto menor o valor de CV menor a variabilidade dentro de um determinado conjunto de dados e vice-versa (Sarkar et al., 2021).

2.5 Estatística Não-Paramétrica

Para identificar a significância de tendência e magnitude da precipitação foram utilizados três testes estatísticos não-paramétricos nesta pesquisa: o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), o teste de Spearman's Rho (Lehmann, 1975) e o método Sen's slope (Sen, 1968).

Esses métodos foram escolhidos porque são considerados uma boa alternativa para identificação de tendência em dados que apresentam distribuição não-normal (Torres-Batló & Martí-Cardona, 2020), pela possibilidade de utilização em conjuntos de dados com elevada variância (Sarkar et al., 2021), por sua robustez (Zeleňáková et al., 2018; Qin et al., 2020), pela irrelevante influência de outliers (Santos et al., 2016) e por sua ampla aplicabilidade em estudos hidrológicos (Yang et al., 2017; Guedes et al., 2019; Wang et al., 2019; Lira et al., 2020; Malik et al., 2020).

O teste de Mann-Kendall (MK) é aplicado para detectar a significância de tendência nas séries históricas. Essa identificação é baseada na estatística S segundo a Equação (2):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

Onde:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_k), > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_k), = 0 \\ -1, & \text{se } (x_j - x_k), < 0 \end{cases}$$

Onde n é o comprimento da série temporal, x_k e x_j são $k = 1, 2, \dots, n-1$ e $j = k + 1, \dots, n$. A função $\text{sgn}(x_j - x_k)$ indica a tendência: -1, 0 e 1. Tendências crescentes tem o valor da estatística S positivo e tendências decrescentes apresentam valores negativos. A variância de S é obtida pela Equação (3):

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

A significância da tendência é definida a partir do cálculo do valor de Z (Equação 4).

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O nível de significância estatística adotado neste estudo é de 95% ($\alpha = 0,05$).

O teste de Spearman's Rho (SR) é um método estatístico baseado em classificação. Assim como o teste de MK é aplicado para análise de tendência. Sua aplicação está baseada na possibilidade de comparação entre os resultados dos dois testes. A estatística do teste SR é definida pela Equação (5) e (6) (Guedes et al., 2019):

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^B (D_i - i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

$$Rho = R_{sp} \sqrt{\frac{n-2}{1 - R_{sp}^2}} \quad (6)$$

Onde, D_i é o posicionamento da informação na série temporal para i observações, i é a ordem de tempo, n é o número total de dados na série, e Rho é a distribuição t de Student com $(n - 2)$ graus de liberdade. Valores de Rho positivos indicam aumento de tendência na série histórica dos dados e Rho negativo caracteriza tendência decrescente (Guedes et al., 2019).

A magnitude da tendência de precipitação foi desenvolvida pelo método estatístico não paramétrico Sen's slope, calculado pela Equação (6):

$$\beta = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), j > i \quad (6)$$

Onde β é o Sen's slope, x_j e x_i são os valores no tempo j e i ($j > i$). A magnitude é estimada por unidade de tempo (Torres-Batló & Martí-Cardona, 2020).

O interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW) foi aplicado para apresentar a distribuição espacial da magnitude de tendência para período anual de precipitação na área da BHRC no período de estudo.

3 Resultados e Discussões

3.1 Estatística descritiva

Na Tabela 3 são apresentados os dados calculados pela estatística descritiva: média, mínimo, máximo e desvio padrão para os dados selecionados.

A precipitação média máxima anual é observada na estação 1439001 (1444,90 mm) na parte centro-leste da área e a menor precipitação média ocorre na estação 1539016 (771,39 mm) localizada na porção centro-oeste da área da bacia. O desvio padrão varia entre 222,97 mm (estação 1539008) a 357,34 mm (estação 1439001). A precipitação mínima (194,80 mm) ocorreu em 1996 na estação 1539016 e a máxima (2329,48 mm) foi observada na estação 1439001 no ano de 1981.

A maior precipitação média da primavera é verificada na estação 1439001 (126,86 mm) situada na porção centro-leste da área da BHRC e a menor precipitação média (64,94 mm) é observada na estação 1539008 localizada no centro-oeste da área. O desvio padrão (SD) variou entre 58,49 mm (estação 1539008) a 89,92 mm (estação 1439001). A precipitação máxima de primavera (701,70 mm) foi registrada na estação 1439001 e ocorreu em novembro de 1989. A precipitação

mínima de zero milímetros foi registrada em cinco estações (1439002, 1439044, 1539002, 1539008, 1539016) nos trimestres de primavera e de verão.

Tabela 3. Características básicas da precipitação sazonal e anual do conjunto de dados selecionados (1970 – 2020).

Table 3 Basic characteristics of seasonal and annual precipitation of the selected dataset (1970 – 2020).

Parâmetros descritivos (mm)	Estações pluviométricas					
	1439001	1439002	1439044	1539002	1539008	1539016
	Anual					
M	1444,90	1034,57	949,91	1421,10	796,10	771,39
Min	645,30	588,08	416,30	940,10	336,70	194,80
Max	2329,48	1478,60	1575,40	2003,50	1207,90	1616,80
SD	357,34	233,64	281,40	254,64	222,97	260,60
	Primavera					
M	126,86	83,79	76,79	112,04	64,94	68,36
Min	3,30	0	0	0	0	0
Max	701,70	279,40	374,20	359,70	318,40	455,10
SD	89,92	58,99	64,00	75,09	58,49	71,62
	Verão					
M	129,47	95,15	94,48	136,59	88,73	90,34
Min	12,90	0	0	0	0	0
Max	603,90	576,20	508,70	521,20	489,00	373,50
SD	90,01	75,84	85,24	88,99	76,94	77,42
	Outono					
M	114,69	91,33	86,4	122,32	74,76	72,06
Min	5,40	0	1,90	0	3,00	0
Max	314,20	345,60	420,50	508,40	382,00	369,60
SD	58,31	56,78	68,25	69,61	60,66	60,06
	Inverno					
M	110,61	74,59	58,96	102,74	36,94	32,97
Min	2,70	6,50	0,80	7,80	0	0
Max	644,00	188,50	162,05	288,40	137,90	127,40
SD	74,53	37,77	34,68	56,58	24,61	24,98

M: Média. Min: Mínimo. Max: Máximo. SD: Desvio padrão.

O verão representa o período com maiores índices de chuva com máximo de precipitação média encontrado na estação 1539002 (136,59 mm), seguido da estação 1439001 (129,47 mm) e mínimo de precipitação média na estação 1539008 (88,73 mm). Os valores do desvio padrão encontram-se no intervalo entre 75,84 mm (estação 1439002) a 90,01 mm (estação 1439001). A precipitação máxima de verão (603,90 mm) foi observada na estação 1439001 em janeiro de 2007.

A precipitação média de outono apresenta valores de 122,32 mm (estação 1539002) a 72,06 mm (estação 1539016). O desvio padrão está entre 56,78 mm (estação 1439002) a 69,61 mm (estação 1539002). A precipitação mínima de outono variou de 0 mm (1439002, 1539002, 1539016) a 5,40 mm (1439001). O máximo de precipitação (508,40 mm) ocorreu em março de 1997.

No trimestre de inverno foi observado a maior precipitação média na estação 1439001 (110,61 mm) e menor precipitação média na estação 1539016 (32,97 mm). O desvio padrão apresentou valores entre 24,61 mm (estação 1539008) e 74,53 mm (estação 1439001). A precipitação mínima é de 0 mm (1539008 e 1539016) e a máxima é de 644,00 mm (1439001) que foi registrada em julho de 2012.

3.2 Análise do período seco/chuvoso

As classes estabelecidas a partir dos valores de média e de desvio padrão para avaliar a precipitação anual em período chuvoso, normal e seco são apresentadas na Figura 2. Nos 51 anos estudados (1970 a 2020), 7 anos foram classificados como chuvosos (1980, 1985, 1989, 1992, 1999, 2002 e 2005), 36 anos mostraram precipitação normal e 8 anos exibiram período de seca, ou seja, com déficit de precipitação (1971, 1986, 1993, 1996, 2003, 2015, 2016, 2019).

Os períodos mais chuvosos ocorreram em 1980 (1504,95 mm) e em 1999 (1449,23 mm). Foi observado que nos anos de 1999, 1985 e 1989 o fenômeno *La Niña* estava atuante no Oceano Pacífico favorecendo chuvas acima da média na região Nordeste do Brasil.

De acordo com Silva (2007) excesso de chuva também ocorreu no litoral do Estado da Paraíba em 1989. De acordo com o autor, a temperatura da superfície do mar (TSM) no oceano Atlântico Sul estava próximo da neutralidade e o fenômeno *La Niña* estava atuante no oceano Pacífico. Condições atuando em conjunto que favoreceram chuvas acima da média no Nordeste do Brasil.

Os anos com totais pluviométricos mais baixos foram 1996 (596,25 mm), 2015 (660,72 mm) e 1993 (672,47 mm), classificados como secos, assim como 1986, 2003 e 2016. Nos anos de 1986, 1993, 2003, 2015 e 2016 o *El Niño* estava configurado no oceano Pacífico, portanto, reduzindo as chuvas em toda a região da BHRC. Extremos de seca também foram registrados no ano de 1993 na Paraíba (Silva, 2007) e em Salvador (Santos et al., 2016).

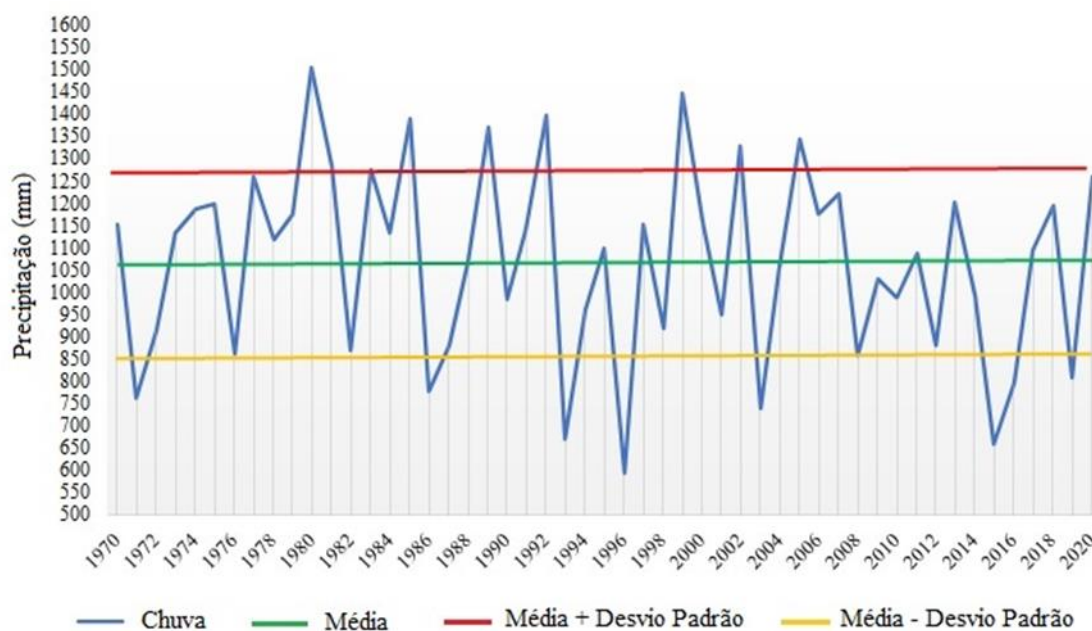


Figura 2. Precipitação anual (1970 a 2020), média e desvios da média.

Figure 2 Annual precipitation (1970 to 2020), mean and deviations from the mean.

Os períodos representativos para valores extremos de precipitação (máxima e mínima) aqui registrados demonstraram parcial discordância com o ENOS. No período de 51 anos (1970-2020) analisados nesta pesquisa, apenas 62,5% puderam ser relacionados ao *El Niño* e 42,9% a *La Niña*. Vale destacar os resultados apresentados por Nóbrega e Santiago (2014), onde associou-se as anomalias da TSM sobre o oceano Atlântico Tropical como fenômeno influente na precipitação do Norte e Nordeste do Brasil.

3.3 Variabilidade da precipitação

As características dos regimes de chuva da região Nordeste do Brasil estão relacionadas com sua posição geográfica e com os sistemas de correntes atmosféricas atuantes. O Estado da Bahia, com sua vasta extensão territorial, apresenta uma larga região litorânea e uma considerável área

inserida no polígono das secas. Essas características resultam em repartição e irregularidade pluviométrica. A Tabela 4 apresenta os resultados do coeficiente de variação (CV) da precipitação total para período anual e sazonal das 6 estações analisadas nesta pesquisa.

Tabela 4. Resultado do coeficiente de variação da precipitação na BHRC (1970 – 2020).

Table 4 Result of the coefficient of variation of precipitation in the BHRC (1970 – 2020).

Estação	Anual	Primavera	Verão	Outono	Inverno
1439001	24,73	70,88	69,52	50,84	67,38
1439002	22,58	70,40	79,71	62,17	50,64
1439044	29,62	83,34	90,22	78,99	58,82
1539002	17,92	67,02	65,15	56,90	55,07
1539008	28,01	90,08	86,71	81,14	66,64
1539016	33,78	104,77	85,70	83,35	75,77

Conforme observado na Tabela 4, a maior variabilidade de precipitação foi definida para o trimestre da Primavera (CV = 104,77%), seguido do Verão (CV = 90,22%). Enquanto a menor variabilidade foi identificada no período anual (CV = 17,92%).

O maior CV anual foi encontrado na estação 1539016 (33,78%), seguido da estação 1439044 (29,62%) e estação 1539008 (28,01%). O menor CV é observado na estação 1539002 (17,92%). Os coeficientes de variabilidade calculados para a primavera são elevados, mantêm-se acima de 50%, chegando a 104,77% (estação 1539016).

A menor variabilidade de precipitação para o verão foi de 65,15% (estação 1539002) e a maior corresponde a 90,22% (estação 1439044), ambos elevados. No outono o coeficiente de variabilidade permanece com valores acima de 50%, com máximo de 83,35% (estação 1539016) e mínimo de 50,64% (estação 1439002). Os maiores valores de CV, entre os períodos sazonal e anual, são encontrados na estação pluviométrica 1539016, localizada na porção centro-oeste da área (menor pluviosidade da área). Já a estação pluviométrica 1539002, situada no centro-leste da BHRC (maior pluviosidade), mostra os menores valores de CV (anual, primavera, verão), indicando que existe propensão de redução de variabilidade de precipitação em direção ao leste da área de estudo.

Resultados similares foram obtidos por Sarkar et al. (2021) em *West Bengal* (Índia) onde, assim como na BHRC, verificou-se que a variabilidade da precipitação é mais alta nas regiões com

níveis de precipitação mais baixos e, os locais com precipitações mais elevadas é registrada uma variabilidade menor. Silva et al. (2011), em pesquisa realizada na região Nordeste do Brasil, identificou que o semiárido apresenta maiores valores de coeficiente de variação do que no litoral e agreste nordestino. O Nordeste do Brasil é uma das regiões do mundo que sofre com irregularidades pluviométricas apresentando eventos extremos, como secas ou chuvas excessivas, que têm sido relacionados aos padrões anômalos de grande escala da circulação atmosférica global (Nóbrega & Santiago, 2014). A BHRC tem sua variabilidade pluviométrica associada a dinâmica atmosférica regional que está correlacionada com fatores que podem atuar em conjunto ou isolado. Destacam-se a anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e o *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) (Santos et al., 2016).

3.4 Análise de tendências anual

As tendências e magnitudes de precipitação calculadas a partir dos testes não-paramétricos Mann-Kendall (MK), Spearman's Rho (SR) e Sen's slope (SS) a nível de significância de 95% são apresentados na Tabela 5. Os testes MK e SR (Tabela 5) mostraram resultados equivalentes. Esse comportamento estatístico foi verificado por Guedes et al. (2019), que durante pesquisa realizada no Rio Grande do Sul, utilizando série de precipitação e os mesmos testes, obteve resultados semelhantes entre eles.

Tabela 5. Resultados dos testes estatísticos de Mann-Kendall, Spearman's Rho e Sen's slope para período de 51 anos (1970-2020).

Table 5 Results of the Mann-Kendall, Spearman's Rho and Sen's slope statistical tests for a period of 51 years (1970-2020).

Testes Estatísticos	Estações pluviométricas					
	1439001	1439002	1439044	1539002	1539008	1539016
	Anual					
MK	0,552	-0,877	-2,161	0,707	-2,339	-0,975
Trend (±)	NS	NS	S (-)	NS	S (-)	NS
SR	0,533	-0,839	-2,278	0,734	-2,203	-0,964
Trend (±)	NS	NS	S (-)	NS	S (-)	NS
SS	1,785	-2,664	-5,984	1,967	-5,410	-2,195

S: Significativo ($\alpha = 0,05$); NS: Não significativo. MK: Mann-Kendall test; SR: Spearman's Rho; SS: Sen's slope.

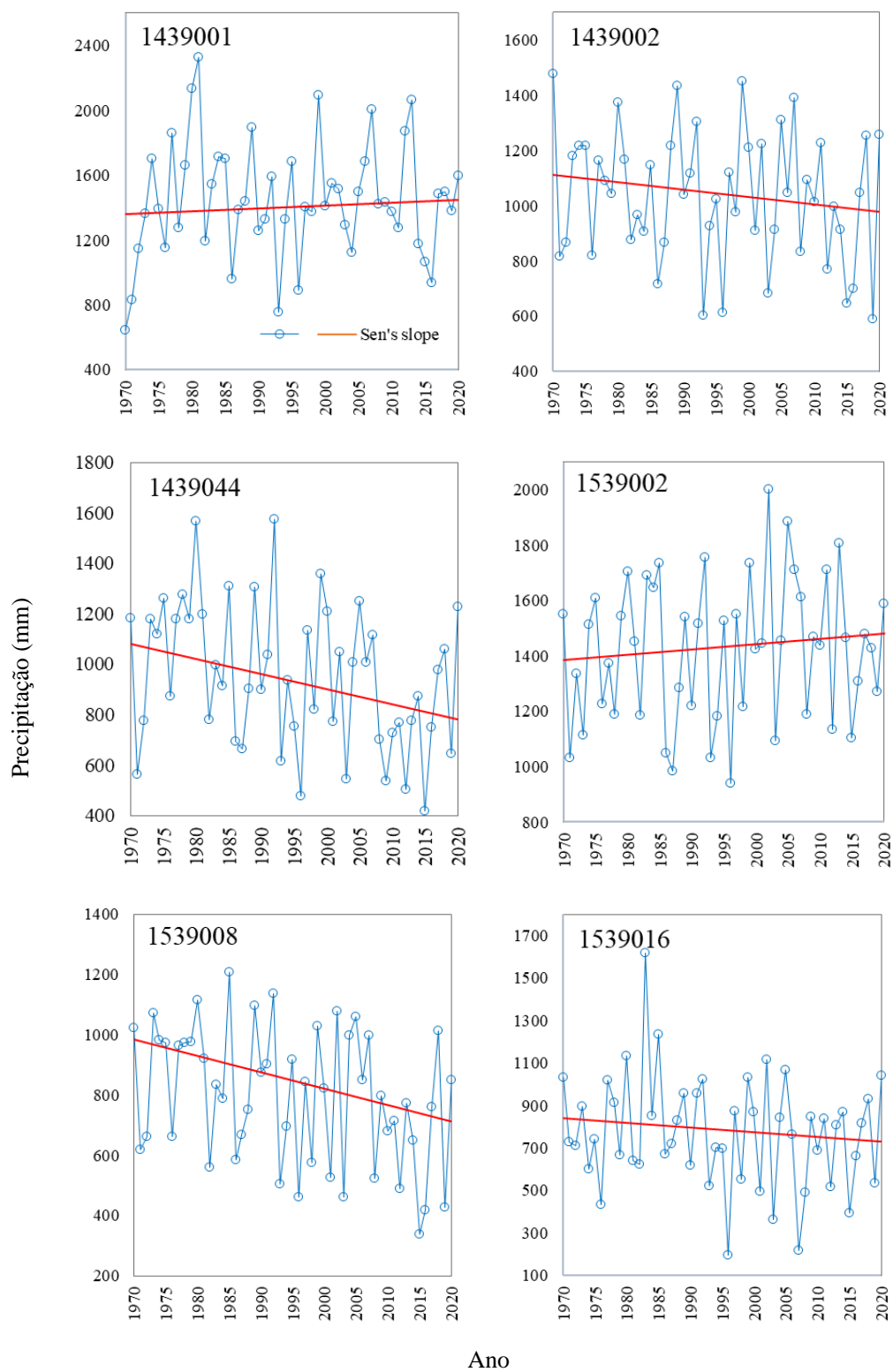


Figura 3. Totais anuais de precipitação para o período 1970 – 2020 e magnitude de tendência das estações.

Figure 3 Annual rainfall totals for the period 1970 – 2020 and trend magnitude of the seasons.

As estações 1439001, 1439002, 1539002 e 1539016 não apresentaram tendências estatisticamente significativas. Nas estações pluviométricas 1439044 e 1539008 foram identificadas tendências significativas a nível de confiança de 95%, ambas de redução (-) de chuvas. Assim, 33% das estações analisadas na BHRC apresentam tendência de redução do volume de precipitação.

A Figura 3 mostra os totais anuais de precipitação e a inclinação da magnitude calculada pelo Sen's slope. As tendências significativas variaram entre -5,984 a -5,410 mm/ano. A diminuição máxima na magnitude de precipitação ocorre na estação 1439044 (-5,984 mm/ano).

As estações pluviométricas 1439044 e 1539008 estão localizadas na porção centro-oeste da área de estudo posicionadas em porções mais elevadas onde prevalece precipitação na faixa de 1000 mm anuais. Esta área, considerada de transição climática, apresenta características próximas ao do semiárido com desequilíbrio na repartição das chuvas durante o ano.

A partir dos resultados obtidos no teste Sen's slope é possível estimar que a magnitude de decréscimo pluviométrico anual que ocorreu na estação 1439044 foi na ordem de -5,984 mm.ano⁻¹, assim, nos 51 anos da série hidrológica (1970 - 2020) ocorreu um decréscimo pluviométrico em torno de 305 mm. Na estação 1539008 o declínio foi na ordem de -5,410 mm.ano⁻¹, o que representa uma redução de, aproximadamente, 275 mm no período estudado.

A distribuição espacial da magnitude de tendência de precipitação das estações pluviométricas para o período (1970 a 2020) é apresentada na Figura 4. As regiões em vermelho indicam tendência significativa de decréscimo pluviométrico, enquanto as regiões em turquesa indicam tendências não significativas de redução de chuvas e em azul indicam tendências não significativas de incremento de chuvas.

As áreas da bacia com maiores tendências de redução de precipitação se encontram nas porções mais desmatadas para implantação de pastagens o que demonstra um padrão local de mudança no regime de precipitação que pode ser influenciado por ação antrópica e pela elevação da altimetria na área. Em pesquisa desenvolvida no Sudeste do Brasil, Zilli et al. (2017) reconheceu a influência da proximidade de grandes centros urbanos e de feições topográficas como fator preponderante nas variações e mudanças dos regimes de precipitação.

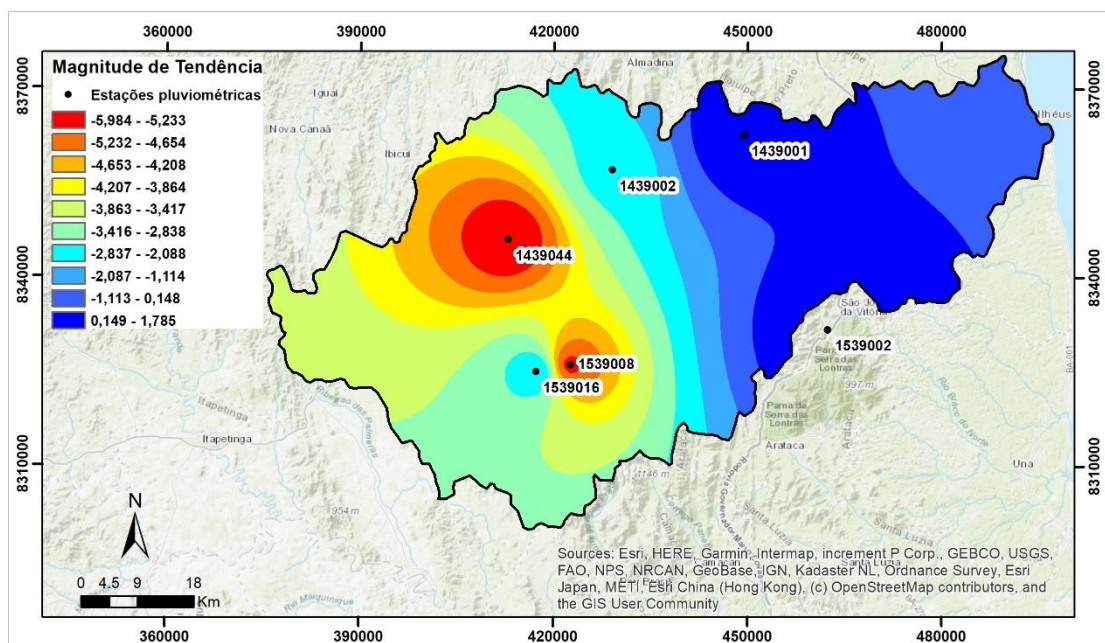


Figura 4. Distribuição espacial da magnitude de tendência para período anual de precipitação na área da BHRC período entre 1970 e 2020.

Figure 4 Spatial distribution of trend magnitude for annual precipitation period in the BHRC area period between 1970 and 2020.

3.4 Análise de tendências sazonal

A análise sazonal de tendências de chuvas é apresentada na Tabela 6. Os resultados mostram que os trimestres de outono e inverno apresentam tendência estatisticamente significativa de decréscimo (-) de chuva em parte das estações analisadas. Enquanto que no período da primavera identificou-se tendência estatisticamente significativa crescente (+) de chuvas.

A significância máxima da estatística Z_{MK} é observada durante a primavera na estação 1539016 ($Z_{MK} = 6,283$ e $SR = 6,297$) e a mínima significância estatística ($Z_{MK} = -3,482$ e $SR = -3,419$) no outono (estação 1539008). Não foram identificadas tendências estatisticamente significativas para o período do verão.

Tabela 6. Análise sazonal das tendências.

Table 6 Seasonal analysis of trends.

Testes estatísticos	Estações pluviométricas					
	1439001	1439002	1439044	1539002	1539008	1539016
Primavera						
Z_{MK}	1,172	4,581	4,723	4,805	6,069	6,283
Trend (±)	NS	S (+)	S (+)	S (+)	S (+)	S (+)
SR	1,107	4,615	4,855	4,930	6,190	6,297
Trend (±)	NS	S (+)	S (+)	S (+)	S (+)	S (+)
SS	0,001	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005
Verão						
Z_{MK}	-1,098	-0,369	-0,110	-0,063	1,100	1,843
Trend (±)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SR	-1,016	-0,369	-0,055	-0,041	1,213	1,844
Trend (±)	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SS	0,001	0	0	0	0,001	0,002
Outono						
Z_{MK}	-1,264	-3,404	-2,985	-2,857	-3,482	-2,519
Trend (±)	NS	S (-)	S (-)	S (-)	S (-)	S (-)
SR	-1,186	-3,362	-2,852	-2,902	-3,419	-2,485
Trend (±)	NS	S (-)	S (-)	S (-)	S (-)	S (-)
SS	0,001	-0,003	-0,002	-0,003	-0,002	-0,002
Inverno						
Z_{MK}	-1,724	-1,036	-3,269	-1,137	-2,887	-2,480
Trend (±)	NS	NS	S (-)	NS	S (-)	S (-)
SR	-1,641	-0,857	-3,109	-1,208	-2,710	-2,142
Trend (±)	NS	NS	S (-)	NS	S (-)	S (-)
SS	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001

S: Significativo ($\alpha = 0,05$); NS: Não significativo. MK: Mann-Kendall test; SR: Spearman's Rho; SS: Sen's Slope.

A inclinação de magnitude da tendência, representada pelo Sen's slope (SS), no outono e no inverno apresentam magnitude decrescente (-), enquanto na primavera a magnitude é crescente (+). A magnitude das tendências que apresentaram significância estatística variou de -0,003 a 0,005 mm/ano. A máxima inclinação de magnitude é observada na estação 1539016 (0,005 mm/ano) e a mínima (-0,003 mm/ano) ocorre no outono (estações 1439002 e 1539002).

4 Conclusões

Este estudo abordou a aplicação de métodos estatísticos não paramétricos na identificação de tendências e variabilidade de precipitação na área da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira a partir da série histórica (1970 – 2020) de totais de precipitação.

A análise da estatística descritiva aplicada mostrou que os maiores índices pluviométricos ocorrem no trimestre do verão e o menor volume de chuva é identificado no inverno.

A precipitação máxima foi observada na estação 1439001 (Lomanto Júnior) e a precipitação mínima na estação 1539016 (Fazenda Manaus) com 2329,48 e 194,80 mm.ano⁻¹, respectivamente.

No período estudado foram identificados 7 anos chuvosos (1980, 1985, 1989, 1992, 1999, 2002 e 2005) e 8 anos com déficit de precipitação (1971, 1986, 1993, 1996, 2003, 2015, 2016, 2019). Apenas 62,5% dos eventos de seca e 42,9% dos eventos chuvosos puderam ser relacionados com o fenômeno ENOS.

O coeficiente de variação indicou predisposição para redução da variabilidade da precipitação em direção ao leste da área de estudo.

Os métodos Spearman's Rho e Mann-Kendall para identificação de tendências mostraram resultados similares. De maneira geral, tendências estatisticamente não significativas prevalecem na área de estudo. Contudo, foi identificada tendência negativa significativa na região centro-oeste para a série de dados anual em duas estações pluviométricas que caracterizam uma redução em torno de 300 mm de chuva em cada estação pluviométrica no período estudado. Para o período sazonal, foi identificadas tendências de decréscimo de chuva nos trimestres de outono e inverno e de aumento de chuva na primavera. Os meses que correspondem ao verão não apresentaram tendências com significância estatística.

Os resultados obtidos nesse estudo colaboram com o entendimento dos processos hidrológicos durante as cinco últimas décadas e podem ser utilizados como referência para a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica.

5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES - Código de financiamento 001. O primeiro autor foi financiado por bolsa (processo 142241/2017-2), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6 Referências

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2010). *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado*, vol. 2, Engecorps/Cobrape. — Brasília.
- Barbosa, J. S. F. & Dominguez J. M. L. (1996). *Texto Explicativo para o Mapa Geológico da Bahia ao Milionésimo*. SICM/SGM, Edição Especial, Salvador.
- Cardoso, S.B., Da Cunha, C.F., Engelbrecht, B.Z. & Chang, H.K. (2020). Detecção e delimitação de pequenos reservatórios na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Bahia, utilizando imagens multiespectrais. *Holos Environment*, 20(4), 458-75. <https://doi.org/10.14295/holos.v20i4.12391>
- Carvalho, A. A. de; Montenegro, A. A. de A.; Silva, H. P. da; Lopes, I.; Morais, J. E. F. de & Silva, T. G. F. da. (2020). Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(1), 15-23. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p15-23>
- Chaves, H. M. L. C & Piau, L. P. (2008). Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(1). <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100031>
- Chu, P. S., Chen, D. J. & Lin, P. L. (2014). Trends in precipitation extremes during the typhoon season in Taiwan over the last 60 years. *Atmospheric Science Letters*, 15: 37-43. <https://doi.org/10.1002/asl2.464>
- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, CPTEC. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. (2022). *Condições atuais do ENOS*. <http://enos.cptec.inpe.br/>>.

- Guedes, H. A. S., Priebe, P. dos S. & Manke, E. B. (2019). Tendências em Séries Temporais de Precipitação no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(2), 283-291. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863340238>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Charles Griffin, London.
- Koppen, W. (1948). *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Econômica, México.
- Lehmann, E. L. (1975). *Nonparametrics, Statistical Methods Based on Ranks*. Holden-Day: San Francisco.
- Leite, M. de L., Adacheski, P. A. & Virgens Filho, J. S. das. (2010). Estudo da variabilidade da precipitação pluvial em municípios da região sul dos campos gerais, Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 6. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v6i0.25605>.
- Lira, B. R. P., Lopes, L. N. A., Chaves, J. R., Santana, L. R. & Fernandes, L. L. (2020). Identificação de homogeneidade, tendência e magnitude da precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 43(4), 426-439. http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_426_439
- Malik, A., Kumar, A., Ahmed, A. N., Fai, C. M.; Afan, H. A., Sefelnasr, A., Sherif, M. & El-Shafie, A. (2020). Application of non-parametric approaches to identify trend in streamflow during 1976–2007 (Naula watershed). *Alexandria Engineering Journal*, 59(3), 1595-1606. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.04.006>
- Mallucci, S., Majone, B. & Bellin, A. (2019). Detection and attribution of hydrological changes in a large Alpine River Basin. *Journal of Hydrology*, vol. 575, 1214-1229. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.020>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, vol. 13, 245–259.
- Mosase, E. & Ahiablame, L. (2018). Rainfall and temperature in the Limpopo River Basin, Southern Africa: means, variations, and trends from 1979 to 2013. *Water*, 10(4), 364. <https://doi.org/10.3390/w10040364>

- Nacif, P. G. S. (2000). Ambientes Naturais da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, com Ênfase nos Domínios Pedológicos, PhD Thesis, Universidade Federal de Viçosa. <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/10732>
- Nóbrega, R. S. & Santiago, G. A. C. F. (2014). Tendência de Temperatura na Superfície do Mar nos Oceanos Atlântico e Pacífico e Variabilidade de Precipitação em Pernambuco. *Mercator Fortaleza*, 13(1). Doi: 107-118. 10.4215/RM2014.1301.0008
- Qin, N. X., Wang, J. N., Gao, L., Hong, Y., Huang, J. L. & Lu, Q. Q. (2020). Observed trends of different rainfall intensities and the associated spatiotemporal variations during 1958–2016 in Guangxi, China. *International Journal of Climatology*, vol. 41, 1–16. <https://doi.org/10.1002/joc.6888>
- Santos, A. P. P. dos, Aragão, M. R. da S., Correia, M. de F., Santos, S. R. Q. dos S, Silva, F. D. dos S. & Araújo, H. A. de. (2016). Precipitação na cidade de Salvador: variabilidade temporal e classificação em quantis. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4), 454-467. <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150048>
- Sarkar, D., Sarkar, T., Saha, S. & Mondal, P. (2021). Compiling non-parametric tests along with CA-ANN model for precipitation. *Water Cycle*, vol. 2, 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.11.002>
- Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação (1999). *Projeto RADAMBRASIL, Folha SD.24 – Salvador, Potencial dos Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro.
- Secretaria do Meio Ambiente (2017). *Plano Estratégico para Revitalização da Bacia do Rio Cachoeira, RP4 Mapeamento da degradação da bacia, volume 1 – Relatório*. <http://cachoeira.nemus-consulting.com/>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendalls Tau. *Journal of American Statistics Association*, vol. 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Silva, j. W., Guimarães, e. C. & Tavares, M. (2003). Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 27(3), 665-674. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542003000300023>

- Silva, L. L. (2007). Precipitações Pluviais da Pré-Estação Chuvosa no Período Chuvoso e suas Influências na Produtividade Agrícola da Paraíba, Master Dissertation, Universidade Federal de Campina Grande. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/5097>
- Silva, V. P. R. da, Pereira, E. R. R., Azevedo, P. V. de, Sousa, F. de A. S de & Sousa, I. F. de. (2011). Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(2), 131–138. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000200004>
- Sharma, C. S., Panda, S. N., Pradhan, R. P., Singh, A. & Kawamura, A. (2016). Precipitation and Temperature Changes in Eastern India by Multiple Trend Detection Methods. *Atmospheric Research*, vol. 180. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.04.019
- Sousa, L.F., Soares, B.B. & Santana, R.O. (2018). Dimensionamento hidrológico para reservatório a fim de sanar as necessidades hídricas de Itabuna-BA, *Estação Científica (UNIFAP)*, 8(2), 69-79. <http://dx.doi.org/10.18468/estcien.2018v8n2.p69-79>
- Souza, T. S. & Nascimento, P. dos S. (2020). Análise multivariada e tendência da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do recôncavo Sul (BA). *Revista Geociências UNESP*, 39(1), 203-213. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i1.14000>
- Torres-Batló, J. & Martí-Cardona, B. (2020). Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology*, vol. 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125485>
- Tucci, C. E. M. (org.) (2007). *Hidrologia Ciência e Aplicação*. EDUSP, Porto Alegre.
- Wang, X., He, K. & Dong, Z. (2019). Effects of climate change and human activities on runoff in the Beichuan River Basin in the northeastern Tibetan Plateau, China. *Catena*, vol. 176, 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.001>
- WMO. World Meteorological Organization. (1989). *Calculation of monthly and annual 30-year standard normals: Prepared by a meeting of experts*. Washington, D. C., USA, (Geneva: WMO).

- Yan, T., Shen, Z. & Bai, J. (2017). Spatial and Temporal Changes in Temperature, Precipitation, and Streamflow in the Miyun Reservoir Basin of China. *Water*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/w9020078>
- Yang, P., Xia, J., Zhang, Y. & Hong, S. (2017). Temporal and spatial variations of precipitation in Northwest China during 1960 – 2013. *Atmospheric Research*, vol. 183, 283–295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.09.014>
- Zeľeňáková, M., Purcz, P., Blišťan, P., Vranayová, Z., Hlavatá, H., Diaconu, D. C. & Portela, M. M. (2018). Trends in precipitation and temperatures in eastern Slovakia (1962 – 2014). *Water*, 10(727). DOI:10.3390/w10060727
- Zilli, M.T., Carvalho, L.M.V., Liebmann, B. & Dias, M.A.S. (2017). A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2269-2279.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

De acordo com os estudos apresentados, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- (i) A classificação da salinidade indica que podem ser encontradas águas doces e salobras e as características climáticas tem influência na qualidade química das águas. A porção oeste, com clima de baixa umidade e precipitações mais escassas apresenta águas subterrâneas mais mineralizadas do que a porção oriental da área.
- (ii) O aumento da salinidade, relacionado ao incremento das concentrações dos íons maiores Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} está associada ao efeito da troca iônica direta durante o contato entre água-rocha evidenciado pelo índice de saturação e índice cloro-alcálico. O Fe_{total} , o Mg^{2+} e o HCO_3^- tem sua fonte relacionada ao intemperismo químico na reação de hidrólise de silicatos. Apesar do HCO_3^- ser o íon mais abundante nas águas subterrâneas na área de estudo não se apresenta como elemento dominante na salinização.
- (iii) A qualidade da água também está relacionada ao processo de evaporação/evapotranspiração. A proximidade da área de estudo com o oceano Atlântico faz com que aerossóis marinhos transportados, depositados e evapotranspirados concentrem íons de K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- .
- (iv) A análise estatística multivariada colaborou na identificação dos parâmetros responsáveis pela variação da qualidade da água e confirmou o papel do processo geoquímico de interação água-rocha via intemperismo e evaporação/evapotranspiração como majoritários na mineralização e salinização das águas da região.
- (v) A análise da estatística descritiva aplicada a série histórica de precipitação no período de 1970 a 2020 mostrou que os maiores índices pluviométricos ocorrem no trimestre do verão e o menor volume de chuva é identificado no inverno.
- (vi) A precipitação máxima foi observada na estação Lomanto Júnior e a precipitação mínima na estação Fazenda Manaus com 2329,48 e 194,80 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, respectivamente.

- (vii) No período estudado foram identificados 7 anos chuvosos (1980, 1985, 1989, 1992, 1999, 2002 e 2005) e 8 anos com déficit de precipitação (1971, 1986, 1993, 1996, 2003, 2015, 2016, 2019). Apenas 62,5% dos eventos de seca e 42,9% dos eventos chuvosos puderam ser relacionados com os fenômenos El Niño/La Niña.
- (viii) O coeficiente de variação indicou predisposição para redução da variabilidade da precipitação em direção ao leste da área de estudo.
- (ix) De maneira geral, tendências estatisticamente não significativas de aumento/redução de chuvas prevalecem na área de estudo. Contudo, foi identificada tendência negativa significativa na região centro-oeste para a série de dados anual em duas estações pluviométricas o que caracterizam uma redução em torno de 300 mm de chuva em cada estação no período estudado.

Os resultados obtidos nesse estudo colaboram com o entendimento dos processos que resultam em salinização e afetam a qualidade da água. Também permitiu identificar as tendências e variabilidades pluviométricas durante as cinco últimas décadas, constituindo-se, relevante como uma base de informações qualitativas e quantitativas acerca da BHRC que possibilitam apoio na tomada de decisões referente a gestão dos recursos hídricos por auxiliar no planejamento urbano e agrícola, proporcionar ação de medidas mitigadoras dos efeitos de seca/chuva e possibilitar utilização da água de acordo com suas características qualitativas.

Desta maneira, as informações aqui apresentadas podem ser utilizadas como referência à definição de estratégias de planejamento e sustentabilidade dos recursos hídricos, possibilitando, no futuro, um uso múltiplo, eficiente e integrado das águas na bacia hidrográfica.

Para avanço da gestão integrada dos recursos hídricos recomenda-se o desenvolvimento de novos estudos relacionando águas superficiais e subterrâneas a partir da aplicação de isótopos estáveis, monitoramento efetivo com objetivo de preservar os corpos hídricos e recuperação das áreas de preservação permanente, principalmente as situadas em áreas urbanas. Recomenda-se ainda, reivindicar seriedade na utilização da legislação existente e aplicar as corretas estratégias de monitoramento e gerenciamento.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES

Artigo 1

Autor 1: Jamille Evangelista Alves. Administração de projeto; Análise formal; Conceituação; Curadoria de dados; Escrita - rascunho original; Escrita - revisão e edição; Investigação; Metodologia; Recursos; Visualização.

Autor 2: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento. Sua participação justifica-se por: Supervisão, Aquisição de financiamento, Metodologia.

Autor 3: Maria da Conceição Rabelo Gomes. Sua participação justifica-se por: Metodologia, Validação, Supervisão.

Artigo 2

Autor 1: Jamille Evangelista Alves. Sua participação justifica-se por: Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Recursos, Visualização, Redação – rascunho original, Redação – revisão e edição.

Autor 2: Thiago dos Santos Gonçalves. Sua participação justifica-se por: Revisão, Metodologia; Recursos.

Autor 3: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento. Sua participação justifica-se por: Supervisão, Aquisição de financiamento.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA DO ARTIGO 1



ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908

Normas para Publicação

1. O Anuário do Instituto de Geociências é uma publicação oficial da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, destinando-se à divulgação da produção científica de interesse amplo, caráter original e inédito, relacionada com as Geociências. Ao submeter um artigo, o(s) autor(es) do mesmo está realizando de maneira automática a transferência de direitos autorais ao Anuário do Instituto de Geociências.
2. A partir de 01/01/2022 não será cobrada qualquer tipo de taxa aos autores.
3. A partir de 01/03/2021 os textos só poderão ser redigidos em língua inglesa. O título, o resumo e palavras-chave (em português), e em inglês (*title, abstract e keywords*) sempre devem ser apresentados.
4. Os artigos podem conter até 20 páginas (tamanho A4) digitadas em espaço um e meio, incluindo ilustrações e referências. Ademais, cada arquivo submetido não poderá ultrapassar 2 Mb.

Preparação para Encaminhamento

ATENÇÃO: A IDENTIFICAÇÃO DOS AUTORES (NOMES, EMAILS E FILIAÇÃO) NÃO DEVEM CONSTAR DO ARQUIVO CONTENDO O MANUSCRITO. LEMBRE-SE TAMBÉM DE EXCLUIR OS AGRADECIMENTOS NA ETAPA DE SUBMISSÃO.

a) Textos

5. Artigos

Em sequência:

- i) Título em inglês, com cada palavra iniciando com maiúscula (não escrever todo o título em maiúscula);
- ii) Título em português, com cada palavra iniciando com maiúscula (não escrever todo o título em maiúscula);
- iii) Abstract (a palavra Abstract não deve ser numerada, deve estar alinhada à esquerda e em negrito, somente com a primeira letra em maiúscula). O texto do abstract deve ser escrito em no máximo 25 linhas e em apenas 1 parágrafo;
- iv) Keywords: (apenas três), separadas por ponto-e-vírgula (sem ponto no final);

v) Resumo (a palavra Resumo não deve ser numerada, deve estar alinhada a esquerda e em negrito, somente com a primeira letra em maiúscula). O texto do resumo deve ser escrito em no máximo 25 linhas e em apenas 1 parágrafo;

vi) Palavras-chave: (apenas três), separadas por ponto-e-vírgula (sem ponto no final);

vii) Legendas das figuras no corpo do texto, na posição aproximada onde deverão aparecer;

viii) Os títulos das seções (Exemplo: Introduction, Methodology and Data, Results, Conclusions, References), devem estar em negrito, alinhados à esquerda e com cada palavra começando com maiúscula. Hierarquizar os títulos e subtítulos em 1, 1.1, 2, 2.1, 2.2 etc. (todos em negrito). Não colocar ponto, traço ou dois pontos após o número de item, subitem, figura ou tabela.

- Editar o texto e tabelas, página tamanho A4, fonte Times New Roman, tamanho 12. As linhas de texto alinhadas à esquerda e em espaço 1,5. Todas as margens devem ter 2,5 cm. Digitar as tabelas no modo “Tabela” do Word. Digitar legenda acima da Tabela. A Tabela deve ser inserida dentro do texto em formato editável (não pode ser inserida como figura).

- Equações devem ser digitadas no texto e numeradas sequencialmente.

- Enviar o arquivo digital “.doc“ ou “.docx” via plataforma OJS, sem que esse ultrapasse 2 Mb.

- Template disponível:

<https://drive.google.com/drive/folders/17MEabXo2LA13qJUWewx3qMug7aoNXuNW>

6. No passo 1 da submissão, no campo Comentários para o Editor, indicar até três pesquisadores (nome completo e endereço de e-mail para contato) com *expertise* no tema de pesquisa que possam atuar como revisores *ad hoc*. Caberá ao Conselho Editorial do Anuário do Instituto de Geociências a escolha dos revisores, podendo incluir ou não algum(ns) dos nomes indicados.

Favor preencher os metadados com as informações completas de todos os autores, inclusive com números ORCID.

b) Ilustrações

7. As ilustrações gráficas, fotográficas e fotomicrográficas serão numeradas sequencialmente, na ordem de sua citação no texto (Figure 1, Figure 2, Figure 3 ...), e consideradas, mesmo pranchas ou quadros, indiscriminadamente como Figuras. Figuras compostas por várias ilustrações devem ser agrupadas em apenas 1 arquivo, rotuladas com letras: Figure 1A.---; B.---;C---. Todas as ilustrações deverão ser preparadas de forma digitalizada em formato .jpg com resolução de 255 dpi. As figuras devem ser preparadas de modo a otimizar o espaço disponível.

8. Legendas e símbolos das ilustrações devem ter dimensões adequadas para permitir legibilidade. Explicar todos os símbolos. Colocar escalas gráficas dentro da área das ilustrações.

c) Referências

9. As citações no corpo do texto devem seguir o estilo Harvard. Recomenda-se a utilização do Mendeley para organização das referências no texto.

Exemplos:

Lima (2020), Lima & Silva (2021), Lima, Pereira & Silva (2021) e para quatro autores ou mais, Lima et al. (2019). No caso de várias referências, organize-as por ordem alfabética, separadas por ponto-e-vírgula. Exemplo: (Karl et al. 2015; Reynolds et al. 2010; Simon et al. 2002).

10. No final do texto, escreva as referências em ordem alfabética pelo sobrenome do primeiro autor, usando os seguintes formatos:

Artigos em Revistas:

Nobre, C.A., Mattos, L.F., Dereczynski, C.P., Tarasova, T.A. & Trosnikov, I.V. 1998, 'Overview of atmospheric conditions during the Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil (SCAR-B) field experiment', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 103, no. D24, pp. 31809–31820.

Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P. da & Custódio, I.S. 2017, 'Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 32, no. 2, pp. 171–86.

Dissertações e Teses:

Perotto, H. 2017, 'Um Estudo sobre Modelagem de Ondas Oceânicas no Atlântico Sudoeste e uma Representação Espaço-temporal Uniforme de Dados de Satélite', Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Publicações em Eventos Científicos:

Komar, P.D. & Gaughan, M. 1973, 'Airy wave theories and breaker height prediction', *Coastal Engineering Proceedings*, pp. 405–418.

Livros:

Palmén, E. & Newton, C.W. 1969, *Atmospheric Circulation Systems: their structure and physical interpretation*, Academic Press, San Diego, California.

Capítulos de Livros:

Satyamurty, P., Nobre, C.A. & Silva Dias, P.L. 1998, 'South America', in D.J. Karoly & D.G. Vincent (eds), *Meteorology of the Southern Hemisphere*, American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 119–39.

Citações da Web:

Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. 2021, Acesso em 14 fev. 2021, <<http://www.anda.org.br/>>.

Citações de Mapas:

Almeida, J.C.H., Heilbron, M., Guedes, E. & Ramos, R.R.C. 2018 'Mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro', 1 mapa: 80 cm x 120 cm. Escala 1:400.000.

Para maiores detalhes, consulte: Harvard Interactive Guide.pdf (uts.edu.au)

Análise pelo Corpo Consultivo

11. Os artigos serão submetidos à análise crítica inicial do Conselho Editorial e, caso possuam mérito científico e sejam relevantes para sua área de pesquisa, serão submetidos à avaliação por pelo menos dois consultores *ad hoc*. Textos não aceitos para publicação serão devolvidos ao autor correspondente.

12. Manuscritos não formatados segundo as normas aqui estabelecidas serão automaticamente recusados, assim como aqueles que não se enquadrarem no escopo do Anuário do Instituto de Geociências ou que apresentarem pouca relevância em seu campo de pesquisa.

Procedimentos após Análise

13. Os artigos serão encaminhados para revisão pelo(s) editor(es), acompanhados de uma lista de recomendações editoriais. Após a realização de todas as correções indicadas deverão ser encaminhados os novos arquivos com o texto e figuras para o editor.

Provas e Separatas

14. Provas dos Artigos serão remetidas aos autores (arquivo no formato PDF) para correção antes de sua publicação.

Alterações necessárias deverão ser encaminhadas na prova do arquivo PDF.

Copyright e Autorizações

15. Não há restrição para o(s) autor(es) em manterem o direito de *copyright* de seus artigos, bem como podem manter os direitos de publicação sem restrições, desde que solicitado quando da submissão do manuscrito.

ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA DO ARTIGO 2

BOLETIM DO MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI. CIÊNCIAS NATURAIS

Objetivos e política editorial

O Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais tem como missão publicar trabalhos originais em biologia (zoologia, botânica, biogeografia, ecologia, taxonomia, anatomia, biodiversidade, vegetação, conservação da natureza) e geologia. A revista aceita colaborações em português, espanhol e inglês (Inglaterra).

Artigos Científicos – textos analíticos originais, resultantes de estudos e pesquisas com contribuição efetiva para o avanço do conhecimento.

Apresentação de originais

O Boletim recebe contribuições somente em formato digital. Os arquivos digitais dos artigos devem ser submetidos online na plataforma via o site da revista (<https://boletimcn.museu-goeldi.br/ojs/?journal=bcnaturais&page=login>), fornecendo obrigatoriamente as informações solicitadas pela plataforma.

Preparação de originais

Todas as submissões devem ser enviadas por meio da plataforma de submissão online. Os originais devem ser enviados em Word, com fonte Times New Roman, tamanho 12, entrelinha 1,5, em laudas sequencialmente numeradas.

No momento da submissão, os arquivos mencionados abaixo devem ser carregados na plataforma de submissão:

O primeiro arquivo (Folha de rosto) deve conter: título (no idioma do texto e em inglês); resumo; abstract; palavras-chave e keywords. Além disso, este arquivo deve conter um parágrafo com informações sobre a contribuição de cada um dos autores, que deve ser descrito usando as seguintes categorias: 1) Administração de projeto; 2) Análise formal; 3) Aquisição de financiamento; 4) Conceituação; 5) Curadoria de dados; 6) Escrita - rascunho original; 7) Escrita - revisão e edição; 8) Investigação; 9) Metodologia; 10) Recursos; 11) Software; 12) Supervisão; 13) Validação; 14) Visualização. Cada um dos autores deve ter contribuído em pelo menos duas

destas categorias. Para mais informações sobre as contribuições dos autores, consulte: <https://www.elsevier.com/authors/policies-andguidelines/credit-author-statement>. Este arquivo deve ser carregado como arquivo do Word.

O segundo arquivo (Texto do artigo) deve conter: título (no idioma do texto e em inglês), resumo, abstract, palavras-chave e keywords, introdução, material e métodos, resultados, discussão (a

qual pode ser apresentada junto com os resultados), conclusão, agradecimentos, referências, legendas no idioma do texto e em inglês das figuras e tabelas (se for o caso). Tabelas devem ser digitadas em Word, sequencialmente numeradas, com claro enunciado. Este arquivo deve ser enviado como arquivo do Word.

Um terceiro arquivo (Lista de avaliadores), contendo o nome, titulação e e-mail de seis possíveis revisores deve ser enviado

como arquivo do Word. Nesse arquivo, também podem ser especificados os revisores que devem ser evitados.

Todas as figuras (ilustrações, gráficos, imagens, diagramas etc.) (PDF com imagens) devem ser apresentadas em páginas separadas e numeradas, com as respectivas legendas no idioma do texto e em inglês, e submetidas na plataforma online como PDF. As imagens também devem ser submetidas separadamente (em arquivos individuais) e ter resolução mínima de 300 dpi e tamanho mínimo de 1.500 pixels, em formato JPEG ou TIFF, obedecendo, se possível, as proporções do formato de página do Boletim, nos limites de 16,5 cm de largura e 20 cm de altura (para uso em duas colunas) ou 8 cm de largura e 20 cm de altura (para uso em uma coluna). As informações de texto presentes nas figuras, caso possuam, devem estar em fonte Arial, com tamanho entre 7 e 10 pts. O texto deve, obrigatoriamente, fazer referência a todas as tabelas, gráficos e ilustrações.

Pede-se destacar termos ou expressões por meio de aspas simples. Apenas termos científicos latinizados ou em língua estrangeira devem constar em itálico. Observar cuidadosamente as regras de nomenclatura científica, assim como abreviaturas e convenções adotadas em disciplinas especializadas. Os artigos deverão seguir as recomendações da APA 7th Edition - Citation Guide (<https://apastyle.apa.org/stylegrammar-guidelines/references/examples>) para uso e apresentação de citações e de referências. Todas as obras citadas ao longo do texto devem estar corretamente referenciadas ao final do artigo.

Estrutura básica dos trabalhos

Título – No idioma do texto e em inglês (quando este não for o idioma do texto). Deve ser escrito em caixa baixa, em negrito, centralizado na página.

Resumo e Abstract – Texto em um único parágrafo, ressaltando os objetivos, métodos e conclusões do trabalho, com, no máximo, duzentas palavras, no idioma do texto (Resumo) e em inglês (Abstract). A versão para o inglês é de responsabilidade do(s) autor(es).

Palavras-chave e Keywords – Três a seis palavras que identifiquem os temas do trabalho, para fins de indexação em bases de dados.

Introdução – Deve conter uma visão clara e concisa de conhecimentos atualizados sobre o tema do artigo, oferecendo citações pertinentes e declarando o objetivo do estudo.

Material e métodos – Exposição clara dos métodos e procedimentos de pesquisa e de análise de dados. Técnicas já publicadas devem ser apenas citadas e não descritas. Termos científicos, incluindo espécies animais e vegetais, devem ser indicados de maneira correta e completa (nome, autor e ano de descrição).

Resultados e discussão – Podem ser comparativos ou analíticos, ou enfatizar novos e importantes aspectos do estudo. Podem ser apresentados em um mesmo item ou em separado, em sequência lógica no texto, usando tabelas, gráficos e figuras, dependendo da estrutura do trabalho.

Conclusão – Deve ser clara, concisa e responder aos objetivos do estudo.

Agradecimentos – Devem ser sucintos: créditos de financiamento; vinculação do artigo a programas de pós-graduação e/ou projetos de pesquisa; agradecimentos pessoais e institucionais. Nomes de instituições devem ser por extenso, de pessoas pelas iniciais e sobrenome, explicando o motivo do agradecimento.

Referências – Devem ser listadas ao final do trabalho, em ordem alfabética, de acordo com o sobrenome do primeiro autor. No caso de mais de uma referência de um mesmo autor, usar ordem cronológica, do trabalho mais antigo ao mais recente. No caso de mais de uma publicação do mesmo autor com o mesmo ano, utilizar letras após o ano para diferenciá-las. Nomes de periódicos devem ser por extenso. Teses e dissertações acadêmicas devem preferencialmente estar publicadas. Todas as referências devem seguir as recomendações da APA 7th Edition - Citation Guide:

Livro: Weaver, C. E. (1989). Clays, muds and shales. Elsevier.

Capítulo de livro: Aranha, L. G., Lima, H. P., Makino, R. K., & Souza, J. M. (1990). Origem e evolução das bacias de Bragança - Viseu, S. Luís e Ilha Nova. In E. J. Milani & G. P. Raja-Gabaglia (Eds.), Origem e evolução das bacias sedimentares (pp. 221-234). Petrobras.

Artigo de periódico: Gans, C. (1974). New records of small amphisbaenians from northern South America. *Journal of Herpetology*, 8(3), 273-276. <http://dx.doi.org/10.2307/1563187>.

Série/Coleção: Camargo, C. E. D. (1987). Mandioca, o “pão caboclo”: de alimento a combustível (Coleção Brasil Agrícola). Ícone.

Documento eletrônico: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2011). Censo Demográfico 2010. <https://censo2010.ibge.gov.br/>

ANEXO C – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 1

[AIGEO] Decisão editorial

revistas@revistas.ufrj.br <revistas@revistas.ufrj.br>

Sáb, 15/01/2022 04:41

Para: Sra Jamille Evangelista Alves <jami_alves@hotmail.com>

Cc: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento <sergiomn@ufba.com>; Maria da Conceição Gomes Rabelo <conceicaorabelo@yahoo.com.br>

Sra Jamille Evangelista Alves,

Foi tomada uma decisão sobre o artigo submetido à revista Anuário do Instituto de Geociências,
"Intervening Factors in the Groundwater Salinization Process, Cachoeira River Basin, Northeastern Brazil".

A decisão é: aceitar para publicação.

Em breve, um outro membro da Equipe do Anuário entrará em contato para prosseguir com o processo de submissão na revista.

Editor Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr.
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
gerson@acd.ufrj.br

Anuário do Instituto de Geociências
<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo>

Este é um e-mail automático.

Para respondê-lo acesse o sistema e clique no ícone da carta.

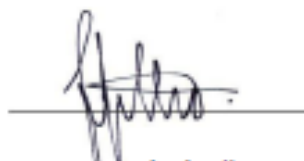
ANEXO D – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 2

BOLETIM MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
**CIÊNCIAS
NATURAIS**

DECLARAÇÃO

Declaro, para os devidos fins, que o artigo intitulado "Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: Tendências e Variabilidade (1970 a 2020)" de autoria de Jamille Evangelista Alves, Thiago dos Santos Gonçalves e Sérgio Augusto de Moraes Nascimento foi aceito para publicação no Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais e será publicado em uma das edições de 2022.

Belém, 20/06/2022



Dr. Fernando da Silva Carvalho Filho
Editor Científico
Museu Paraense Emílio Goeldi-MPEG

