



Hidrodinâmica e recarga subterrânea em Aquífero Costeiro Quaternário em Sergipe: Análise sazonal (2023-2024) do SEHRES

Hydrodynamic behavior and groundwater recharge in a Quaternary Coastal Aquifer in Sergipe:
A seasonal analysis (2023-2024) from SEHRES

M. B. Santos¹; M. E. S. Vieira¹; T. V. S. Silveira¹; M. F. S. Jesus²; N. M. S. R. Saturnino²;
R. D. Gonçalves^{1,2*}

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

*roger.dias@academico.ufs.br

(Recebido em 30 de julho de 2025; aceito em 25 de outubro de 2025)

Este estudo analisou a hidrodinâmica e a recarga do aquífero raso no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), com base em monitoramento sistemático do nível freático realizado entre 2023 e 2024. O objetivo foi compreender a resposta do aquífero às variações sazonais e estimar a recarga subterrânea utilizando o método *Water Table Fluctuation* (WTF), com rendimento específico (Sy) conservador de 10%. O SEHRES, localizado no campus da Universidade Federal de Sergipe em São Cristóvão, abrange um Sistema Aquífero Quaternário (SAQ) livre e arenoso, com elevada conectividade hidráulica e interação dinâmica com o Rio Poxim. O monitoramento semanal de 15 poços tubulares, associado a dados diários de precipitação, permitiu caracterizar a variação sazonal do nível d'água e estimar a recarga líquida. Os resultados indicaram padrões típicos de recarga na estação chuvosa (abril a julho) e rebaixamento gradual na estação seca. A média da recarga estimada aumentou de 132,8 mm em 2023 para 160,7 mm em 2024. A fração da precipitação convertida em recarga passou de 10,4% para 11,0%, refletindo maior eficiência da infiltração. Os mapas potenciométricos evidenciaram fluxo subterrâneo predominante de oeste para leste/sudeste, em direção ao Rio Poxim. A análise espacial revelou variações significativas entre os poços, associadas a diferenças litológicas e uso do solo. Este estudo fornece subsídios para o entendimento da dinâmica hídrica em aquíferos costeiros tropicais e contribui para estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-chave: método VNA, aquíferos costeiros, monitoramento piezométrico.

This study analyzed the hydrodynamics and recharge of the shallow aquifer at the *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), based on systematic groundwater level monitoring conducted between 2023 and 2024. The objective was to understand the aquifer's response to seasonal variations and to estimate groundwater recharge using the *Water Table Fluctuation* (WTF) method, adopting a conservative specific yield (Sy) of 10%. SEHRES, located on the campus of the Federal University of Sergipe in São Cristóvão, encompasses an unconfined and sandy Quaternary Aquifer System (SAQ), characterized by high hydraulic connectivity and dynamic interaction with the Poxim River. Weekly monitoring of 15 observation wells, combined with daily rainfall data, allowed the characterization of seasonal groundwater level variation and the estimation of net recharge. Results revealed typical patterns of recharge during the rainy season (April to July) and gradual drawdown during the dry season. The average estimated recharge increased from 132.8 mm in 2023 to 160.7 mm in 2024. The proportion of rainfall converted to recharge rose from 10.4% to 11.0%, reflecting improved infiltration efficiency. Potentiometric maps indicated a predominant groundwater flow from west to east/southeast, toward the Poxim River. Spatial analysis revealed significant variation among wells, associated with lithological differences and land use. This study provides valuable insights into the hydrological dynamics of tropical coastal aquifers and contributes to the development of sustainable groundwater management strategies.

Keywords: Water Table Fluctuation (WTF), coastal aquifers, piezometric monitoring.

1. INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos depende fundamentalmente de estimativas precisas da recarga, processo responsável pela renovação dos aquíferos e, consequentemente, pela manutenção da disponibilidade hídrica ao longo do tempo [1]. A ausência de dados confiáveis pode levar à superexploração, à contaminação e ao colapso do sistema aquífero, comprometendo o abastecimento de populações e ecossistemas [2]. Este risco é particularmente agudo em aquíferos rasos, que são altamente sensíveis às variações climáticas sazonais e às interações com corpos d'água superficiais, o que os torna sistemas hidrogeológicos dinâmicos, exigindo monitoramento contínuo e detalhado [3-5].

Estimar a recarga de aquíferos é uma tarefa desafiadora devido à variabilidade das taxas de recarga, as quais dependem fortemente do tipo de solo, cobertura e uso do terreno e, principalmente, das condições climáticas [6, 7]. Diante disso, o monitoramento da água subterrânea em poços tubulares é uma atividade determinante para estimar a variabilidade das águas subterrâneas e compreender a dinâmica dos recursos hídricos [8].

A literatura científica demonstra que a eficiência da recarga em aquíferos costeiros é extremamente variável [9] e essa grande disparidade não apenas reforça o papel dominante que as condições locais, como geologia e uso do solo, exercem sobre o balanço hídrico, mas também sublinha a inadequação de se transpor estimativas de recarga de uma região para outra [10], tornando os estudos *in situ*, como aqui apresentado, fundamentais.

O comportamento hidrodinâmico de aquíferos livres reflete, sobretudo, o balanço entre recarga pluviométrica, evapotranspiração, extrações antrópicas e fluxos laterais. Assim, o monitoramento sistemático dos níveis piezométricos é uma ferramenta essencial para caracterizar a resposta do aquífero a eventos climáticos e antropogênicos, identificar tendências de variação do nível d'água ao longo do tempo e subsidiar a implementação de estratégias de manejo baseadas em evidências [11]. As redes de monitoramento de nível freático possibilitam a geração de séries temporais robustas, fundamentais para calibração de modelos hidrogeológicos e para a tomada de decisões sobre uso sustentável dos recursos subterrâneos [12].

Nesse contexto, destaca-se o *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), uma área de estudo localizada no campus da Universidade Federal de Sergipe (UFS), em São Cristóvão-SE, que funciona como um laboratório natural voltado à investigação da dinâmica hídrica em ambientes costeiros. A área é caracterizada por um aquífero livre, raso, inserido em um sistema sedimentar quaternário de natureza essencialmente arenosa. Essas condições geológicas conferem alta porosidade efetiva e conectividade hidráulica ao meio poroso, favorecendo a infiltração direta da precipitação como o Rio Poxim, um importante curso d'água da região [13]. Além de sua relevância científica, o SEHRES exerce um papel estratégico na produção de dados ambientais contínuos e na formação de recursos humanos especializados em hidrogeologia.

O clima da região é classificado como tropical úmido, com duas estações, a chuvosa concentrada entre os meses de março e julho, e a estação seca que se estende de agosto a fevereiro. Esse regime pluviométrico acentuadamente sazonal influencia diretamente os processos de infiltração e recarga do aquífero [12], caracterizando uma maior recarga difusa no período chuvoso, e predomínio de eventos de descarga subterrânea na estação seca, comumente sustentando os corpos d'água superficiais. Essa dinâmica sazonal reforça a importância de se compreender a variabilidade temporal da recarga e do armazenamento, especialmente em áreas urbanizadas e costeiras sujeitas a pressões antrópicas crescentes [14-16]. Reforça também a necessidade de um monitoramento contínuo de nível d'água para entender as variações na disponibilidade hídrica ao longo do tempo, essencial para compreender sua interação com o sistema fluvial. Deste modo, contribui para uma gestão eficiente dos recursos hídricos, tornando o monitoramento hídrico essencial, pois permite entender a resposta do aquífero às mudanças sazonais, identificar padrões de recarga e descarga, assim como avaliar a variação da disponibilidade hídrica ao longo do tempo [17-18].

Para isso, atualmente são empregados métodos como a variação do nível d'água (VNA), também conhecida como *Water Table Fluctuation* (WTF), um dos métodos mais amplamente aplicados para estimar recarga difusa em aquíferos não confinados, devido à sua simplicidade e

baixo custo operacional. O método baseia-se na premissa de que a elevação do nível freático resulta diretamente da infiltração da água no aquífero, sendo sua magnitude proporcional ao rendimento específico (S_y) da formação hidrogeológica aquífera. Apesar da ampla aplicação, estudos apontam a necessidade de ajustes na técnica para considerar fatores como bombeamento e trapeamento de ar [19]. Variações sazonais na evapotranspiração e a interação com corpos d'água superficiais também podem afetar a confiabilidade das estimativas [20, 21].

Ainda, trabalhos em aquíferos rasos tropicais reforçam que a resposta piezométrica à recarga é frequentemente rápida, com defasagens entre eventos de precipitação e elevação do nível freático, e que os volumes anuais de recarga efetiva dependem de fatores como o tipo de solo, cobertura vegetal, urbanização e uso do solo [18]. Essa variabilidade amplamente observada destaca a importância de estudos locais como este, que buscam quantificar a recarga de forma realista e baseada em dados empíricos, e demonstram o valor do método WTF como ferramenta prática e acessível para ambientes com recursos limitados, desde que aplicado com critérios técnicos adequados, como em aquíferos não-confinados, e a presença insubstituível da análise crítica de suas premissas [22].

Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo analisar a hidrodinâmica e a recarga do aquífero raso no SEHRES, com base em monitoramento sistemático do nível d'água subterrânea e dados de precipitação local (2023-2024). Utiliza-se o método WTF para estimar a recarga líquida durante os anos hidrológicos de 2023 e 2024, buscando compreender a resposta do aquífero às variações sazonais e oferecer subsídios técnicos e científicos para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos em ambientes costeiros tropicais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Área

Localizado no leste do estado de Sergipe, entre os municípios de São Cristóvão e Aracaju, o *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES) (Figura 1) está inserido num aquífero livre e raso denominado como sistema aquífero quaternário (SAQ) [15]. No contexto local, um dos afluentes que atravessa a área do SEHRES é o Rio Poxim, que ocupa a porção leste da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe. O Rio Poxim, um dos principais corpos d'água da região, atravessa a porção leste da área, fazendo parte da sub-bacia hidrográfica do Rio Sergipe e exercendo papel fundamental como zona de descarga do aquífero. A drenagem na área segue, predominantemente, uma direção noroeste-sudeste [23], favorecendo a interação direta entre águas subterrâneas e superficiais ao longo de todo o gradiente topográfico [14].

Do ponto de vista geológico, o SEHRES está inserido em um contexto sedimentar costeiro-quaternário, composto principalmente por depósitos flúvio-lagunares e terraços marinhos pleistocênicos. Os depósitos flúvio-lagunares, amplamente distribuídos na área, consistem majoritariamente em areias finas a médias intercaladas com camadas de siltes argilosos ricos em matéria orgânica. Esses depósitos formam zonas de baixa energia deposicional, típicas de ambientes transicionais entre sistemas fluviais e lagunares, e influenciam diretamente na heterogeneidade da condutividade hidráulica local. Além disso, favorecem a ocorrência de zonas de armazenamento preferencial da água subterrânea, especialmente durante eventos de recarga intensa.

Os terraços marinhos pleistocênicos, por sua vez, são compostos por areias bem selecionadas, estratificadas, e representam antigos sistemas de planícies costeiras associadas a variações eustáticas do nível do mar durante o Pleistoceno [24]. Esses terraços são localmente elevados em relação aos depósitos flúvio-lagunares e estão relacionados a episódios de transgressão e regressão marinha que moldaram a morfologia costeira atual. Suas propriedades hidrogeológicas, como maior permeabilidade e espessura variável, conferem características diferenciadas ao fluxo subterrâneo regional.

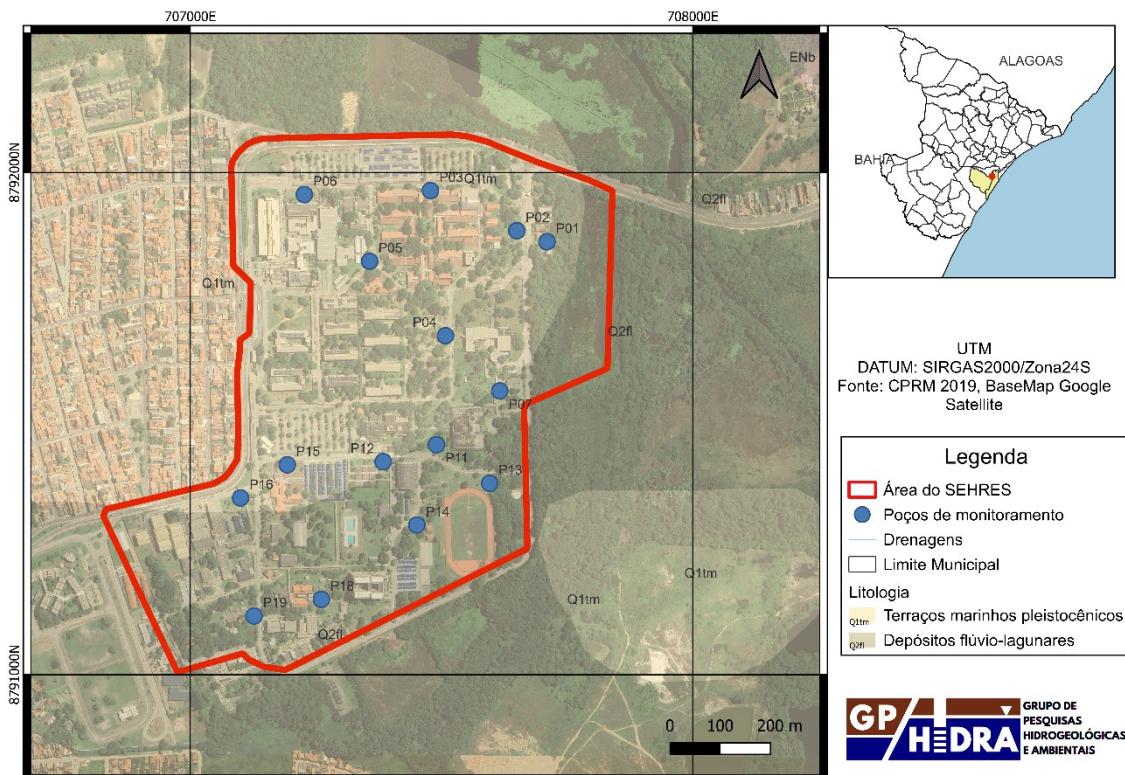


Figura 1: Localização geográfica e contexto geológico da área de estudo (SEHRES – Sergipe Hydrogeological Research Site), destacando a rede de drenagem e os principais litotipos sedimentares associados ao Sistema Aquífero Quaternário (SAQ).

Essa configuração geológica e geomorfológica resulta em uma complexa interação entre os processos de recarga direta, fluxo lateral e descarga fluvial, além de influenciar a variabilidade espacial da resposta hidrodinâmica do aquífero. A presença de diferentes unidades sedimentares, associada à proximidade do Rio Poxim, torna o SEHRES uma área ideal para o estudo da recarga em aquíferos rasos e para a análise da conectividade entre águas subterrâneas e superficiais em ambientes costeiros.

2.2 Monitoramento e Estimativas de Recarga

A rede de monitoramento do SEHRES é composta por 19 poços tubulares instalados em diferentes unidades sedimentares da área de estudo. Desses, 15 poços foram selecionados para o acompanhamento sistemático do nível d'água subterrânea entre março de 2023 e janeiro de 2025 (Figura 1). A seleção dos pontos de observação considerou a distribuição espacial representativa das feições geomorfológicas e a viabilidade de acesso permanente, de forma a gerar uma série histórica contínua e confiável. O principal objetivo desse monitoramento é analisar a dinâmica hidrodinâmica local, subsidiando a avaliação da recarga subterrânea e contribuindo com informações técnicas relevantes para a gestão sustentável do aquífero.

As medições do nível freático foram realizadas semanalmente por meio de fita sonda elétrica com precisão milimétrica (Figura 2). Os dados obtidos foram utilizados para a geração de séries temporais do nível d'água e carga hidráulica, permitindo a caracterização das flutuações sazonais e a identificação de eventos de recarga. Os registros de precipitação diária utilizados para correlação com os dados piezométricos foram obtidos na plataforma InstaRain [25], da estação meteorológica Ponto Novo, situada em Aracaju-SE, com cobertura contínua desde março de 2023.



Figura 2: Procedimento de medição semanal do nível d'água subterrâneo, utilizando medidor elétrico com fita milimetrada: (A) poço protegido com tampa; (B) etapa de inserção do equipamento para medição.

A estimativa da recarga líquida foi realizada utilizando o método *Water Table Fluctuation* (WTF), também conhecido como método da Variação do Nível d'Água (VNA), amplamente aplicado em aquíferos não confinados, devido à sua simplicidade e baixo custo [26]. O método parte do princípio de que os aumentos no nível freático observados em um intervalo de tempo determinado resultam de eventos de recarga efetiva, sendo a taxa de recarga proporcional à variação do nível d'água e ao rendimento específico do aquífero. A Equação 1, que expressa essa relação, é:

$$R = Sy \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad [1]$$

Onde: R é a taxa de recarga subterrânea (mm ou m^3/dia), Sy é o rendimento específico (adimensional), Δh é a variação do nível d'água associada ao evento de recarga (m), e Δt é o intervalo de tempo entre medições consecutivas (dias ou meses).

Neste estudo, adotou-se um valor conservador de rendimento específico igual a 10%, com base em dados típicos de aquíferos arenosos rasos [27]. Essa abordagem permitiu estimar a recarga líquida associada aos eventos de aumento do nível freático, correlacionando diretamente os efeitos da precipitação local sobre o comportamento dinâmico do aquífero.

A metodologia WTF também possibilita a avaliação espacial da recarga ao longo dos diferentes pontos monitorados, considerando a heterogeneidade hidrogeológica local. No entanto, deve-se reconhecer suas limitações: o método não contabiliza o fluxo lateral, evapotranspiração direta, efeitos de bombeamento ou a redistribuição vertical da água no solo, o que pode resultar em estimativas conservadoras da recarga total. Ainda assim, seu uso neste trabalho é justificado pela robustez dos dados de campo e pela representatividade da rede de monitoramento instalada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variação Temporal do Nível d'Água Subterrâneo

O monitoramento semanal do nível d'água nos 15 poços selecionados permitiu a construção de séries temporais representativas da dinâmica freática entre abril de 2023 e janeiro de 2025 (Figura 3). Observa-se um padrão sazonal claro, com elevação dos níveis durante o período chuvoso (abril a julho) e posterior declínio progressivo ao longo da estação seca. Esse comportamento é característico de aquíferos porosos não confinados em regiões tropicais, nos quais a recarga difusa está fortemente condicionada ao regime pluviométrico anual [14, 15].

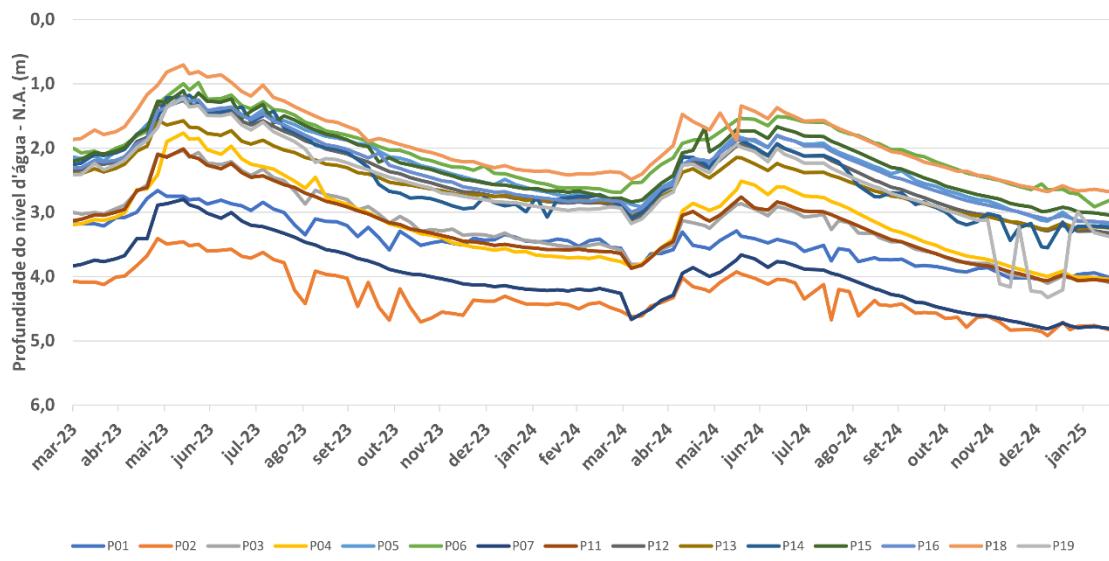


Figura 3: Variação semanal da profundidade do nível d'água subterrâneo (em metros) nos poços monitorados no SEHRES, entre abril de 2023 e janeiro de 2025, evidenciando o padrão sazonal de recarga e rebaixamento do aquífero.

A resposta do aquífero à recarga pluvial apresenta um pequeno defasamento temporal, compatível com o tempo de trânsito da água no solo e a capacidade de infiltração local. A elevação mais pronunciada do nível d'água no início do segundo trimestre de cada ano indica uma rápida resposta às chuvas concentradas nos meses de outono e início do inverno, que coincidem com o pico da estação úmida na região.

Análises comparativas entre os poços revelam variações espaciais significativas na amplitude das flutuações. Poços como P04 e P06, situados em zonas mais próximas de áreas com maior infiltração superficial ou recarga direta, apresentaram elevações superiores da lâmina d'água. Por outro lado, poços como P02 e P16, localizados em áreas com possível maior espessura não saturada ou substrato de menor permeabilidade, registraram níveis estáticos mais profundos, indicando menor resposta à recarga.

Além disso, foram identificadas quedas abruptas pontuais do nível d'água em alguns poços, como no P19, atribuídas à interferência antrópica, possivelmente associada a eventos de bombeamento eventual para irrigação. Essas oscilações não seguem o padrão hidrológico natural e devem ser consideradas com cautela na análise estatística da recarga.

Em termos comparativos entre os dois anos hidrológicos, observou-se que em 2024 o aquífero apresentou uma recuperação média mais expressiva do que em 2023, o que está em consonância com o aumento dos volumes precipitados naquele ano. Dutta et al. (2024) [28] demonstraram que mesmo aquíferos rasos em ambientes urbanizados podem apresentar forte variabilidade na resposta piezométrica devido a intervenções antrópicas e modificações na superfície, como impermeabilização e compactação do solo.

3.2 Direção e Comportamento do Fluxo Subterrâneo

Os mapas potenciométricos elaborados com base nas medições do nível freático no início e ao final do período de monitoramento (março de 2023 e dezembro de 2024) permitiram a análise da direção e do comportamento do fluxo subterrâneo no SEHRES (Figura 4). As linhas equipotenciais, que representam locais de igual carga hidráulica, foram traçadas a partir da interpolação dos dados de nível d'água e indicam o gradiente hidráulico predominante no sistema aquífero.

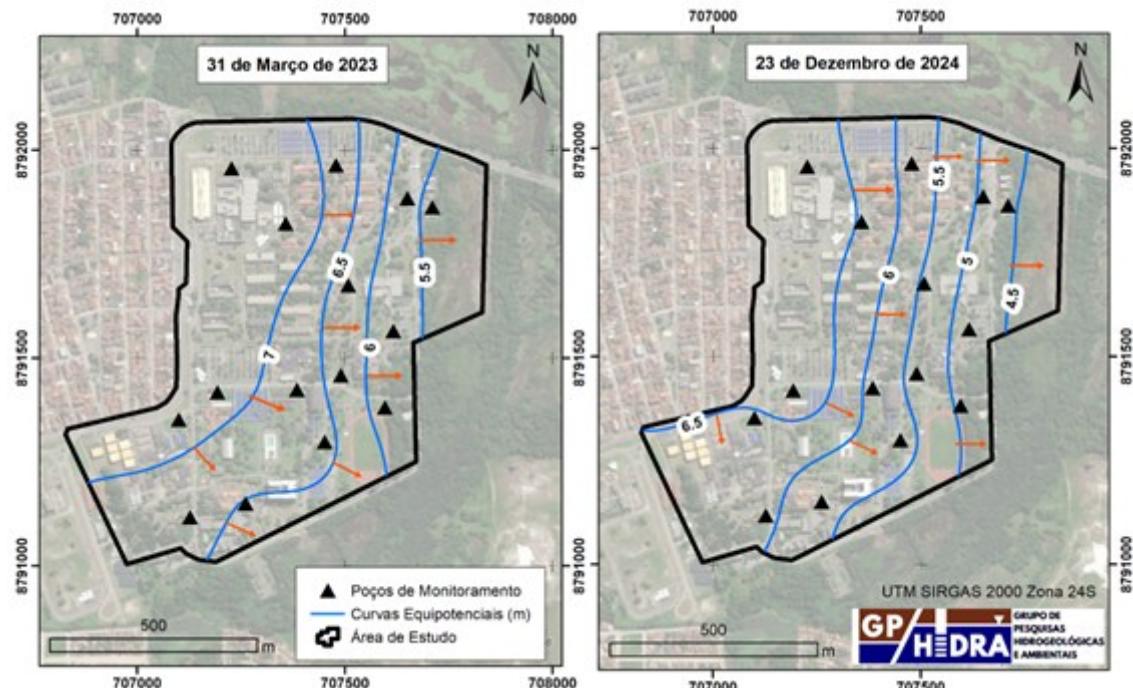


Figura 4: Mapas potenciométricos referentes às medições inicial e final, realizadas em março de 2023 e dezembro de 2024, respectivamente. As setas vermelhas representam a direção de fluxo preferencial.

A interpretação dos mapas revela que o fluxo subterrâneo ocorre, de forma geral, no sentido oeste-leste e sudeste, convergindo em direção ao Rio Poxim, o qual atua como zona de descarga natural do aquífero. Esse padrão é coerente com a morfologia regional da sub-bacia hidrográfica e com a direção de drenagem superficial anteriormente descrita. A presença do rio, associado à baixa altitude relativa da sua calha e à elevada conectividade hidráulica dos sedimentos arenosos do aquífero, favorece a migração da água subterrânea em sua direção, intensificando a troca entre os sistemas hídrico superficial e subterrâneo.

A configuração das curvas equipotenciais sugere um gradiente hidráulico relativamente suave, compatível com ambientes de aquífero raso e poroso, o que implica em velocidades de fluxo moderadas a baixas. Entretanto, variações locais observadas na densidade e orientação das curvas indicam a influência de fatores como a heterogeneidade litológica, variações topográficas e intervenções antrópicas na superfície, como urbanização e modificação do uso do solo.

A comparação entre os mapas potenciométricos dos dois períodos indica que houve manutenção da direção geral do fluxo, com a ocorrência de pequenas alterações locais no padrão equipotencial ao longo do tempo. Estas alterações locais estão possivelmente associadas à variação sazonal da recarga, que durante a subida e descida do nível d'água há mudanças na espessura saturada das camadas geológicas, e eventualmente a episódios pontuais de bombeamento. De fato, eventos de bombeamento causam rebaixamento no nível d'água subterrâneo devido a formação de um cone de rebaixamento, mesmo que seja um evento episódico. Ademais, a geologia local possui certa heterogeneidade litológica, conforme

mencionado, que pode influenciar nos caminhos preferenciais da água devido a diferentes condutividades hidráulicas.

Tais flutuações reforçam a importância do monitoramento contínuo e de alta frequência em ambientes hidrogeológicos dinâmicos, como aquíferos costeiros rasos, nos quais pequenas mudanças climáticas e/ou antrópicas podem impactar o regime de fluxo subterrâneo, em especial a recarga.

3.3 Regime Pluviométrico e Influência na Recarga

A precipitação é o principal fator responsável pela recarga difusa em aquíferos rasos não confinados, especialmente em regiões tropicais com marcadas sazonalidades climáticas. A análise dos dados pluviométricos obtidos no período de março de 2023 a dezembro de 2024 revelou padrões consistentes com o clima tropical úmido da região (Figura 5). Esse regime é caracterizado por uma estação chuvosa entre março e julho e uma estação seca que se estende até fevereiro do ano seguinte.

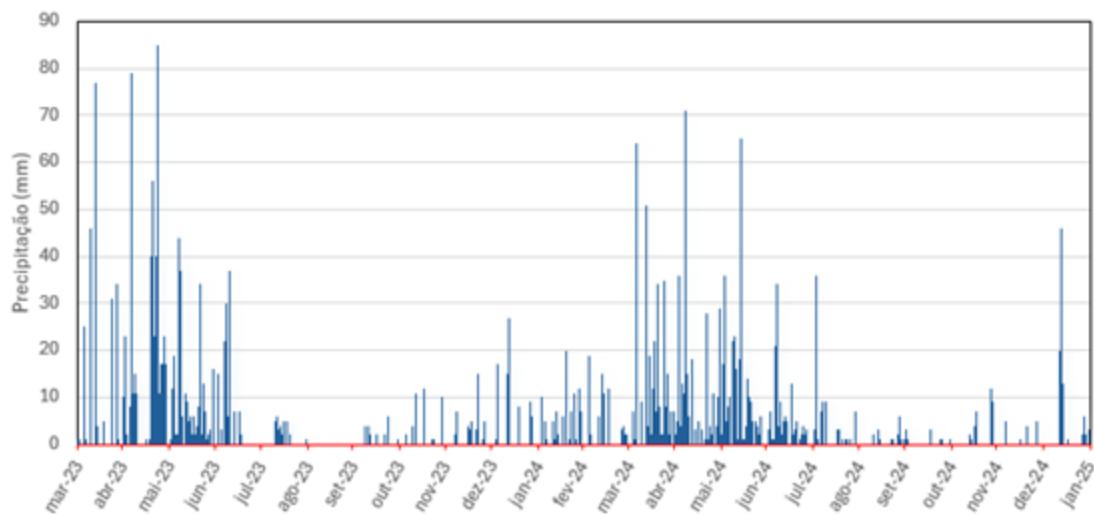


Figura 5: Precipitação diária (em mm) registrada entre março de 2023 e dezembro de 2024, destacando a sazonalidade climática com períodos concentrados de chuvas e longos intervalos secos.

Durante os meses chuvosos, observam-se frequentes eventos de precipitação diária superiores a 50 mm, com registros pontuais acima de 80 mm. Esses eventos de alta intensidade têm potencial para gerar recarga direta significativa, desde que a capacidade de infiltração do solo e as condições de umidade antecedente favoreçam o escoamento vertical até o nível freático. Por outro lado, no período seco (agosto a fevereiro), a precipitação é reduzida, com semanas consecutivas registrando valores diários nulos ou próximos de zero. Essa redução prolongada da entrada hídrica impacta diretamente a manutenção do armazenamento subterrâneo, promovendo o rebaixamento do nível freático e o aumento da descarga subterrânea para os corpos d'água superficiais.

A influência da distribuição temporal da chuva sobre o comportamento do aquífero é especialmente relevante. Chuvas concentradas em curtos períodos, como observadas nos meses de abril e maio de ambos os anos, tendem a causar variações abruptas no nível freático, enquanto precipitações mais espaçadas ao longo da estação chuvosa geram respostas mais atenuadas e sustentadas. Além disso, a umidade antecedente do solo e a cobertura vegetal local desempenham papel importante na modulação da infiltração efetiva, interferindo na fração da precipitação que efetivamente contribui para a recarga.

A comparação entre os anos hidrológicos de 2023 e 2024 indica um aumento no volume total precipitado em 2024, o que está em consonância com os maiores valores de elevação do nível d'água observados nesse ano. Além da influência climática e hidrogeológica natural, é

importante considerar os impactos antrópicos sobre a dinâmica de recarga. O SEHRES, localizado em um ambiente urbano universitário, está sujeito a modificações na superfície, compactação do solo e presença de áreas impermeabilizadas, fatores que podem afetar a infiltração efetiva e a conectividade com o lençol freático.

De maneira semelhante, Kiflay et al. (2025) [29] demonstraram que, em bacias urbanizadas, a recarga pode apresentar padrões diferenciados, sendo reduzida ou retardada em função do uso e ocupação do solo, o que reforça a importância de análises locais e contínuas para estimativas mais precisas.

O SEHRES está inserido em um ambiente urbano, onde modificações da superfície, como impermeabilização parcial, compactação do solo e alteração da cobertura vegetal, podem interferir na capacidade de infiltração da água da chuva. A literatura tem mostrado que esses fatores tendem a reduzir a conectividade entre a superfície e o aquífero, impactando a recarga direta, e que áreas urbanizadas frequentemente apresentam recarga mais lenta ou limitada [30, 31], com padrão espacialmente heterogêneo, reforçando a importância de se considerar o uso e ocupação do solo na análise da recarga subterrânea.

3.4 Estimativas de Recarga Subterrânea com Método WTF

A aplicação do método *Water Table Fluctuation* (WTF), ou método da Variação do Nível d'Água (VNA), permitiu estimar a recarga subterrânea líquida no SEHRES com base nas variações sazonais do nível freático. A Figura 6 apresenta um *boxplot* da variação máxima do nível d'água (Δh) nos 15 poços monitorados, comparando os anos hidrológicos de 2023 e 2024. Os dados indicam um comportamento estatisticamente distinto entre os dois anos, com elevações mais expressivas observadas em 2024.

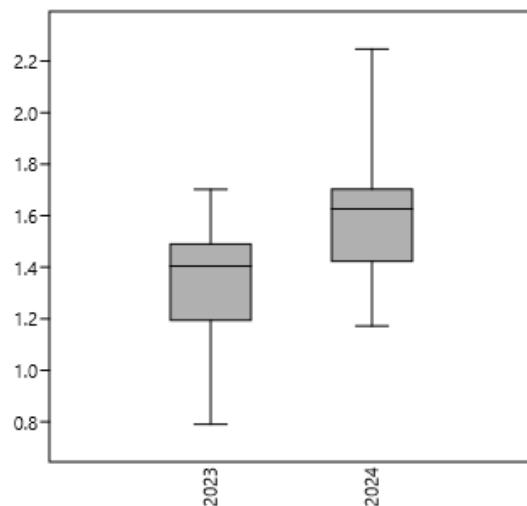


Figura 6: Distribuição estatística (boxplot) da variação máxima do nível d'água subterrâneo (Δh , em metros) nos 15 poços monitorados no SEHRES durante os anos hidrológicos de 2023 e 2024, utilizada na estimativa de recarga pelo método *Water Table Fluctuation* (WTF).

A Tabela 1 detalha as estatísticas descritivas da variação da carga hidráulica (Δh) para ambos os anos, destacando um aumento nos valores de mínimo, máximo, média, erro padrão, mediana, desvio padrão, variância, curtose, primeiro quartil e terceiro quartil.

Em 2023, a variação média da carga hidráulica observada foi de 1,35 m, com mediana de 1,40 m, refletindo um comportamento relativamente estável entre os poços monitorados. O desvio padrão foi de 0,25 m, com erro padrão de 0,06 m e variância de 0,06 m², indicando uma dispersão moderada dos dados. A distribuição dos valores apresentou assimetria negativa (-0,812), sugerindo maior concentração de poços com elevações acima da média, enquanto a curtose próxima de zero (0,17) denota distribuição aproximadamente normal.

Em 2024, houve incremento significativo nos valores: a média aumentou para 1,58 m e a mediana para 1,61 m, indicando maior recarga média em comparação ao ano anterior. A dispersão também cresceu levemente, com desvio padrão de 0,27 m, erro padrão de 0,07 m, e variância de 0,073 m², mantendo, contudo, coeficiente de variação ligeiramente menor (17,2% frente a 18,7% em 2023), o que evidencia uma resposta mais homogênea entre os poços. A assimetria positiva registrada em 2024 (0,63) indica maior frequência de poços com variações abaixo da média, enquanto a curtose mais elevada (1,20) sugere uma distribuição mais concentrada em torno da média.

Esses resultados estatísticos indicam que, embora a magnitude da recarga tenha aumentado, a variabilidade espacial entre os poços foi ligeiramente reduzida, sugerindo maior eficiência e uniformidade no processo de infiltração. Os valores máximos de elevação também se destacaram em 2024, com até 2,25 m em alguns poços (como o P04), frente a 1,70 m registrados no ano anterior.

Tabela 1: Estatística descritiva da subida da carga hidráulica (Δh) obtida pelo WFT durante evento de recarga subterrânea em 2023 e 2024.

Métrica	2023	2024
Mínimo (m)	0,79	1,17
Máximo (m)	1,702	2,25
Média (m)	1,347	1,58
Erro Padrão (m)	0,064	0,07
Mediana (m)	1,404	1,61
Desvio Padrão (m)	0,249	0,271
Variância (m ²)	0,062	0,073
Coeficiente de Variação (%)	0,187	0,172
Assimetria	-0,812	0,636
Curtose	0,171	1,204
Primeiro Quartil	1,194	1,458
Terceiro Quartil	1,49	1,702

Essa resposta ampliada pode ser atribuída ao aumento do volume precipitado em 2024, bem como à maior eficiência da recarga associada a condições de umidade antecedente e menor evapotranspiração. A maior dispersão observada nas elevações mais altas também sugere heterogeneidades locais nas condições hidrogeológicas, como variações de condutividade hidráulica e espessura da zona não-saturada.

Neste estudo, adotou-se um valor conservador de rendimento específico (Sy) igual a 0,10 (10%), em consonância com os valores usualmente observados em aquíferos rasos compostos por sedimentos arenosos não consolidados. A literatura especializada aponta que formações arenosas pouco compactadas apresentam Sy variando tipicamente entre 0,10 e 0,30, sendo os valores mais baixos associados a materiais finos ou moderadamente compactados e os mais altos a areias grosseiras bem selecionadas [18, 27]. A escolha de um valor mais conservador é justificada pela ausência de testes de campo específicos (como ensaios de bombeamento com recuperação ou slug tests) que permitiriam determinar o Sy de forma mais precisa in situ. Ainda assim, tal abordagem fornece uma base metodológica robusta para estimar a recarga líquida efetiva, permitindo uma análise confiável da sua variabilidade temporal e espacial no aquífero costeiro avaliado.

Os resultados obtidos apresentam variações entre os poços, o que pode refletir características hidrogeológicas, mas também limitações metodológicas já discutidas na literatura, como a dependência da acurácia dos valores de Sy e o efeito de fatores externos à recarga direta [16].

É importante destacar que o método WFT, em sua forma clássica, não incorpora componentes do fluxo lateral nem perdas por evapotranspiração ou bombeamento [32-34], o

que pode subestimar a recarga real em regiões de topografia suave e uso intensivo do solo. Em resumo, a recarga de água subterrânea é um processo complexo influenciado por uma interação de fatores climáticos, propriedades do solo e do aquífero, e atividades humanas, como amplamente discutido [35, 36]. A precisão da estimativa da recarga depende criticamente de como esses fatores são medidos e incorporados nos modelos [37, 38]. No caso do SEHRES, as estimativas obtidas fornecem uma base robusta para comparação entre anos (temporal) e pontos de monitoramento (espacial), mas podem ser refinadas futuramente com o uso de modelos integrados que considerem outros fluxos do sistema hídrico subterrâneo.

3.5 Distribuição Espacial da Recarga no SEHRES

Com base nos valores de variação do nível d'água (Δh) obtidos no monitoramento semanal e na aplicação do método WTF, foram elaborados mapas de recarga líquida para os anos hidrológicos de 2023 e 2024, assumindo um rendimento específico (Sy) constante de 10% (Figura 7). Esses mapas permitem analisar a variabilidade espacial da recarga subterrânea na área de estudo, considerando a resposta individual de cada poço monitorado.

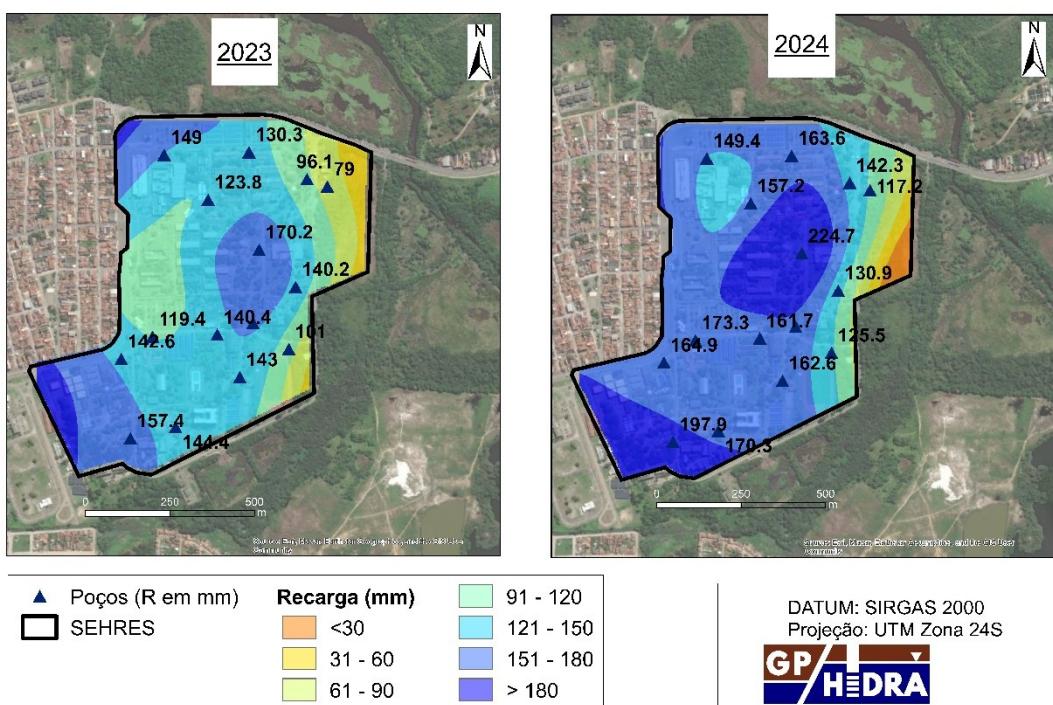


Figura 7: Distribuição espacial da recarga subterrânea estimada no SEHRES para os anos hidrológicos de 2023 e 2024, com base na variação do nível d'água (Δh) e rendimento específico (Sy) de 10%, utilizando o método WTF.

Os resultados indicam um aumento generalizado nas taxas de recarga em 2024 em relação a 2023. A recarga média estimada para o SEHRES aumentou de 132,8 mm em 2023 para 160,7 mm em 2024. Esses valores, que representam 10,4% e 11,0% da precipitação anual, respectivamente.

A heterogeneidade espacial observada, com o poço P04 com 170,2 mm em 2023 e 224,7 mm em 2024 apresentando a maior recarga e outros como P06 com 149 mm em 2023 e 149,4 em 2024 mantendo-se estável, é uma característica recorrente em aquíferos costeiros. A literatura confirma que a variabilidade da recarga está fortemente associada à litologia, topografia e proximidade de zonas de descarga. Essa distribuição desigual reforça a importância de redes de monitoramento bem distribuídas para o desenvolvimento de estratégias de gestão adaptadas à realidade local.

Contudo, nem todos os pontos monitorados apresentaram a mesma magnitude de variação. Os poços P06, com 149 mm em 2023 e 149,4 em 2024, e P07 com valores de 140,2 mm em 2023 e 130,9 mm em 2024, mantiveram taxas de recarga relativamente estáveis entre os dois anos, o que pode estar associado a fatores locais como: menor condutividade hidráulica da zona vadosa, presença de materiais menos permeáveis, ou alterações no uso e cobertura do solo que afetam a infiltração.

Essa heterogeneidade espacial é comum em sistemas aquíferos sedimentares costeiros, nos quais variações litológicas sutis podem causar contrastes marcantes no comportamento hidrodinâmico [39-41]. Além disso, a cobertura vegetal, a compactação superficial, a ocupação urbana e a declividade local influenciam diretamente o escoamento superficial e a infiltração efetiva, contribuindo para a distribuição desigual da recarga subterrânea.

A análise espacial das taxas de recarga também evidencia a importância de redes de monitoramento bem distribuídas e contínuas, capazes de capturar a variabilidade hidrológica de maneira representativa. Esses dados são fundamentais para estimativas mais confiáveis de recarga regional, calibração de modelos hidrogeológicos e desenvolvimento de estratégias de gestão dos recursos hídricos subterrâneos adaptadas à realidade local.

4. CONCLUSÃO

A análise hidrodinâmica do aquífero raso no SEHRES, realizada com base em monitoramento piezométrico semanal entre março de 2023 e janeiro de 2025, evidenciou uma forte influência da sazonalidade climática sobre a dinâmica do nível d'água subterrâneo. Os dados gerados estabelecem uma linha de base fundamental para monitoramentos futuros, nesta área e em outras adjacentes, revelando um padrão recorrente de elevação do nível freático durante o período chuvoso (abril a julho) e posterior rebaixamento ao longo da estação seca, típico de sistemas aquíferos livres em regiões tropicais úmidas.

As estimativas de recarga líquida obtidas por meio do método WTF indicaram um acréscimo entre os dois anos hidrológicos analisados. A recarga líquida, em média, aumentou de 132,8 mm em 2023 para 160,7 mm em 2024. A fração da precipitação convertida em recarga também apresentou leve incremento, passando de 10,4% para 11,0%, refletindo uma maior eficiência no processo de infiltração no ano hidrológico de maior precipitação. Essa variabilidade reforça a importância de redes de monitoramento bem distribuídas para compreender a recarga em ambientes costeiros rasos, sendo recomendada a proliferação de redes contínuas como uma ação prioritária para a gestão hídrica local e regional.

Os resultados obtidos demonstram a sensibilidade do aquífero ao regime pluviométrico e evidenciam a utilidade do método WTF como ferramenta de avaliação da recarga em sistemas não confinados. Além disso, oferecem subsídios técnicos essenciais para a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos da região, destacando a necessidade de proteger áreas de recarga e incorporar a variabilidade sazonal e interanual da recarga ao planejamento hídrico, contribuindo assim para a segurança hídrica, especialmente em ambientes costeiros urbanos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de Iniciação Científica (Processo nº PIB14474-2024).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sufyan M, Martelli G, Teatini P, Cherubini C, Goi D. Managed aquifer recharge for sustainable groundwater management: New developments, challenges, and future prospects. *Water (Basel)*. 2024;16(22):3216. doi: 10.3390/w16223216

2. Gumiła-Kawęcka A, Jaworska-Szulc B, Szymkiewicz A, Gorczewska-Langner W, Angulo-Jaramillo R, Šimůnek J. Impact of climate change on groundwater recharge in shallow young glacial aquifers in northern Poland. *Sci Total Environ.* 2023;877:162960. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162960
3. Meneton P, Jeunemaitre X, de Wardener HE, MacGregor GA. Links between dietary salt intake, renal salt handling, blood pressure, and cardiovascular diseases. *Physiol Rev.* 2005;85(2):679-715. doi: 10.1152/physrev.00056.2003
4. Shamsudduha M, Chandler RE, Taylor RG, Ahmed KM. Recent trends in groundwater levels in a highly seasonal hydrological system: the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2009;13:2373-85. doi: 10.5194/hess-13-2373-2009
5. Fan X, Min T, Dai X. The Spatio-temporal dynamic patterns of shallow groundwater level and salinity: The Yellow River Delta, China. *Water (Basel).* 2023;15(7):1426. doi: 10.3390/w15071426
6. Águila JF, Samper J, Pisani B. Parametric and numerical analysis of the estimation of groundwater recharge from water-table fluctuations in heterogeneous unconfined aquifers. *Hydrogeol J.* 2019 Jun 1;27(4):1309-28. doi: 10.1007/s10040-018-1908-x
7. Baalousha HM, Barth N, Ramasomanana FH, Ahzi S. Estimation of groundwater recharge in arid regions using GIS: A Case study from Qatar. *Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings.* 2018;2018(1):EEPP298. doi: 10.5339/qfarc.2018.EEPP298
8. Boumis G, Kumar M, Nimmo JR, Clement TP. Influence of shallow groundwater evapotranspiration on recharge estimation using the water table fluctuation method. *Water Resour Res.* 2022;58:e2022WR032073. doi: 10.1029/2022WR032073
9. Vasconcelos SMS. Avaliação da recarga subterrânea através da variação do nível potenciométrico no aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, Ceará. *RBRH - Rev Bras Recurs Híd.* 2005 Abr/Jun;10(2):49-57.
10. Labrecque G, Chesnaux R, Boucher MA. Water-table fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. *Hydrogeol J.* 2020 Mar 1;28(2):521-33. doi: 10.1007/s10040-019-02073-1
11. Guzy A, Piasecki A, Witkowski WT. Climate change and shallow aquifers – Unravelling local hydrogeological impacts and groundwater decline-induced subsidence. *Remote Sens Environ.* 2025;321:114682. doi: <https://doi/10.1016/j.rse.2025.114682>
12. Barbosa SA, Pulla ST, Williams GP, Jones NL, Mamane B, Sanchez JL. Evaluating groundwater storage change and recharge using GRACE data: A case study of aquifers in Niger, West Africa. *Remote Sens.* 2022;14(7):1532. doi: 10.3390/rs14071532
13. Chen J, Dai Z, Dong S, Zhang X, Sun G, Wu J, et al. Integration of deep learning and information theory for designing monitoring networks in heterogeneous aquifer systems. *Water Resour Res.* 2022;58(10):e2022WR032216. doi: 10.1029/2022WR032429
14. Santos CSM, de Jesus MFS, Saturnino NMSR, Dias LSS, da Costa SSL, Garcia CAB, et al. Distribuição espacial de parâmetros físico-químicos do Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe: estudo de caso no SEHRES. *Sci Plena.* 2024;20(8):1-11. doi: 10.14808/sci.plena.2024.089908
15. Saturnino NMSR, de Jesus MFS, Dias LSS, Santos CMS, Gonçalves RD. Aplicação do método WTF para estimativa de recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe, Brasil. *Sci Plena.* 2024;20(8):1-10. doi: 10.14808/sci.plena.2024.089909
16. Nóbrega RS. Um pensamento crítico sobre classificações climáticas: de Köppen até Strahler. *Rev Bras Geogr Fís.* 2010;3:18-22.
17. Collentier RA, Bakker M, Klammler G, Birk S. Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2021;25(5):2931-49. doi: 10.5194/hess-25-2931-2021
18. Gonçalves RD, Teramoto EH, Engelbrecht BZ, Alfaro Soto MA, Chang HK, van Genuchten MT. Quasi-saturated layer: Implications for estimating recharge and groundwater modeling. *Groundwater.* 2019;58(2):235-47. doi: 10.1111/gwat.12916
19. Becke AL, Solórzano-Rivas SC, Werner AD. The watertable fluctuation method of recharge estimation: A review. *Adv Water Resour.* 2024;181:104635. doi: 10.1016/j.advwatres.2024.104635
20. Crosbie RS, Binning P, Kalma JD. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water-table fluctuation method. *Water Resources Res.* 2005;41(1):1-9. doi: 10.1029/2004WR003077.
21. Fan J, Oestergaard KT, Guyot A, Lockington DA. Estimating groundwater recharge and evapotranspiration from water table fluctuations under three vegetation covers in a coastal sandy aquifer of subtropical Australia. *J Hydrol (Amst).* 2014 Nov 7;519(PA):1120-9. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.039
22. Healy RW, Cook PG. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology J.* 2002;10:91-109. doi: 10.1007/s10040-001-0178-0

23. Rocha RM, Lucas AAT, Almeida CAP, Menezes Neto EL, Aguiar Netto AO. Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio Poxim-Açu, Sergipe, Brasil. *Rev Ambient Água*. 2014;9(2):277-86. doi: 10.4136/ambi-agua.12
24. Bittencourt ACS, Martin L, Dominguez JML, Ferreira YA. Evolução paleogeográfica quaternária da costa do estado de Sergipe e da costa sul do estado de Alagoas. *Rev Bras Geoc*. 1983;13(2):93-7.
25. Instarain.com.br. Gráfico de precipitação diária [Internet]. Aracaju (SE): Instarain; 2025 [citado em 3 out 2025]. Disponível em: <https://www.instarain.com.br/climaju/grafico>.
26. Scanlon BR, Healy RW, Cook PG. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol J*. 2002;10(1):18-39. doi: 10.1007/s10040-001-0176-2
27. Woessner WW, Poeter EP. Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow. 4th ed. Guelph (ON): The Groundwater Project; 2020. doi: 10.21083/978-1-7770541-2-0
28. Dutta J, Choudhury R, Nath B. Quantification of Urban Groundwater Recharge: A Case study of rapidly urbanizing Guwahati City, India. *Urban Sci*. 2024;8(4):187. doi: 10.3390/urbansci8040187
29. Kiflay E, Schirmer M, Foppen JW, Moeck C. Impact of urbanization on groundwater recharge: altered recharge rates and water cycle dynamics for Arusha, Tanzania. *Hydrogeol J*. 2025;33:33-47. doi: 10.1007/s10040-024-02870-3
30. Bonnin JJ, Lanças KP, Avalos JMM. Índice de cone, capacidade de suporte de carga e teor de água de um Latossolo Vermelho: correlações e mapas de isocompactação. *Energ Agric*. 2012 Abr-Jun;27(2):60-75.
31. Minosso J, Antoneli V, Freitas AR. Variabilidade sazonal da infiltração de água no solo em diferentes tipos de uso na região sudeste do Paraná. *Geogr Merid*. 2017 Jan-Jun;3(1):86-103. doi: 10.15210/gm.v3i1.11041
32. Zhang Z, Wang W, Gong C, Zhang M. A comparison of methods to estimate groundwater recharge from bare soil based on data observed by a large-scale lysimeter. *Hydrol Process*. 2020;34:2987-99. doi: 10.1002/hyp.13769
33. Gong C, Zhang Z, Wang W, Duan L, Wang Z. An assessment of different methods to determine specific yield for estimating groundwater recharge using lysimeters. *Sci Total Environ*. 2021;788:147799. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147799
34. Heppner CS, Nimmo JR, Folmar GJ, Gburek WJ, Risser DW. Multiple-methods investigation of recharge at a humid-region fractured rock site, Pennsylvania, USA. *Hydrogeol J*. 2007;15:915-27. doi: 10.1007/s10040-006-0149-6
35. Abidakun OJ, Saito M, Onodera S, Wang K. Impacts of urbanization and climate variability on groundwater environment in a basin scale. *Hydrology (Basel)*. 2025;12(7):173. doi: 10.3390/hydrology12070173
36. Molua CO, Morka JC. Assessing the impact of urbanization on groundwater resources: Using geophysical surveys to assess groundwater recharge rates, aquifer storage, and water quality. *Thai J Phys*. 2024;41(1-2):1-21.
37. Cartwright I, Morgenstern U, Hofmann H, Gilfedder B. Comparisons and uncertainties of recharge estimates in a temperate alpine catchment. *J Hydrol*. 2020;590:125558. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125558
38. Chemingui A, Sulis M, Paniconi C. An assessment of recharge estimates from stream and well data and from a coupled surface-water/groundwater model for the des Anglais catchment, Quebec (Canada). *Hydrogeol J*. 2015;23:1731-43. doi: 10.1007/s10040-015-1299-1
39. Pool M, Post VEA, Simmons CT. Effects of tidal fluctuations and spatial heterogeneity on mixing and spreading in spatially heterogeneous coastal aquifers. *Water Resour Res*. 2015;51:1570-85. doi: 10.1002/2014WR016068
40. Priyanka BN, Kumar MSM. Three-Dimensional Modelling of Heterogeneous Coastal Aquifer: Upscaling from Local Scale. *Water (Basel)*. 2019;11(3):421. doi: 10.3390/w11030421
41. Cao C, Zhang J, Gan W, Nan T, Lu C. Characterization of Heterogeneous Coastal Aquifers Using A Deep Learning-Based Data Assimilation Approach. *Water Resour Res*. 2024;60(1):e2023WR036087. doi: 10.1029/2023WR036087