XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

COMPORTAMENTO HIDROGEOQUÍMICO DA MISTURA ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E METEÓRICAS: ESTUDO DE CASO EM AQUÍFERO RASO COSTEIRO EM SERGIPE, BRASIL

Joel Marques da Silva[1]; Adnívia Santos Costa Monteiro[2]; Carlos Alexandre Borges Garcia[3]; Silvânio Silvério Lopes da Costa[4]; Roger Dias Gonçalves[5]

RESUMO – Este estudo avaliou a evolução hidrogeoquímica de um aquífero granular raso em ambiente costeiro tropical úmido por meio de modelagem de mistura (*Mixing*) no PHREEQC, considerando os efeitos do intemperismo através do equilíbrio com fases minerais reativas. A simulação foi realizada utilizando água subterrânea do poço P03 e água meteórica coletadas no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES) no período chuvoso de 2025, adotando uma taxa de recarga de 11% de água da chuva. O modelo incluiu equilíbrio geoquímico com calcita, dolomita, gipsita, halita, biotita e CO_2(g), permitindo avaliar os efeitos da recarga sobre a composição química da água subterrânea. Os resultados indicaram que a entrada de água meteórica promoveu leve diluição iônica e aumento do pH, associado ao tamponamento geoquímico do sistema carbonático. Os índices de saturação da calcita, aragonita e dolomita apresentaram aumento significativo após a mistura, indicando aproximação ao equilíbrio termodinâmico e redução do potencial de dissolução desses minerais, enquanto os minerais evaporíticos permaneceram subsaturados. A modelagem demonstrou ser uma ferramenta eficiente para compreender a interação entre recarga meteórica, intemperismo e evolução hidrogeoquímica, contribuindo para estudos de vulnerabilidade e manejo sustentável de recursos hídricos subterrâneos em ambientes costeiros.

ABSTRACT – This study evaluated the hydrogeochemical evolution of a shallow granular aquifer in a humid tropical coastal setting using a PHREEQC mixing simulation. The model considered a representative scenario involving groundwater from well P03 and meteoric water collected at the Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES) during the 2025 rainy season, with a mixing fraction of 11% rainwater and 89% groundwater. Geochemical reactions were represented by selected reactive phases, including calcite, dolomite, gypsum, halite, biotite, and CO_2(g), to assess the influence of recharge-related mixing and water–rock interaction on groundwater chemistry. The results indicate that meteoric water input produced slight ionic dilution and an increase in pH, consistent with geochemical buffering of the carbonate system. The saturation indices of calcite, aragonite, and dolomite increased after mixing, suggesting a relative shift toward thermodynamic equilibrium, although carbonate minerals remained undersaturated. Evaporitic phases also remained undersaturated. The results show that PHREEQC mixing simulations are useful for interpreting the

[1]) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Rosa Elze, São Cristóvão/SE – CEP 49107-230, (79) 3194-6600, marquesengpetro@gmail.com
[2]) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Rosa Elze, São Cristóvão/SE – CEP 49107-230, (79) 3194-6600, adniviacosta@gmail.com
[3]) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Rosa Elze, São Cristóvão/SE – CEP 49107-230, (79) 3194-6600, carlosabgarcia@gmail.com
[4]) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Rosa Elze, São Cristóvão/SE – CEP 49107-230, (79) 3194-6600, silvanioslc@gmail.com
[5]) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Rosa Elze, São Cristóvão/SE – CEP 49107-230, (79) 3194-6600, roger.dias@academico.ufs.br

combined effects of meteoric recharge, mineral weathering, and hydrogeochemical evolution in shallow coastal aquifers, supporting groundwater vulnerability assessment and sustainable resource management.

Palavras-Chave – Modelagem hidrogeoquímica; Mixing; Índices de saturação.

1 – INTRODUÇÃO

Aquíferos costeiros constituem sistemas hidrogeológicos importantes para o abastecimento, especialmente em regiões densamente povoadas e com forte dependência de água subterrânea. Estima-se que globalmente cerca de um bilhão de pessoas utilizem o recurso subterrâneo como principal fonte de abastecimento, além do importante papel que desempenham na manutenção de ecossistemas costeiros (Huang e Li, 2024; Richardson *et al.*, 2024). Entretanto, esses aquíferos costumam ser altamente dinâmicos e vulneráveis, uma vez que se situam em zonas de transição entre ambientes continentais e marinhos que acaba provocando elevada complexidade hidrogeoquímica (Wu *et al.*, 2024; Oiro *et al.,* 2022).

Em regiões tropicais úmidas, a recarga dos aquíferos rasos ocorre principalmente por infiltração direta da água da chuva, sendo este o principal mecanismo de renovação das águas subterrâneas. Estudos recentes mostram que a precipitação pode contribuir significativamente para a recarga de aquíferos freáticos, em taxas de até 40%, a depender das condições hidrogeológicas e do uso e ocupação do solo. Este processo de infiltração promove a mistura entre a águas meteóricas recentes e águas subterrâneas mais antigas, gerando sistemas hidrogeológicos por diferentes idades de água e trajetória de fluxo (Alezabawy *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

A mistura entre água da chuva e água subterrânea é um dos principais fatores que controlam a evolução hidrogeoquímica em aquíferos rasos. Esse processo pode alterar significativamente parâmetros físico-químicos como pH, condutividade elétrica, potencial redox, alcalinidade, concentração dos íons maiores, além de influenciar nos processos de dissolução mineral e troca iônica (Campillo *et al.*, 2021; Wu *et al.,* 2024). Em aquíferos granulares não consolidados, esses efeitos tendem a ser ainda mais pronunciados devido à maior permeabilidade e à rápida resposta do sistema à recarga pluviométrica, favorecendo ciclos de renovação hídrica relativamente curtos e intensa interação água-rocha (Uhlemann *et al.*, 2022; Asmael *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

A natureza do material litológico, incluindo depósitos arenosos, sedimentos marinhos e material argiloso, exercem forte controle sobre os processos hidrogeoquímicos, influenciando na disponibilidade de minerais reativos e mecanismos de liberação de íons na solução (Wali *et al.*, 2024). Apesar dos avanços ainda recentes, ainda existem lacunas significativas no entendimento dos

processos que governam a mistura entre água da chuva e água subterrânea e seus efeitos sobre a composição geoquímica em aquíferos costeiros rasos.

A modelagem de *Mixing* mostra-se como uma ferramenta robusta para compreensão dos processos hidrogeoquímicos auxiliando na previsão que cenários que podem contribuir para um manejo mais sustentável dos recursos hídricos subterrâneos nessas regiões mais vulneráveis e dependentes desse tipo de recurso (Quinodóz *et al*., 2024).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da mistura entre água meteórica e água subterrânea na composição hidrogeoquímica de um aquífero granular raso em ambiente costeiro tropical úmido.

2 – METODOLOGIA

Área de estudo

Para realização deste estudo, foram utilizados de dados coletados no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), situado no Campus José Aloísio de Campos, da Universidade Federal de Sergipe, na porção leste do estado de Sergipe no limite entre os municípios de são Cristóvão e Aracaju. Esse sítio experimental, conta com 19 poços tubulares instalados, atravessando um sistema aquífero livre e raso, com profundidade construtiva de 20 m e vazão de estabilização variando de 3,0 a 13,0 m³/h (Saturnino *et al.*, 2024).

Observa-se que na área do SEHRES e zonas adjacentes são recobertas por sedimentos do Grupo Barreiras, depósitos flúvio-lagunares e terraços marinhos do Pleistoceno. Os sedimentos do Grupo Barreiras são formados por uma sequência de sedimentos detríticos, siliciclásticos, de origem fluvial e marinha (Arai, 2006), que por sua vez, são recobertos por sedimentos das formações superficiais cenozóicas compostas por material do Quaternário. Enquanto os depósitos flúvio-lagunares, composto por areias finas e siltes argilosos, ricos em matéria orgânica, estendem-se ao longo da rede de drenagem instalada sobre os terraços marinhos pleistocênicos, que por sua vez, são compostos por areias bem selecionadas, localizados nas porções menos elevadas dos vales (Bittencourt *et al.*, 1983). Enquanto a Formação Calumbi, pertencente ao Grupo Piaçabuçu, formada por argilitos e folhelhos, cinza a esverdeados, intercalados com arenitos finos a grossos, localiza-se logo abaixo das formações superficiais continentais (Crepani *et al.*, 2001).

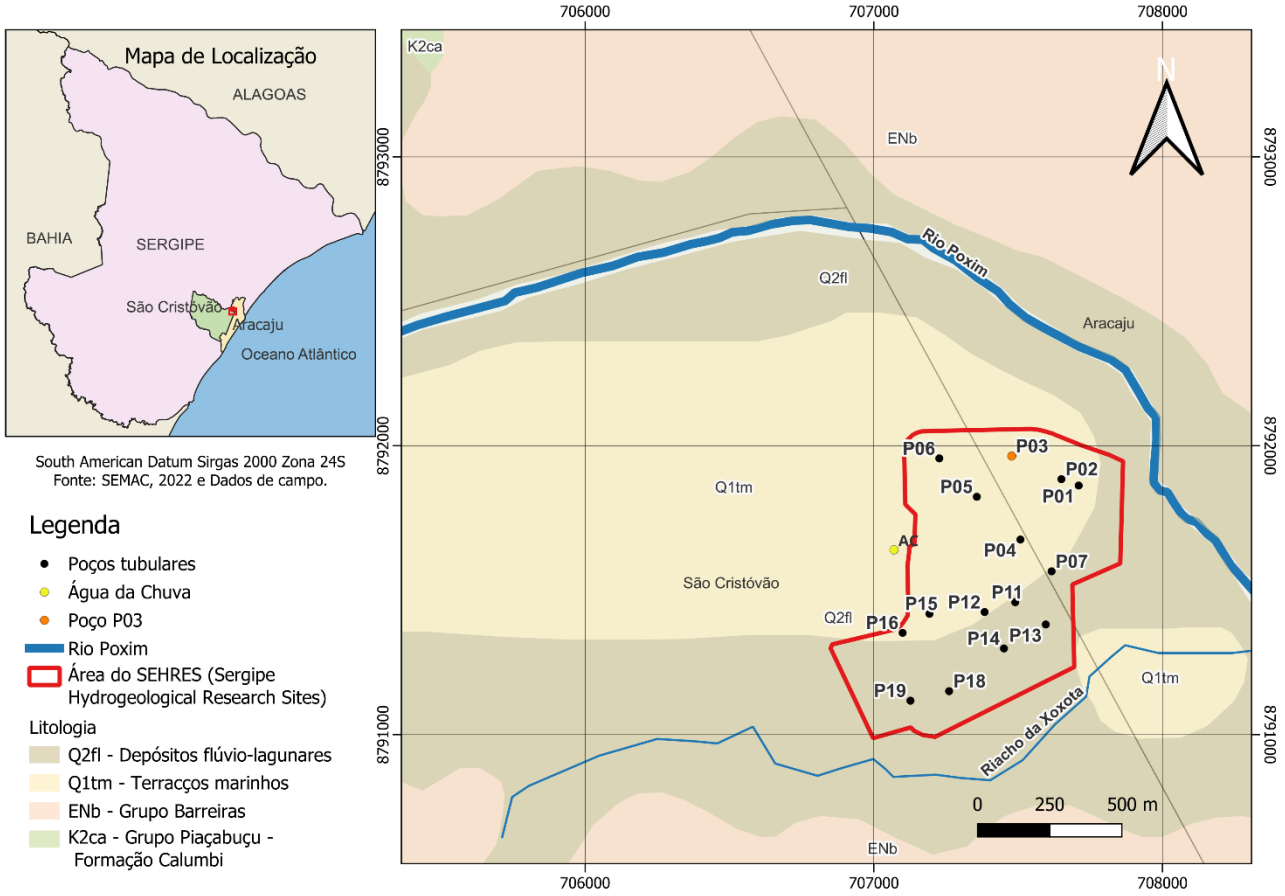


Figura 1 – Localização e geologia do SEHRES.

Materiais e Métodos

Para este trabalho utilizou-se de uma amostra de água subterrânea do poço P03 da rede do SEHRES, tal amostra escolhida por apresentar o menor erro do balanço iônico (-0,29%) dentre todos os poços do SEHRES que foram avaliados e por não apresentar evidências marcantes de alteração antrópica nos parâmetros avaliados. A amostra de água da chuva foi coletada nas imediações do campus universitário e simulados através do software PHREEQC de maneira a representar a evolução hidrogeoquímica dessa mistura.

A amostra de água subterrânea foi coletada em março de 2025, diretamente no poço com auxílio de um Bailer, para tal, o Bailer foi inserido cuidadosamente dentro do poço e realizou-se tanto a sua ambientação quanto a ambientação do frasco de coleta, esse processo foi repetido por três vezes antes da coleta. Já a amostra de água da chuva, foi coletada em julho de 2025, com o auxílio de béqueres de 2L devidamente esterilizados e posicionados distante de árvores, construções e poeiras.

Foi coletado 250 mL do poço P03, armazenado em recipiente de polipropileno, aferidos os valores de temperatura e pH, pelo método eletrométrico, e na sequência as amostras foram levadas à

refrigeração até posterior determinação dos íons principais. A determinação dos íons Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^- e SO_4^{2-} foi realizada através de cromatografia iônica (METROHM, modelo 882 Compact IC Plus).

Como as amostras de água subterrânea e precipitação foram obtidas em meses distintos do período chuvoso, a simulação deve ser interpretada como um cenário hidrogeoquímico representativo, e não como a reprodução direta de um único evento de recarga.

A modelagem hidrogeoquímica foi realizada utilizando o mecanismo de mistura (*Mixing*) do PHREEQC Interactive versão 3.8.6, associado aos processos de intemperismo representados pelo equilíbrio com fases minerais presentes no aquífero (Parkhurst e Appelo, 2013). Essa abordagem permitiu simular cenários de recarga e avaliar as respostas geoquímicas do sistema frente à interação entre água meteórica e água subterrânea. Embora múltiplos processos atuem simultaneamente no aquífero, a modelagem foi estruturada considerando predominantemente os efeitos de diluição e interação água–rocha como principais mecanismos controladores das variações observadas na composição hidroquímica no período avaliado.

Foram consideradas as fases minerais calcita, dolomita, gipsita, halita, biotita e a fase gasosa CO_2 como principais componentes reativos como a amostra de água subterrânea, que podem precipitar ou dissolver, tais minerais foram escolhidos considerando análise mineralógica de um furo de sondagem nas proximidades do poço cuja amostra foi simulada.

Para selecionar as amostras da simulação do *Mixing*, foi calculado o balanço iônico das amostras a fim de garantir a confiabilidade dos dados, calculado a partir da equação $B = [(C - A)/(C + A)] \times 100$, onde B é o balanço da carga cátion-ânion, C representa a soma dos cátions ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+$) e A a soma dos ânions ($HCO_3^- + Cl^- + SO_4^{2-}$), expressos em meq L^{-1}. O método do balanço de carga cátion-ânion possui eficiência ao detectar erros sistemáticos, viés e imprecisão em resultados analíticos, o erro do balanço iônico deve estar dentro do limite de ±10% (Atkinson, 2024; Al-Shujairi, 2016).

Foi adotada uma fração de mistura de 11% de água meteórica, como aproximação conceitual baseada em estudos prévios de recarga no SEHRES (Santos *et al.*, 2025).

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de concentração para os parâmetros utilizados na simulação hidrogeoquímica, assim como os valores obtidos após simulação da mistura e intemperismo são apresentados na Tabela 1, sugerindo uma renovação parcial da água do aquífero em função da recarga.

Pode-se observar que a amostra do poço P03 apresenta pH ácido (4,40), coerente com aquíferos granulares rasos costeiros desenvolvidos em sedimentos arenosos, enquanto a água da chuva possui pH levemente alcalino (7,5). O incremento de CO_2 via água meteórica de recarga tende baixar o pH e consequentemente aumentar a solubilização dos minerais carbonáticos ao produzir ácido carbônico. A entrada de água meteórica pode inicialmente favorecer a formação de ácido carbônico e a dissolução de minerais carbonáticos. No entanto, a dissolução subsequente desses minerais aumenta a alcalinidade e promove o tamponamento do sistema, o que explica a elevação simulada do pH para 6,70.

Considerando a simulação da amostra da água do P03 com água da chuva sem reação com as fases minerais, observa-se uma leve diluição da concentração de todos os íons avaliados, promovida pela entrada de água da chuva no aquífero (11%), que pode ser confirmado pela diminuição da força iônica do sistema de $3{,}31\times10^{-3}$ para $2{,}98\times10^{-3}$ mol/kgw, essas pequenas alterações se devem a pequena diluição promovida pela entrada da água da chuva, semelhante ao observado nos trabalhos de Natesan *et al.* (2022) ao estudar como as monções alteram a química das águas subterrâneas no processo de recarga promovendo sua diluição, e também por Yuan *et al.* (2024) ao avaliar uma interface entre água subterrânea e água da chuva, que mesmo em baixas taxas conseguem reduzir a mineralização e alterar o equilíbrio dos carbonatos.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos utilizados para simulação em mg L^{-1} e resultante da mistura simulada no PHREEQC.

Parâmetro	**Poço P03**	**Chuva**	**Mistura**	**Mistura após equilíbrio com as fases minerais**
T (°C)	27,50	28,00	27,56	27,56
pH	4,40	7,50	5,00	6,70
HCO_3	15,43	5,5	14,34	15,31
Ca	12,80	1,67	11,58	14,18
Cl	72,02	4,24	64,54	71,64
K	4,64	0,46	4,18	4,18
Mg	9,49	0,41	8,49	8,56
Na	45,10	2,8	40,46	45,06
SO_4	41,38	0,16	36,83	42,61

Embora a recarga por água da chuva possa ocasionar uma discreta diluição inicial das espécies iônicas, a infiltração dessa água também estimula os processos de intemperismo ao intensificar as interações entre a água e os minerais do aquífero. Como observado na Tabela 1, há maior solubilização de constituintes minerais e enriquecimento iônico das águas subterrâneas. Assim,

quando os processos de dissolução mineral predominam sobre o efeito de diluição, verifica-se um aumento nas concentrações dos íons dissolvidos.

Após a mistura e o equilíbrio com as fases minerais, observou-se um aumento do pH para 6,70 indicando forte tamponamento geoquímico do sistema. Esse comportamento se deve principalmente à dissolução parcial dos minerais carbonáticos e ao equilíbrio imposto pelo CO_2, promovendo aumento da alcalinidade e neutralização da acidez inicial. Foi observado um incremento da alcalinidade de $2{,}35x10^{-4}$ para $2{,}51x10^{-4}$ eq/kg, confirmando a predominância de espécies bicarbonatadas, típico de água subterrânea em equilíbrio com calcita e dolomita.

A amostra do poço P03 possui uma predominância de cloreto, sódio e sulfato, compatível com a dissolução de minerais evaporíticos e/ou aerossóis marinhos. Trabalhos anteriores, como Alves *et al.* (2021), ao estudarem reservatórios no estado de Sergipe indicaram que a dissolução de sais marinhos também é um mecanismo relevante que exerce influência sobre a composição química das águas, enquanto Monteiro *et al.* (2022) estudou processos evaporativos em reservatórios e verificou influência atmosférica/marinha nessas amostras foi um dos fatores que contribuíram na sua composição.

As variações nos Índices de Saturação (IS) podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices de saturação pré- e pós-mistura entre água da chuva e água subterrânea.

Fases minerais principais	**IS**	**IS pós-mistura**	**Fórmula mineral**
Aragonita	-4.75	-2,48	$CaCO_3$
Calcita	-4,61	-2,34	CaCO3
Dolomita	-8,98	-4,52	$CaMg(CO_3)_2$
Gipsita	-2,59	-2,53	$CaSO_4{:}2H_2O$
Halita	-7.05	-7,05	NaCl
Gás carbônico	-0,12	-2,50	CO_2

Nas condições iniciais os minerais carbonáticos apresentam forte subsaturação, Calcita (SI = -4.61), Aragonita (SI = -4,75) e Dolomita (SI = -8,98), após a mistura esses valores aumentaram para -2,34, -2,4 e -4,52, respectivamente. Embora a entrada de água da chuva possa promover inicialmente efeito de diluição das espécies dissolvidas, a infiltração também estimula o processo de intemperismo favorecendo a dissolução dos minerais presentes no aquífero. Esse comportamento está associado principalmente ao aumento do pH e redução da atividade do íon H^+ após a mistura, favorecendo condições geoquímicas menos agressivas à dissolução carbonática quando comparado as condições iniciais (Salem *et al.*, 2022; Mohamed *et al.*, 2022).

A reação de dissolução da calcita pode ser representada por:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^- \quad (1)$$

Nesse contexto, a presença de CO_2 dissolvido exerce papel fundamental. O modelo PHREEQC mostra que o sistema foi condicionado a uma fugacidade de CO_2(g) de log $fCO_2 = -2{,}5$, resultando em aumento do carbono inorgânico dissolvido (Total $CO_2 = 3{,}516 \times 10^{-4}$ mol/kg). O incremento do CO_2 favorece inicialmente a dissolução dos carbonatos, mas o aumento simultâneo da alcalinidade e do pH reduz progressivamente essa tendência, aproximando o sistema do equilíbrio (Kumar *et al.*, 2023).

Os minerais evaporíticos, por outro lado, permaneceram fortemente subsaturados após a mistura. O SI da gipsita variou apenas de −2,59 para −2,53, enquanto a halita permaneceu inalterada (−7,05). Isso sugere que a mistura com água de chuva não foi suficiente para modificar significativamente a força iônica do sistema nem promover saturação em relação a esses minerais altamente solúveis. A persistente subsaturação da halita indica potencial contínuo de dissolução, compatível com sistemas contendo influência salina residual, aerossóis marinhos ou aporte evaporítico difuso (Salem *et al.,* 2022; El-Azhari *et al.*, 2025).

4 – CONCLUSÕES

A modelagem hidrogeoquímica de mistura (*Mixing*) usando o PHREEQC aplicada a águas subterrâneas e águas meteóricas é relativamente pouco explorada em estudos hidrogeoquímicos. A ferramenta mostrou-se eficiente para avaliar a evolução química das águas subterrâneas em aquíferos costeiros rasos, permitindo simular cenários de recarga e compreender os principais processos responsáveis pelo controle da composição hidroquímica do sistema. A integração entre os processos de mistura e intemperismo possibilitou identificar alterações relevantes no equilíbrio geoquímico, especialmente no sistema carbonático, evidenciando a influência da recarga meteórica sobre as reações de dissolução mineral e o tamponamento químico da água subterrânea. Além de possibilitar a avaliação das tendências de equilíbrio mineral e da evolução do sistema carbonático, esse tipo de modelagem possui importante aplicação na gestão de recursos hídricos, pois auxilia na interpretação dos efeitos geoquímicos da recarga e pode subsidiar estudos de vulnerabilidade, qualidade da água e manejo sustentável da água subterrânea em ambientes costeiros.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pesssoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, processo nº 421509/2025-2.

REFERÊNCIAS

AL-SHUJAIRI, S.O.H. (2016). "Reliability of water resources quality monitoring program data". *Al-Nahrain University College of Engineering Journal* 19(2), pp. 246–254.

ALEZABAWY, A.K.; EISSA, M.; SALEM, Z.E. (2024). "Hydrogeochemical and isotopic investigations of groundwater in the reclaimed desert located between EL Nasr canal and Mariut Tableland, NW Coast, Egypt". *Scientific Reports* 14, 21172.

ALVES, J.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* 26, e24.

ARAI, M. (2006). "A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras". *Geologia USP. Série Científica* 6(2), pp. 1–6.

ASMAEL, N.; DUPUY, A.; MCLACHLAN, P.; FRANCESCHI, M. (2023). "Hydro-Geochemical Characteristics of the Shallow Alluvial Aquifer and Its Potential Artificial Recharge to Sustain the Low Flow of the Garonne River". *Water* 15(16), 2972.

ATKINSON, J.C. (2024). "Assessment of major ions in groundwater supplied to Monterrey metropolitan area, Mexico: quality assurance, technical analysis, and addenda". *International Journal of Environmental Science and Technology* 21(2), pp. 1181–1192.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FERREIRA, Y.A. (1983). "Evolução paleogeográfica quaternária da costa do estado de Sergipe e da costa sul do estado de Alagoas". *Revista Brasileira de Geociências* 13(2), pp. 93–97.

CAMPILLO, A.; TAUPIN, J.D.; BETANCUR, T.; PATRIS, N.; VERGNAUD, V.; PAREDES, V.; VILLEGAS, P. (2021). "A multi-tracer approach for understanding the functioning of heterogeneous phreatic coastal aquifers in humid tropical zones". *Hydrological Sciences Journal* 66(4), pp. 600–621.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

EL-AZHARI, A.; BRAHIM, Y.A.; BARBECOT, F.; HSSAISOUNE, M.; BERROUCH, H.; LAAMRANI, A.; HADRI, A.; BROUZIYNE, Y.; BOUCHAOU, L. (2025). "Evaluating groundwater salinity patterns and spatiotemporal dynamics in complex endorheic aquifer systems". *Science of the Total Environment* 994, 180055.

HUANG, G.; LI, L. (2024). "Groundwater Chemistry and Quality in Coastal Aquifers". *Water* 16(14), 2041.

KUMAR, P.; BISWAS, A.; BANERJEE, S. (2023). "Spatio-temporal variability of seawater mixing in the coastal aquifers based on hydrogeochemical fingerprinting and statistical modeling". *Journal of Environmental Management* 346, 118937.

MOHAMED, A.; ASMOAY, A.; ALSHEHRI, F.; ABDELRADY, A.; OTHMAN, A. (2022). "Hydro-Geochemical Applications and Multivariate Analysis to Assess the Water–Rock Interaction in Arid Environments". *Applied Sciences* 12(13), 6340.

MONTEIRO, A.S.C.; SILVA, E.L.; ALENCAR, N.R.O.; ALVES, J.P.H. (2022). "Geochemical modeling of the evaporation process in salinized reservoirs in the semi-arid region of Northeastern Brazil". *RBRH* 27, e21.

NATESAN, D.; SABARATHINAM, C.; KAMARAJ, P.; et al. (2022). "Impact of monsoon shower on the hydrogeochemistry of groundwater along the lithological contact: a case study from South India". *Applied Water Science* 12, 36.

OIRO, S.; COMTE, J.-C.; SOULSBY, C. (2022). "Using stable isotopes to assess groundwater recharge and mixing processes in shallow aquifers". *Hydrological Processes* 36(5), e14592.

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, chapter A43, 497 p.

QUINODÓZ, F.B.; PASCUINI, M.; CABRERA, A.; SCHROETER, P.G.; PRAMPARO, S.; BLARASIN, M.; KRUSSE, E. (2024). "Quantification of mixing proportions of surface water, groundwater, and precipitation in a regional basin using multiple techniques". *Journal of South American Earth Sciences* 142, 104959.

RICHARDSON, C.M.; DAVIS, K.L.; RUIZ-GONZÁLEZ, C.; GUIMOND, J.A.; MICHAEL, H.A.; PALDOR, A.; MOOSDORF, N.; PAYTAN, A. (2024). "The impacts of climate change on coastal groundwater". *Nature Reviews Earth & Environment* 5(2), pp. 100–119.

SALEM, Z.E.; ELNAHRAWY, A.; ATTIAH, A.M.; EDOKPAYI, J.N. (2022). "Vertical and spatial evaluation of the groundwater chemistry in the Central Nile Delta Quaternary aquifer to assess the effects of human activities and seawater intrusion". *Frontiers in Environmental Science* 10, 961059.

SATURNINO, N.M.S.R.; et al. (2024). "Aplicação do método WTF para estimativa de recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe, Brasil". *Scientia Plena* 20(8).

SANTOS, M.B.; et al. (2025). "Hidrodinâmica e recarga subterrânea em Aquífero Costeiro Quaternário em Sergipe: análise sazonal (2023–2024) do SEHRES". *Scientia Plena* 21(11), pp. 1–14.

UHLEMANN, S.; ULRICH, C.; NEWCOMER, M.; FISKE, P.; KIM, J.; POPE, J. (2022). "3D hydrogeophysical characterization of managed aquifer recharge basins". *Frontiers in Earth Science* 10, 942737.

WALI, S.; et al. (2024). "Hydrogeochemistry in tropical environments". *International Journal of Hydrology*.

WU, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; et al. (2024). "Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater recharge and mixing processes in shallow aquifers". *Journal of Hydrology* 631, 129848.

YUAN, R.; LI, Z.; GUO, S. (2024). "Hydrochemical evolution of groundwater in a river corridor: the compounded impacts of various environmental factors". *Discover Water* 4, 32.

ZHANG, Y.; et al. (2024). "Estimation of shallow groundwater recharge using water table fluctuation and unsaturated zone modeling". *Journal of Hydrology* 630, 130689.

ZHANG, Y.; et al. (2025). "Rainfall and groundwater isotopes to investigate aquifer recharge mechanisms and flow dynamics". *European Journal of Hydrology*.