



# Aplicação do método WTF para estimativa de recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe, Brasil

Application of the WTF method for estimating groundwater recharge in the Quaternary Aquifer System in Sergipe State, Brazil

N. M. R. S. Saturnino<sup>1</sup>; M. de F. S. de Jesus<sup>1</sup>; L. S. S. Dias<sup>2</sup>; C. S. M. Santos<sup>2</sup>;  
R. D. Gonçalves<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

\*roger.dias@academico.ufs.br

(Recebido em 06 de maio de 2024; aceito em 08 de agosto de 2024)

Este estudo inédito de recarga subterrânea em Sergipe tem como objetivo estimar as taxas de recarga no Sistema Aquífero Quaternário em 2023 utilizando o método *Water Table Fluctuation* (WTF), com base em dados piezométricos de poços do SEHRES (*Sergipe Hydrogeological Research Site*), Universidade Federal de Sergipe em São Cristóvão/SE. A metodologia de campo adotada compreende o monitoramento semanal do nível d'água subterrâneo em 15 poços tubulares, utilizando um medidor elétrico de nível de água com precisão milimétrica, no período de março a dezembro de 2023. Foram medidas as cargas hidráulicas dos poços nas estações seca e chuvosa, utilizadas para a aplicação do método WTF. Os resultados refletem taxas de recarga mínima na ordem de 14% (132,8 mm) e máxima de 28% (256,6mm), considerando a precipitação total acumulada de 949,60 mm obtida na estação do CEMADEN no período monitorado e Sy estimado entre 10% e 20%. Esta faixa de valores, embora preliminares, são plausíveis considerando o contexto hidrogeológico e climático da região. Os poços da porção central e sudoeste apresentaram taxas de recarga mais elevadas e que, de modo geral, a recarga diminui em direção ao rio Poxim, principal zona de descarga do aquífero. Os resultados obtidos neste trabalho, ainda que pontuais, preenchem uma lacuna de conhecimento na literatura científica regional. Ademais, estimativas de taxa de recarga são fundamentais para embasar estratégias eficazes de planejamento do uso e conservação dos recursos hídricos, por conseguinte o avanço do conhecimento no SEHRES subsidiará planos de gestão hídrica de curto e longo prazo.

Palavras-chave: recarga de aquífero, método VNA, flutuação do nível d'água.

This unprecedented study of underground recharge in Sergipe aims to estimate recharge rates in the Quaternary Aquifer System in the year 2023 using the *Water Table Fluctuation* (WTF) method, based on piezometric data from wells of the SEHRES (*Sergipe Hydrogeological Research Site*), Federal University of Sergipe, Campus in São Cristóvão/SE. The field methodology adopted involves weekly monitoring of groundwater levels in 15 tubular wells using a millimeter-precision electric water level meter, from March to December 2023. Hydraulic heads of the wells were measured during dry and rainy seasons, used for the application of the WTF method. The results reflect minimum recharge rates on the order of 14% (132.8 mm) and maximum of 28% (256.6 mm), considering the total accumulated precipitation of 949.60 mm obtained at the CEMADEN station during the monitored period and estimated Sy between 10% and 20%. This range of values, although preliminary, is plausible considering the hydrogeological and climatic context of the region. Wells in the central and southwest portion showed higher recharge rates, and overall, recharge decreases towards the Poxim River, the main discharge zone of the aquifer. The results obtained in this work, albeit punctual, fill a gap in knowledge in the regional scientific literature. Furthermore, recharge rate estimates are fundamental to support effective strategies for planning the use and conservation of water resources; consequently, advancing knowledge in SEHRES will subsidize short- and long-term water management plans.

Keywords: aquifer recharge, VNA method, water table fluctuation.

## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são vitais e constituem uma importante interação entre as águas superficiais e as águas subterrâneas, portanto demandam atenção em todas as fases do seu ciclo, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. Porém, as mudanças climáticas, acentuadas nas últimas décadas por conta das atividades humanas, ameaçam esses recursos, quantitativa e qualitativamente, impactando de forma mais grave as áreas urbanas e aquíferos aluviais de pequena escala [1-4].

Diversas atividades têm impactado de forma significativa o recurso hídrico subterrâneo, como a crescente exploração das águas subterrâneas e, conseqüentemente, seu uso descontrolado os quais impulsionam a ideia da escassez hídrica que, por sua vez, gera efeitos significativos nos sistemas naturais de fluxos subterrâneos, tornam essas águas mais propensas à poluição e geram problemas de recalque diferencial do subsolo. Diante disso, destaca-se a urgência de aplicar metodologias de monitoramento para avaliar a disponibilidade e escassez desses recursos hídricos [5, 6].

A metodologia de monitoramento do nível de água em poços, por exemplo, desempenha um papel crucial na compreensão da dinâmica e do uso das águas subterrâneas, uma vez que permite estimar a variabilidade da superfície potenciométrica e compreender o comportamento e as propriedades hidrodinâmicas do aquífero estudado [7]. Outra metodologia igualmente importante são os métodos para estimar a taxa de recarga hídrica subterrânea, como o *Water Table Fluctuation* (WTF), método mais utilizado e essencial para uma gestão eficiente e sustentável das águas subterrâneas [8-12].

Este método destaca-se como o mais difundido, provavelmente devido à disponibilidade abundante de dados sobre a variação do nível freático ao longo do tempo, aliada às estimativas de rendimento específico ( $S_y$ ) e à facilidade e simplicidade de aplicação. Estudos em todo o mundo têm amplamente empregado e explorado essa metodologia [11-14].

O método WTF baseia-se em medições de níveis freáticos em poços de monitoramento por um determinado período [12, 15]. Em sua forma mais usual de ser aplicada, envolve a multiplicação de uma mudança de elevação do nível do lençol freático atribuível a uma variação da recarga ( $\Delta h$ ) por  $S_y$  para eventos de recarga identificáveis dentro de um registro hidrográfico [13]. Portanto, em síntese, esse método está fundamentado na premissa de que as variações dos níveis de águas subterrâneas em aquíferos livres estão relacionadas com as mudanças na quantidade de água armazenada no aquífero, considerando que a água precipitada, após percolar no solo, atinge o nível freático, caracterizando a recarga [16, 17].

Os valores da recarga subterrânea obtidos através do WTF exercem papel fundamental no cálculo do fluxo de base das drenagens e na avaliação da vulnerabilidade à poluição e contaminação. Além disso, são essenciais para o desenvolvimento de estudos de vulnerabilidade a contaminantes e poluentes, permitindo analisar os efeitos da ocupação espacial, do uso da terra e das mudanças climáticas [8, 18].

Neste contexto, em virtude da carência de dados primários e estudos científicos de qualidade nesta temática que demonstrem a dinâmica das águas subterrâneas, dentre eles a ausência de dados referentes a taxas de recarga subterrânea, variação do nível d'água ao longo do tempo e demais respostas dos aquíferos frente à impactos naturais e antrópicos, este estudo visa contribuir na estimativa da recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário e subsidiar cálculos de disponibilidade hídrica de aquíferos rasos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se no Campus Universitário “José Aloísio de Campos”, pertencente à Universidade Federal de Sergipe (UFS), situado no município de São Cristóvão, setor leste do estado de Sergipe. A área dispõe de 19 poços tubulares instalados e catalogados atravessando o sistema aquífero superficial livre, nominado aqui de Sistema Aquífero Quaternário – SAQ (Figura 1). Dos 19 poços disponíveis, 15 poços foram selecionados para a realização da etapa de monitoramento do nível d'água com frequência semanal, por um período de 40 semanas.

Ressalta-se, ainda, que todos esses poços se encontram num aquífero superficial, raso e livre, com profundidade de 20 metros e suas vazões de estabilização encontram-se na faixa de 2,0 a 13 m<sup>3</sup>/h.

Essa área será objeto de monitoramento constante, ininterrupto e integrado, tornando-se um “site experimental” batizado de SEHRES (*Sergipe Hydrogeological Research Site*) com o objetivo de gerar séries históricas de dados contínuos que permitirão a produção de publicações científicas na área de hidrogeologia, recursos hídricos e climatológicos, assim como estimativas inéditas acerca de aspectos hidrodinâmicos e balanço hídrico.

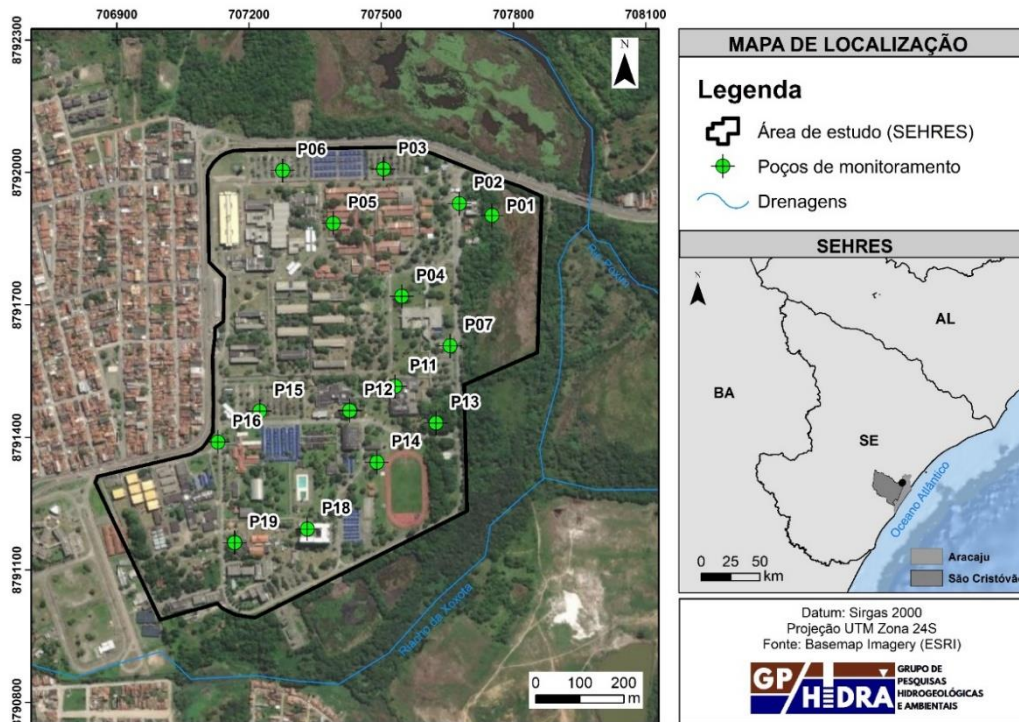


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo (SEHRES – Sergipe Hydrogeological Research Site), dentro do Campus da Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão – SE.

## 2.1 Hidrografia

O Estado de Sergipe abarca oito bacias hidrográficas, sendo três federais (Rio São Francisco, Rio Vaza Barris e Rio Real) e cinco estaduais (Rio Japarutuba, Rio Sergipe, Rio Piauí, Costeira Sapucaia e Costeira Caueira-Abaís). Devido a diversidade climática do estado, que possui zonas com clima do semiárido, do agreste (área de transição) e do litoral, estas bacias apresentam condições distintas de armazenamento de seus recursos hídricos [19].

A bacia hidrográfica que contempla a área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Sergipe, a qual tem sua nascente na localidade da Lagoa das Areias, município baiano de Pedro Alexandre e, quando adentra o território sergipano, percorre o município de Nossa Senhora da Glória e mais 24 municípios sergipanos, desaguando no Oceano Atlântico, em Aracaju, após percorrer 210 km. Um dos afluentes e que atravessa o local do presente trabalho é o rio Poxim, que ocupa a porção leste da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe e é classificado como uma sub-bacia e se estende no sentido NW – SE.

## 2.2 Contexto Geológico

Sob o ponto de vista geológico, a área de estudo é constituída pelo Grupo Barreiras, depósitos flúvio-lagunares e terraços marinhos pleistocênicos (Figura 2). Nesse contexto, as formações superficiais cenozóicas, compostas por pacotes de rochas sedimentares quaternários, recobrem a

unidade sedimentar denominada de Grupo Barreiras. Esta unidade é constituída por uma sequência de sedimentos detríticos, siliciclásticos, de origem fluvial e marinha [20].

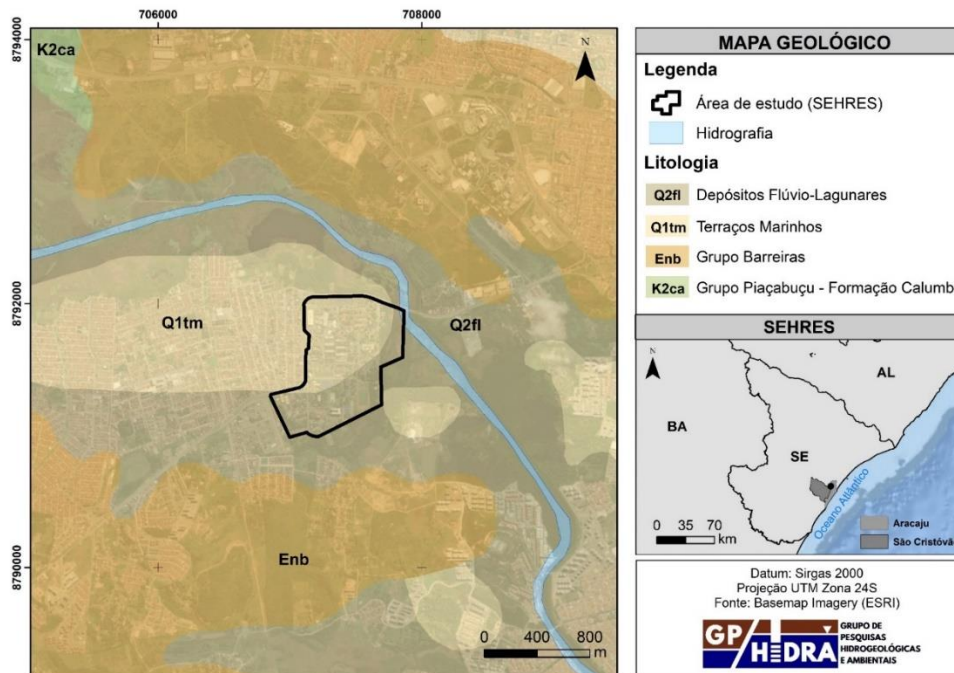


Figura 2: Mapa geológico local, indicando as unidades aflorantes no entorno do SEHRES dentro do Campus da Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão – SE. Fonte: adaptado de Mapa geológico e de recursos minerais do Estado de Sergipe (2014) [21].

Os sedimentos quaternários evidenciam a penúltima e última transgressões ocorridas na região costeira, registradas durante o Pleistoceno e o Holoceno [22]. Estes pacotes sedimentares estão representados na área de estudo pelos depósitos flúvio-lagunares da sub-bacia hidrográfica do rio Poxim e por terraços marinhos pleistocênicos. Os depósitos flúvio-lagunares são constituídos por areias e siltes argilosos, ricos em matéria orgânica, que se estendem ao longo da rede de drenagem instalada sobre os terraços marinhos pleistocênicos e abrangem a parte inferior dos vales do Grupo Barreiras.

Quanto aos terraços marinhos pleistocênicos, sua litologia é composta por depósitos de areias bem selecionadas, registradas na posição menos elevada dos vales e próximas a paleofalésias que foram esculpidas nas rochas sedimentares do Grupo Barreiras durante a penúltima transgressão [22].

A unidade sotoposta às formações superficiais continentais compreende o Grupo Piaçabuçu, no qual está inserida a Formação Calumbi. Esta formação representa uma transição sedimentar significativa na bacia, marcada por uma mudança de sedimentação carbonática para siliciclástica. Este evento ocorreu no final do Cretáceo, quando houve um recuo da linha costeira, seguido por erosão da planície costeira e da plataforma exposta. Com a elevação do nível do mar, a plataforma foi recoberta, proporcionando espaço para a deposição de sedimentos em um contexto transgressivo, predominando os folhelhos na Formação Calumbi [23].

### 2.3 Clima

Segundo a classificação climática de Köppen e Geiger [24], a sub-bacia hidrográfica do rio Poxim enquadra-se no clima tropical úmido com seca no verão (tipo As), devido ao baixo relevo e a proximidade com o mar, exposto aos ventos alísios. De acordo com os dados da última normal climatológica (1991-2020), disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a umidade relativa mensal da região está em torno de 75,9% e os meses de abril a junho são os mais



chuvosos, contribuindo para um índice pluviométrico anual médio de 1189,3 mm. O mês de dezembro é o mais seco, com 24 mm, enquanto maio é o de maior precipitação, com uma média de 226,9 mm. O mês de março apresenta uma temperatura média de 27,7 °C, sendo o mês mais quente do ano. Já julho e agosto são os meses com menores temperaturas ao longo do ano, com uma média de 24,9 °C. A diferença de precipitação entre o mês mais chuvoso e o mês mais seco é de 202,9 mm. Durante o ano, as temperaturas médias têm uma variação de 2,8 °C.

Durante o período compreendido entre os dias 31 de março a 29 de dezembro foi realizado o monitoramento semanal de 15 poços tubulares, e simultaneamente, foram coletados dados de pluviometria de uma estação pluviométrica da rede do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais). A estação selecionada, denominada Centro (código 280030803A), está localizada no município de Aracaju (SE), a, aproximadamente, 300 metros de distância do local de pesquisa. Ao longo dos dias de monitoramento, a precipitação total acumulada registrada foi de 949,40 mm, destacando-se que os dias mais chuvosos foram 7 e 19 de maio, com um acumulado diário de 54,60 e 63,80 mm, respectivamente, como pode ser observado na Figura 3. É válido salientar que durante o período de estiagem, é comum observar a ocorrência de registros nulos nos dados fornecidos pelo CEMADEN em alguns dias da série histórica. Esses registros nulos foram interpretados como dias secos.

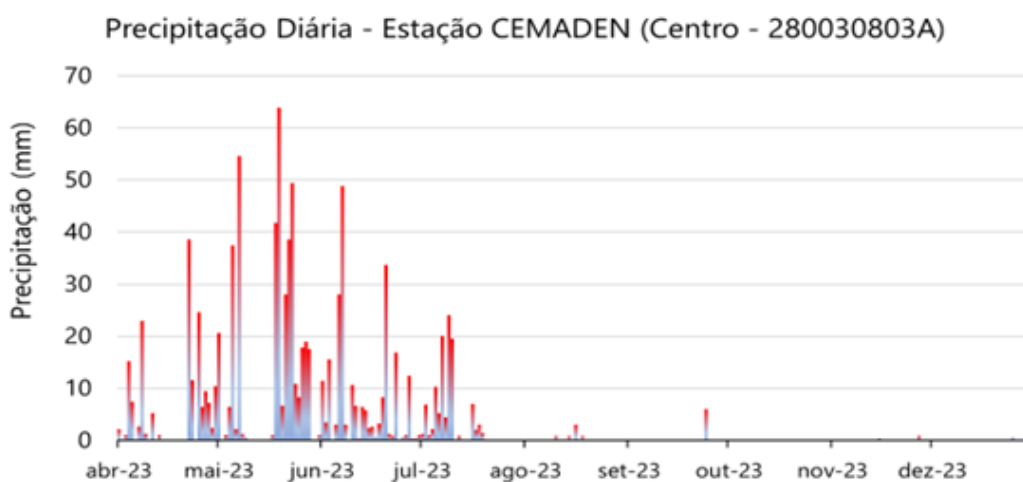


Figura 3: Precipitações diárias na estação Centro, durante o período monitorado (SE).

O monitoramento do nível d'água foi conduzido semanalmente em 15 poços tubulares localizados no campus utilizando um medidor elétrico de nível de água de precisão milimétrica. Os poços identificados possuem 7 polegadas de diâmetro, profundidade de instalação de 20 metros e vazões de estabilização entre 2,0 e 13 m<sup>3</sup>/h, segundo dados da empresa de perfuração. A série histórica de monitoramento abrange um período de 40 semanas e fornece dados sobre o nível estático dos poços e da carga hidráulica. O monitoramento está sendo executado numa frequência semanal, o qual teve início em 31/03/2023. A análise neste estudo considerou até a data de 29/12/2023.

Os dados obtidos em todas as etapas foram organizados, processados e integrados em ambiente SIG, no software ArcGIS, por meio do ArcMap versão 10.5, a fim de confeccionar mapas temáticos representativos da área, como o mapa de localização dos poços, mapa geológico e mapas de recarga subterrânea.

Para estimar a recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário, o método WTF foi utilizado devido à sua ampla aplicação em estudos hidrogeológicos semelhantes [12], especialmente em aquíferos livres e rasos. A escolha desse método foi respaldada pela disponibilidade de dados de potenciometria ao longo de um período que abrange um evento de recarga completo no ano hidrológico, garantindo uma análise confiável das taxas de recarga subterrânea no sistema aquífero.

O método WTF baseia-se na relação entre as variações nos níveis de água subterrânea e as mudanças na quantidade de água armazenada no aquífero. A aplicação da equação fundamental

do método permite a estimativa da recarga subterrânea, considerando o coeficiente de rendimento específico ( $S_y$ ) do aquífero e a variação do nível d'água durante eventos de recarga identificáveis. Para aquíferos porosos, rasos e livres, comumente se iguala este termo com a porosidade efetiva do meio poroso [7]. Com base nos tipos litológicos dominantes no sistema aquífero estudado, foi considerado que o  $S_y$  varia, em média, de 10% a 20% (0,1 a 0,2).

A forma simplificada do WTF é amplamente empregada na literatura, como evidenciado por estudos de autores como [25-30]. O método WTF (em português, VNA – Variação do Nível d'Água) calcula a taxa de recarga através da Equação 1, recentemente revisada por Becke et al. (2024) [12].

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \text{Equação 1}$$

Onde “ $R$ ” representa a recarga subterrânea [ $LT^{-1}$ ]; “ $S_y$ ” é o coeficiente de rendimento específico do aquífero (adimensional); “ $\Delta h$ ” é a variação do nível d'água devido a um evento de recarga [ $L$ ] e “ $\Delta t$ ” representa o intervalo de tempo de duração do evento de recarga.

Por fim, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos pelo método WTF. A análise consistiu na confecção de boxplot para visualização gráfica da distribuição dos dados e o cálculo de métricas da estatística descritiva, como média, mediana, desvio padrão e quartis.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os parâmetros aplicados pelo método WTF para cada um dos 15 poços monitorados e os seus respectivos resultados de taxas de recarga subterrânea em mm de lâmina d'água. Ademais, os mapas da Figura 4 apresentam a distribuição espacial da recarga subterrânea para um coeficiente de rendimento específico ( $S_y$ ) de 10% (mínimo) e 20% (máximo), respectivamente.

Considerando a precipitação acumulada de 949,60 mm, registrada no período monitorado, obtém-se uma taxa de recarga mínima de aproximadamente 14% (132,8 mm) da precipitação e uma taxa de recarga máxima de cerca de 28% (265,6 mm) da precipitação, valores que, apesar de preliminares, são bastante razoáveis e realistas considerando o contexto hidrogeológico e climático da região estudada.

Tabela 1: Resultados dos cálculos realizados para cada um dos 15 poços de monitoramento acordo com o método WTF.

Poço	$\Delta h$ (m)	$R_{min}$ (mm) <sup>1</sup>	$R_{max}$ (mm) <sup>2</sup>	$R_{min}$ (%) <sup>3</sup>	$R_{max}$ (%) <sup>3</sup>
P01	0,790	79,0	158,0	8,3	16,6
P02	0,961	96,1	192,2	10,1	20,2
P03	1,303	130,3	260,6	13,7	27,5
P04	1,702	170,2	340,4	17,9	35,9
P05	1,238	123,8	247,6	13,0	26,1
P06	1,490	149,0	298,0	15,7	31,4
P07	1,402	140,2	280,4	14,8	29,5
P11	1,549	154,9	309,8	16,3	32,6
P12	1,404	140,4	280,8	14,8	29,6
P13	1,010	101,0	202,0	10,6	21,3
P14	1,430	143,0	286,0	15,1	30,1
P15	1,194	119,4	238,8	12,6	25,2
P16	1,426	142,6	285,2	15,0	30,0
P18	1,444	144,4	288,8	15,2	30,4
P19	1,574	157,4	314,8	16,6	33,2

<sup>1</sup> $R_{10\%}$  (mm) = recarga para  $S_y$  de 10%;

<sup>2</sup> $R_{20\%}$  (mm) = recarga para  $S_y$  de 20%;

<sup>3</sup>Recarga em relação à precipitação acumulada de 949,4 mm.

De acordo com as investigações, disponibilidade de dados e características do Sistema Aquífero Quaternário, assume-se que recarga a subterrânea ocorre, essencialmente, por fonte pluviométrica, sendo esta a fonte de entrada hídrica principal do sistema aquífero. A partir dos mapas de recarga subterrânea, é possível observar uma distribuição espacial das taxas de recarga, com valores mais elevados concentrados nas porções centrais e sudoeste do SEHRES que diminuem gradualmente em direção ao Rio Poxim, principal zona de descarga da região. Essa distribuição reflete a variação das características hidrogeológicas do aquífero, bem como a permeabilidade do solo, influenciada pelo intenso uso e ocupação do solo, e a topografia, com as zonas de descarga nas áreas mais baixas.

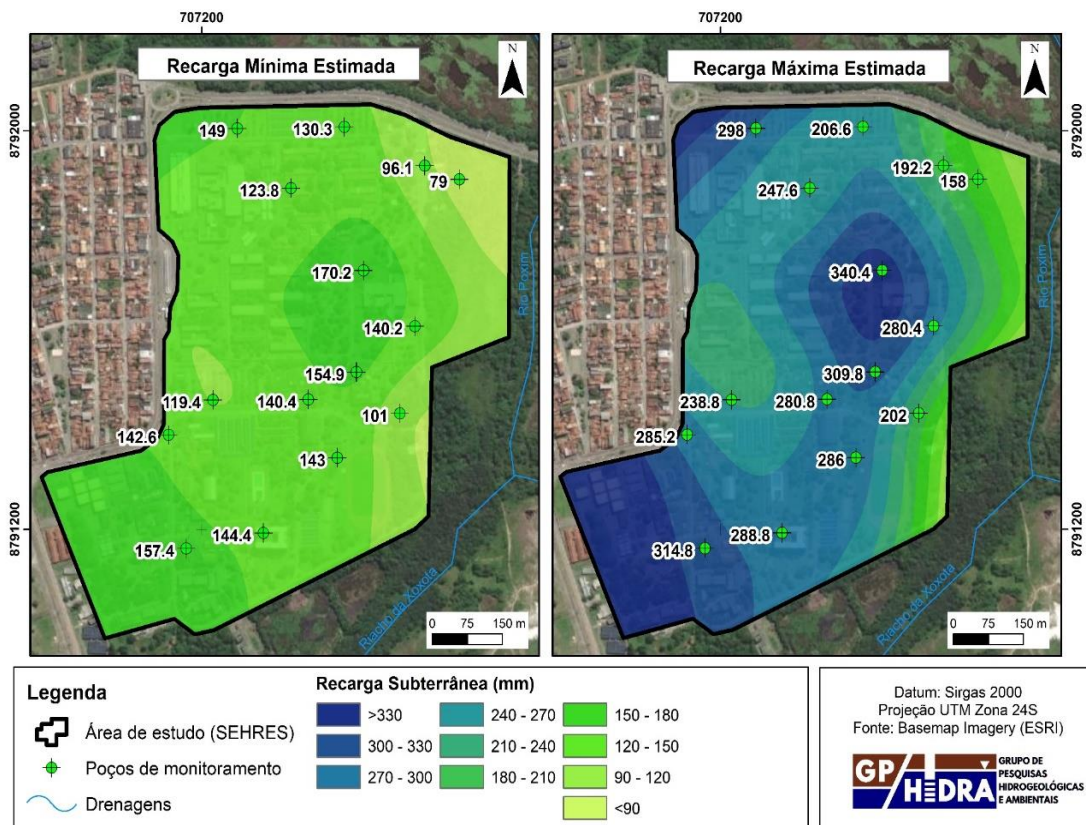


Figura 4: Mapa de distribuição das estimativas de recarga subterrânea mínima ( $S_y=0,1$ ) e máxima ( $S_y=0,2$ ) ocorridas no ano de 2023.

A Tabela 2 apresenta a análise estatística correspondente aos dados de variação de carga hidráulica obtidos pelo método WTF na subida do nível d'água decorrente do evento de recarga subterrânea em 2023, enquanto a Figura 5 resume os valores através de um gráfico de *boxplot*. A mediana (1,404 m) geralmente é menos sensível a valores extremos e pode oferecer uma representação melhor que a média (1,327 m) para a subida da carga hidráulica ao longo dos anos hidrológicos. O primeiro (1,194 m) e terceiro (1,490 m) quartis indicam a faixa em que a maioria das subidas de carga hidráulica ocorre na área de estudo em função da recarga pluviométrica. Neste contexto, espera-se que ao longo dos ciclos hidrológicos na região, excetuando-se anos climaticamente atípicos, as subidas de nível d'água subterrâneo permaneçam dentro desses intervalos, representando sua variação ao longo do tempo em resposta aos eventos de recarga.

Tabela 2: Estatística descritiva da subida da carga hidráulica ( $\Delta h$ ) obtida pelo WTF durante evento de recarga subterrânea em 2023.

Métrica	Resultado
Mínimo	0,790
Máximo	1,702
Soma	19,917
Média	1,327
Erro Padrão	0,064
Variância	0,062
Desvio Padrão	0,249
Mediana	1,404
Primeiro Quartil	1,194
Terceiro Quartil	1,490
Assimetria	-0,812
Curtose	0,171
Média Geométrica	1,302
Coefficiente de Variação	18,797

A alta dispersão dos dados, evidenciada pelo desvio padrão (0,25) e pelo coeficiente de variação (18,7%), aponta para a complexidade da interação entre a recarga de água subterrânea e a resposta do aquífero, enfatizando a necessidade de considerar essa variabilidade ao interpretar as tendências hidrológicas e hidrogeológicas, em especial mudanças de uso e ocupação do solo e bombeamentos. É válido ressaltar que neste estudo o monitoramento foi feito durante um ano hidrológico, o que pode limitar a representatividade dos dados em capturar a variabilidade anual da recarga de água subterrânea e da resposta do aquífero. Essa limitação pode impactar a interpretação dos resultados estatísticos, especialmente em relação à média e ao desvio padrão, os quais podem ser influenciados pela sazonalidade das condições hidrológicas do referido ano.

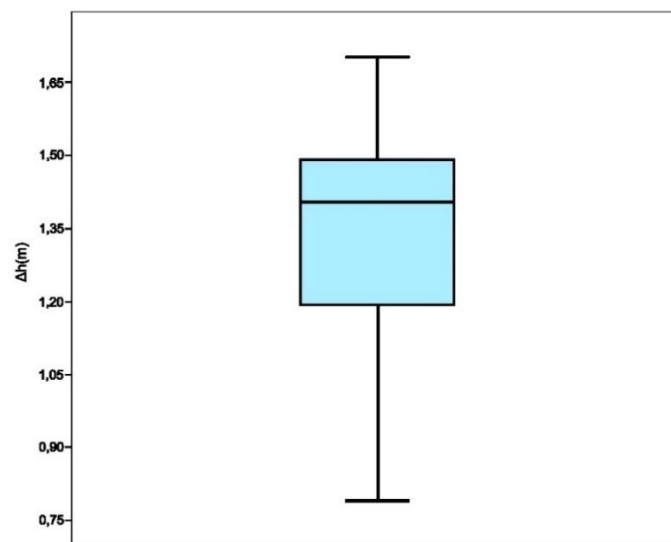


Figura 5: Boxplot do  $\Delta h$ .

#### 4. CONCLUSÃO

O estudo apresentado evidencia a importância dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente em regiões urbanas e aquíferos rasos, como demonstrado no contexto do SAQ, no SEHRES. O WTF demonstrou ser uma ferramenta eficaz para estimar a recarga subterrânea a partir de 15 séries históricas semanais. Há influência primária das condições climáticas, especialmente da precipitação, na disponibilidade de água no aquífero, uma vez que esta é a



principal fonte de recarga, que por sua vez é empregada no cálculo de disponibilidade hídrica subterrânea em uma bacia. Isto ressalta a importância de considerar fatores climáticos, como precipitação e evapotranspiração, na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente os aquíferos livres e rasos que possuem forte conectividade com as drenagens e reservatórios superficiais.

As taxas estimadas de recarga subterrânea variaram de 14% (132,8 mm) a 28% (265,6 mm) da precipitação, considerando o evento de recarga do ano de 2023. A distribuição espacial das taxas de recarga reflete as características hidrogeológicas do SAQ, além do uso e ocupação do solo e topografia, que desempenham papel fundamental na determinação da capacidade de armazenamento e transmissão de águas subterrâneas.

A carência de dados e estudos aprofundados sobre as águas subterrâneas na região destaca a relevância deste trabalho, que busca preencher uma lacuna ao estimar a taxa de recarga subterrânea no SAQ. A complexidade dos processos hidrodinâmicos envolvidos demanda uma abordagem multidisciplinar e a continuidade de estudos para uma compreensão mais completa e precisa do comportamento do aquífero. Dentre eles, estimativas e medições de importantes parâmetros como as porosidades efetiva e total, coeficientes de armazenamento e produção específica, condutividade hidráulica, transmissividade, permeabilidade do solo e grau de anisotropia. Essa perspectiva abre espaço para investigações adicionais, como estudos de hidrogeoquímica e modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas e transporte de contaminantes, aumentando a compreensão acerca do comportamento das águas subterrâneas na região.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Epting J, Michel A, Affolter A, Huggenberger P. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *J Hydrol X*. 2021 May;11(100071):1-18. doi: 10.1016/j.hydroa.2020.100071
2. Boukhemacha MA, Gogu CR, Serpescu I, Gaitanaru D, Bica I. A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest city, Romania. *Hydrogeol J* [Internet]. 2015 May 10;23(3):437–50. doi: 10.1007/s10040-014-1220-3
3. Hssaisoune M, Bouchaou L, Sifeddine A, Bouimetarhan I, Chehbouni A. Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes. *Geosciences* [Internet]. 2020 Feb 22;10(2):81. doi: 10.3390/geosciences10020081
4. Barbieri M, Barberio MD, Banzato F, Billi A, Boschetti T, Franchini S, et al. Climate change and its effect on groundwater quality. *Environ Geochem Health*. 2023;45(4):1133-44. doi: 10.1007/s10653-021-01140-5
5. Marques EAG, Silva Junior GC, Eger GZS, Ilambwetsi AM, Raphael P, Generoso TN, et al. Analysis of groundwater and river stage fluctuations and their relationship with water use and climate variation effects on Alto Grande watershed, Northeastern Brazil. *J South Am Earth Sci*. 2020;103(May):102723. doi: 10.1016/j.jsames.2020.102723
6. Monção AGM, Veloso R. A importância das águas subterrâneas para a gestão integrada dos recursos hídricos. *Águas Subterrâneas* [Internet]. 2021 Apr 18;35(1):1-11. doi: 10.14295/ras.v35i1.30026
7. 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*. 2020 May 5;58(3):432-40. doi: 10.1111/gwat.12916
8. de Vries JJ, Simmers I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol J*. 2002 Feb 11;10(1):5-17. doi: 10.1007/s10040-001-0171-7
9. Healy RW. Estimating groundwater recharge. Cambridge (England): Cambridge University Press; 2010.
10. Ronayne MJ, Roudebush JA, Stednick JD. Analysis of managed aquifer recharge for retiming streamflow in an alluvial river. *J Hydrol*. 2017;544:373-82. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.054
11. Baum CA, Mancuso MA, Fritzen RR. Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em aquífero urbano. *Geociências*. 2018;37(1):85-98.
12. Becke AL, Solórzano-Rivas SC, Werner AD. The watertable fluctuation method of recharge estimation: A review. *Adv Water Resour*. 2024 Jul;189:104635. doi: 10.1016/j.advwatres.2024.104635
13. Healy RW, Cook PG. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeol J*. 2002;10(1):91-109.

14. Delin GN, Healy RW, Lorenz DL, Nimmo JR. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *J Hydrol.* 2007;334:231-49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.10.010
15. Gumuła-Kawęcka A, Jaworska-Szulc B, Szymkiewicz A, Gorczewska-Langner W, Pruszkowska-Caceres M, Angulo-Jaramillo R, et al. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *J Hydrol.* 2022 Feb;605:127283. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127283
16. Scanlon BR, Healy RW, Cook PG. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol J.* 2002;10:18-39. doi: 10.1007/s10040-0010176-2
17. Neto DC, Chang HK, van Genuchten MT. A mathematical view of water table fluctuations in a shallow aquifer in Brazil. *Groundwater.* 2016;54(1):82-91. doi: 10.1111/gwat.12329
18. Zomlot Z, Verbeiren B, Huysmans M, Batelaan O. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *J Hydrol Reg Stud.* 2015;4:349-68. doi: 10.1016/j.ejrh.2015.07.005
19. Antonio AATL, Aguiar Netto AO, Folegetti MV, Ferreira RA. Calibração do modelo hidrodinâmico MIKE 11 para a sub-bacia hidrográfica do rio Piauitinga, Sergipe, Brasil. *Rev Ambient Água.* 2010;5(3):195-207. doi: 10.4136/1980-993X
20. Arai M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Geol USP.* 2006;6(2):1-6. doi: 10.5327/S1519-874X2006000300002
21. Mapa geológico e de recursos minerais do Estado de Sergipe. (Escala 1:250.000). Aracaju: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM); 2014.
22. Bittencourt ACSP, 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 Geociências.* 1983;13(2):93-7.
23. Campos Neto OPA, Lima WS, Cruz FEG. Bacia de Sergipe-Alagoas. *Bol Geociencias da Petrobras.* 2007;15(2):405-15.
24. Nóbrega RS. Um pensamento crítico sobre classificações climáticas: de Köppen até Strahler. *Rev Bras Geogr Física.* 2010;03:18-22.
25. Jie Z, Heyden J Van, Bendel D, Barthel R. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. *Hydrogeol J.* 2011;19(8):1487-1502. doi: 10.1007/s10040-011-0772-8
26. Shamsudduha M, Taylor RG, Ahmed KM, Zahid A. The impact of intensive groundwater abstraction on recharge to a shallow regional aquifer system: evidence from Bangladesh. *Hydrogeol J.* 2011;19:901-16. doi: 10.1007/s10040-011-0723-4
27. Yin L, Hu G, Huang J, Wen D, Dong J, Wang X, et al. Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China: comparison of methods. *Hydrogeol J.* 2011 Dec;19(8):1563-75. doi: 10.1007/s10040-011-0777-3
28. 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;28(2):521-33. doi: 10.1007/s10040-019-02073-1
29. Nowreen S, Newton IH, Uz R, Islam AKMS, Tarekul GM. Development of potential map for groundwater abstraction in the northwest region of Bangladesh using RS-GIS-based weighted overlay analysis and water-table-fluctuation technique. *Environ Monit Assess.* 2021;193:1-17. doi: 10.1007/s10661-020-08790-5
30. Wilopo W, Putra DPE. Groundwater recharge estimation using groundwater level fluctuation patterns in unconfined aquifer of Yogyakarta City, Indonesia. *Kuwait J Sci.* 2021;48(2):1-11.