



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

GABRIEL EVERTON MARINHO NEVES BEZERRA

**ESTIMATIVA DE RECARGA HÍDRICA EM AQUÍFERO ALUVIONAR: ESTUDO DE
CASO NO ALTO RIO CAPIBARIBE, REGIÃO SEMIÁRIDA DE PERNAMBUCO**

Caruaru

2024

GABRIEL EVERTON MARINHO NEVES BEZERRA

ESTIMATIVA DE RECARGA HÍDRICA EM AQUÍFERO ALUVIONAR: ESTUDO DE CASO NO ALTO RIO CAPIBARIBE, REGIÃO SEMIÁRIDA DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.

Caruaru

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Bezerra, Gabriel Everton Marinho Neves.

Estimativa de recarga hídrica em aquífero aluvionar: estudo de caso no Alto Rio Capibaribe, região semiárida de Pernambuco / Gabriel Everton Marinho Neves Bezerra. - Caruaru, 2024.

87 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.

1. Recarga hídrica subterrânea; 2. Método Water Table Fluctuation (WTF); 3. Barragem subterrânea; 4. Semiárido brasileiro. I. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 624

GABRIEL EVERTON MARINHO NEVES BEZERRA

**ESTIMATIVA DE RECARGA HÍDRICA EM AQUÍFERO ALUVIONAR: ESTUDO DE
CASO NO ALTO RIO CAPIBARIBE, REGIÃO SEMIÁRIDA DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE - PPGECAM)

Prof^a. Dra. Rochele Sheila Vasconcelos (Examinadora Externa)
Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Prof^o. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Prof^o. Dr. Rodrigo Lilla Manzione (Examinador Externo)
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

À minha mãe Simone Fabiana e à
minha esposa Mayara Patrícia, com
todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre comigo nos momentos em que eu mais precisei e me guiar diante das dificuldades e obstáculos que a vida proporciona.

À minha mãe Simone Fabiana Neves Santos Bezerra, por sempre acreditar em mim e me incentivar a não desistir nos momentos de crise.

À minha esposa Mayara Patrícia Simões Mélo, por ser paciente nos momentos que estive ausente, e sempre estar junto comigo me apoiando a continuar com todo amor e dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva, pela dedicação e apoio, pelos conhecimentos compartilhados, por todas as orientações e contribuições que influenciaram no meu crescimento acadêmico.

À UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), CAA (Centro Acadêmico do Agreste), pelo apoio e a excelente estrutura de ensino. Ao secretário Marcelo e toda a equipe da secretaria do PPGECAM (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental), pela atenção e o apoio.

A todos os professores do PPGECAM da UFPE/CAA, pelos conhecimentos que foram compartilhados em sala de aula, pela disposição de sempre auxiliar os discentes.

Aos meus colegas pesquisadores, Tiago Oliveira, Prof^a. Dr^a. Rochele Vasconcelos, Bruna Marques e Prof. Dr. José Almir, pelo apoio deles tanto com a pesquisa em campo, quanto pelas orientações que me auxiliaram.

Ao auxílio técnico de Rene, relacionado aos sensores que foram utilizados nesta pesquisa.

Aos proprietários dos poços, Paulo da Fazenda Fieza, Carlos e José Eduardo, que disponibilizaram a análise e a instalação dos sensores nos poços.

À FACEPE (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco), pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Ao longo de anos, a escassez de água na região semiárida do nordeste brasileiro tem sido objeto de discussões, atribuída principalmente à instabilidade climática e ao crescimento populacional. Este aumento demográfico resulta em uma demanda acentuada por água para atender às necessidades básicas da população. O semiárido brasileiro possui baixas taxas de precipitações e altas taxas de evapotranspiração, dificultando o armazenamento de recursos hídricos superficiais. Diante dessa realidade, a população busca maneiras alternativas de utilização e armazenamento de água, muitas vezes recorrendo às águas subterrâneas armazenadas em aquíferos aluviais. Analisar o comportamento das recargas hídricas no aquífero é essencial para compreender a quantidade de água que é reabastecida após a precipitação. Nesse contexto, essa pesquisa visa compreender o fenômeno de recarga hídrica subterrânea na região do Alto Capibaribe, região semiárida brasileira, utilizando o método Water Table Fluctuation (WTF). Além disso, objetiva-se analisar a influência da construção de uma barragem subterrânea na recarga hídrica. Durante o período de setembro de 2020 a setembro de 2023, quatro poços amazons próximos a Santa Cruz do Capibaribe, em Pernambuco, foram monitorados tanto por meio de sensores instalados, quanto manualmente. A região analisada é caracterizada por possuir pouca declividade no perfil longitudinal do terreno ao longo da aluvião, acompanhado por uma série de elevações e depressões, influenciando em um fluxo de água mais lento. Durante o período analisado, a precipitação na região mostrou-se significativamente acima da média, resultando em consideráveis acúmulos de água subterrânea na área em questão. Em média, obteve-se 27,40% de recarga hídrica nos poços, variando entre 15,71% e 32,82%, com uma capacidade de recarga estimada em aproximadamente 214,2 mil metros cúbicos de água por ano. Observou-se maior estabilidade na maior parte dos poços após a construção da barragem subterrânea, com ênfase ao poço P4 obtendo 32,82% de recarga hídrica em relação a precipitação do período analisado, no entanto, recomenda-se continuidade do monitoramento para que com uma série maior de dados confirme-se esta tendência.

Palavras-chave: Recarga hídrica subterrânea. Método Water Table Fluctuation (WTF). Barragem subterrânea. Semiárido brasileiro.

ABSTRACT

Over the years, water scarcity in the semi-arid region of northeastern Brazil has been the subject of discussions, mainly attributed to climate instability and population growth. This demographic increase results in a sharp demand for water to meet the basic needs of the population. The Brazilian semi-arid region has low precipitation rates and high evapotranspiration rates, making it difficult to store surface water resources. Faced with this reality, the population seeks alternative ways of using and storing water, often resorting to groundwater stored in alluvial aquifers. Analyzing the behavior of groundwater recharge in the aquifer is essential to understand the amount of water replenished after precipitation. In this context, this dissertation aims to understand the phenomenon of groundwater recharge in the Alto Capibaribe region using the Water Table Fluctuation (WTF) method. Additionally, this dissertation aims to analyze the influence of the construction of an underground dam on groundwater recharge. During the period from September 2020 to September 2023, four Amazon wells near Santa Cruz do Capibaribe, in Pernambuco, were monitored both through installed sensors and manually. The analyzed region is characterized by low slope in the longitudinal profile of the terrain along the alluvium, accompanied by a series of many elevations and depressions, influencing a slower water flow. During the analyzed period, precipitation in the region was significantly above average, resulting in considerable accumulations of groundwater in the area in question. On average, a 27.40% groundwater recharge was obtained in the wells, ranging from 15.71% to 32.82%, with an estimated recharge capacity of approximately 214.2 thousand cubic meters of water per year. Greater stability was observed in most wells following the construction of the subsurface dam, with well P4 notably achieving 32.82% water recharge relative to precipitation during the analyzed period. However, continued monitoring is recommended to confirm this trend with a larger dataset.

Keywords: Underground water recharge. Water Table Fluctuation (WTF) method. Underground dam. Brazilian semiarid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Comparativo da delimitação do semiárido de 2017 e 2021	18
Figura 2 –	Zona de exploração e preservação de aluviões	22
Figura 3 –	Macrozonas da Bacia do Rio Capibaribe	24
Figura 4 –	Barragem subterrânea, Modelo COSTA & MELO	28
Figura 5 –	Exemplo hipotético de elevação do nível de água em poço com uma recarga de precipitação	30
Figura 6 –	Localização da área de estudo, no Alto Rio Capibaribe	33
Figura 7 –	Imagem de satélite dos poços selecionados na área de estudo	34
Figura 8 –	Imagem de satélite com localização do Poço P1	35
Figura 9 –	Poço P1, localizado próximo à propriedade da fazenda Fieza	35
Figura 10 –	Imagem de satélite com localização do Poço P2	36
Figura 11 –	Poço P2, localizado cerca de 600 m da rodovia PE-160	36
Figura 12 –	Localização dos Poços P3 e P4	37
Figura 13 –	Poço P3, localizado cerca de 140 m da rodovia PE-160	37
Figura 14 –	Poço P4, localizado cerca de 140 m da rodovia PE-160	38
Figura 15 –	Datalogger Dalo 105, utilizado para registrar o monitoramento dos poços	39
Figura 16 –	Coleta de dados registrados pelo Datalogger com o notebook	39
Figura 17 –	Localização da estação pluviométrica 736041, da ANA	41
Figura 18 –	Poço P1 submerso em água, após eventos chuvosos	42
Figura 19 –	Poço P2 com acúmulo de areia devido uma enxurrada	43
Figura 20 –	Poço P3 com cobertura vegetal	43
Figura 21 –	Fluxograma de implementação dos sensores e aplicação do método WTF	45
Figura 22 –	Barragem subterrânea construída na propriedade da fazenda Fieza próximo ao Poço P1	47
Figura 23 –	Trecho longitudinal utilizado para caracterização da elevação do terreno	48
Figura 24 –	Perfil longitudinal de elevação do terreno	49
Figura 25 –	Seção transversal Poço P1	49
Figura 26 –	Seção transversal Poço P2	49
Figura 27 –	Seção transversal Poços P3 e P4	50

Figura 28 – Precipitação média mensal na estação 736041 entre 1987 e 2023, e precipitação mensal entre set/2020 a set/2023	51
Figura 29 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P1 e precipitação	53
Figura 30 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P2 e precipitação	55
Figura 31 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P3 Eduardo e precipitação	57
Figura 32 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P4 x precipitação	60
Figura 33 – Variação dos níveis de água nos poços monitorados	62
Figura 34 – Extrapolações das curvas de recessão para a aplicação do método WTF no Poço P1	64
Figura 35 – Aplicação do método WTF no Poço P2	66
Figura 36 – Aplicação do método WTF no Poço P3	68
Figura 37 – Aplicação do método WTF no Poço P4	70
Figura 38 – Área considerada da aluvião para estimativa de acúmulo de água	73
Figura 39 – Recarga artificial em aquíferos	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Poços cacimbão selecionados na área de estudo	34
Tabela 2 –	Dados da estação pluviométrica de Santa Cruz do Capibaribe	40
Tabela 3 –	Período de análise dos poços neste estudo	40
Tabela 4 –	Período em que os sensores ficaram sem funcionar	41
Tabela 5 –	Período em que foram realizadas apenas leitura manual	42
Tabela 6 –	Condutividade hidráulica estimada para a aluvião no Alto Rio Capibaribe	44
Tabela 7 –	Dados de flutuação de média mensal do Poço P1 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação	54
Tabela 8 –	Dados de flutuação de média mensal do Poço P2 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação	56
Tabela 9 –	Dados de flutuação de média mensal do Poço P3 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação na estação de Santa Cruz do Capibaribe	58
Tabela 10 –	Dados de flutuação de média mensal do Poço P4 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação na estação de Santa Cruz do Capibaribe	60
Tabela 11 –	Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado no Poço P1	63
Tabela 12 –	Variação do nível de água Δh do Poço P1	64
Tabela 13 –	Recarga hídrica total Poço P1	65
Tabela 14 –	Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado no Poço P2	65
Tabela 15 –	Variação do nível de água Δh do Poço P2	66
Tabela 16 –	Recarga hídrica total Poço P2	67
Tabela 17 –	Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado no Poço P3	67
Tabela 18 –	Variação do nível de água Δh do Poço P3	68
Tabela 19 –	Recarga hídrica total no Poço P3	69
Tabela 20 –	Variação do nível de água Δh do Poço P4	70
Tabela 21 –	Recarga hídrica total Poço P4	71
Tabela 22 –	Recarga mensal dos poços analisados	72
Tabela 23 –	Volume de água que possivelmente pode ser recarregado na aluvião	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	SEMIÁRIDO NORDESTINO	17
2.2	ACUMULAÇÃO DE ÁGUA E SEDIMENTOS NAS ALUVIÕES	20
2.3	BACIA DO RIO CAPIBARIBE	23
2.3.1	Alto Capibaribe	25
2.3.2	Poços amazonas e cacimbas	26
2.4	BARRAGEM SUBTERRÂNEA	27
2.5	RECARGA HÍDRICA SUBTERRÂNEA ATRAVÉS DO MÉTODO WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)	29
3	METODOLOGIA	33
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.1.2	Localização	33
3.2	MONITORAMENTO DO NÍVEL DE ÁGUA DOS POÇOS	38
3.3	MÉTODO WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)	44
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM SUBTERRÂNEA	47
4	RESULTADOS	51
4.1	SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DO ALTO CAPIBARIBE	51
4.2	FLUTUAÇÃO MENSAL DO NÍVEL DE ÁGUA DOS POÇOS	52
4.2.1	Flutuação mensal do nível de água do Poço P1	52
4.2.2	Flutuação mensal do nível de água do Poço P2	54
4.2.3	Flutuação mensal do nível de água do Poço P3	57
4.2.4	Flutuação mensal do nível de água do Poço P4	59
4.2.5	Análise comparativa dos níveis de água nos poços	61
4.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)	63
4.3.1	Método WTF no Poço P1	63
4.3.2	Método WTF no Poço P2	65
4.3.3	Método WTF no Poço P3	67

4.3.4	Método WTF no poço P4	69
4.3.5	Análise comparativa do método WTF entre os poços e melhorias na gestão hídrica	71
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A questão da disponibilidade de água nas regiões semiáridas do nordeste brasileiro tem sido amplamente discutida, e a preocupação com a sua escassez e acesso vem aumentando cada vez mais nos últimos anos. Através do crescimento populacional e a alta demanda por esse recurso natural, faz-se necessário a preservação de sua qualidade e quantidade para que ocorra o desenvolvimento sustentável de uma região (Santos, 2017).

Devido ao desequilíbrio hídrico causado pelo crescimento da população e a instabilidade climática, os recursos hídricos *per capita* se tornam cada vez mais reduzidos, seja em termos quantitativos ou qualitativos. Portanto, em consequência de haver recursos hídricos superficiais escassos, torna-se essencial e estratégico o uso das águas subterrâneas (Cirilo *et al.*, 2007; Hao *et al.* 2018).

De acordo com Hirata *et al.* (2010), apesar das águas subterrâneas já serem bastante utilizadas no Brasil, o conhecimento da quantidade e qualidade ainda é absolutamente limitado, devido à ausência ou precariedade de monitoramento. De acordo com Melo *et al.* (2009), estudos conduzidos no Nordeste pernambucano evidenciaram que a utilização de barragens subterrâneas para captar água da chuva emerge como uma solução viável e eficaz. Essa abordagem não apenas assegura o abastecimento de água para consumo humano e animal, mas também desempenha um papel significativo no apoio à produção agrícola nas comunidades rurais. Na ausência de escoamento superficial de água no alto curso do Rio Capibaribe, há uma maior utilização de poços amazonas, chamados cacimbão, e de poços escavados, conhecidos como cacimbas, geralmente construídos em caráter emergencial (Paiva *et al.*, 2014).

Segundo Silva (2018a), a complexidade associada à promoção de uma gestão eficaz da qualidade dos recursos hídricos está relacionada, em parte, à falta de dados, tanto em termos espaciais quanto temporais. Girardi *et al.* (2019) também afirmam que há escassez de dados de monitoramento de água no Brasil, principalmente no quesito de qualidade de água.

Analisar o comportamento das recargas aquíferas é essencial para a determinação do volume de recursos hídricos subterrâneos que são lentamente renováveis (Paralta *et al.*, 2003). A estimativa da recarga em aquíferos é considerada complexa, pois as variáveis são muito voláteis tanto no espaço quanto no tempo (Pinto

et al., 2010). Porém, Santos *et al.* (2023) afirmam que no Brasil ainda existem lacunas em relação à obtenção de dados e ao monitoramento hidroclimático. Silva *et al.* (2020) ressaltam os custos significativos associados à instalação, manutenção e operação de sistemas de monitoramento, particularmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Existem diversos métodos para estimativa de recarga hidráulica subterrânea, um deles é o *Water Table Fluctuation* (WTF), que é baseado na premissa de que o nível de água dos aquíferos não confinados são recarregados a partir do fluxo de água descendente que chega ao lençol freático, resultando em acessão volumétrica da reserva hídrica subterrânea (Healy; Cook, 2002; Scanlon; Healy; Cook, 2002).

O método WTF já foi aplicado em diversos estudos, desde cerca de cem anos atrás, sendo estudado até os dias de hoje (Meinzer 1923; Meinzer; Stearns, 1929; Rasmussen; Andreasen, 1959; Gerhart, 1986; Hall; Risser, 1993; Healy; Cook, 2002; Wendland *et al.*, 2007; Coelho *et al.*, 2017; Yimam *et al.*, 2023). O método WTF é descrito em detalhes por Healy e Cook (2002), que introduziram novas formulações na determinação do rendimento específico (S_y), considerada a variável mais complexa de ser estimada devido à sua não constância e dependência em relação às variações do nível de água. O WTF também foi utilizado por Crosbie *et al.* (2019), trazendo novas formulações para a obtenção do S_y .

De acordo com Wendland *et al.* (2007) e Crosbie *et al.* (2019), o método WTF demonstra um desempenho mais eficaz quando aplicado em aquíferos que apresentam grandes variações nos níveis de água, que é o caso dos aquíferos aluvionares. Portanto, o propósito final dessa pesquisa é estimar a recarga hidráulica subterrânea de unidade aquífera não confinada através do método WTF, além de analisar os impactos gerados na instalação de uma barragem subterrânea, localizada na bacia do Rio Capibaribe, no município de Santa Cruz do Capibaribe, Pernambuco.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estimar a recarga hídrica subterrânea em poços de monitoramento através do método WTF na aluvião em um trecho intermitente do Rio Capibaribe, em região semiárida pernambucana.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Comparar as recargas hídricas entre os poços monitorados;
- b) Analisar a influência da construção de uma barragem subterrânea na recarga hídrica dos poços.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão abordados conceitos relevantes sobre o semiárido nordestino, as características das aluviões e a metodologia WTF para estimava de recarga de aquífero.

2.1 SEMIÁRIDO NORDESTINO

Segundo Ab'Sáber (1999), existem três grandes áreas que compõem o semiárido na América do Sul: i) a da diagonal seca do Cone Sul, que abrange a região do Chile, da Argentina e do Equador; ii) a região Guajira, localizada na Venezuela e na Colômbia; e iii) o Nordeste brasileiro. O semiárido nordestino é caracterizado por possuir temperaturas médias anuais muito elevadas e constantes, baixos níveis de umidade, ausência de rios perenes, escassez e irregularidade das precipitações anuais, ocasionando períodos de seca extensos, e solos parcialmente salinos, sendo província fitogeográfica das caatingas (Ab'Sáber, 1999).

O semiárido brasileiro é caracterizado por um conjunto de regiões com balanço hídrico negativo devido às precipitações médias anuais inferiores a 800 mm, uma insolação média de 2800 horas por ano, temperaturas médias anuais variando de 23° a 27° C, evaporação atingindo 2.000 mm por ano e a umidade relativa média do ar em torno de 50% (Moura *et. al.*, 2007). Porém, segundo Montenegro (2012), o semiárido brasileiro ainda continua sendo o mais chuvoso do planeta com média anual de 750 mm de precipitações, mas algumas áreas não ultrapassa os 400 mm anuais.

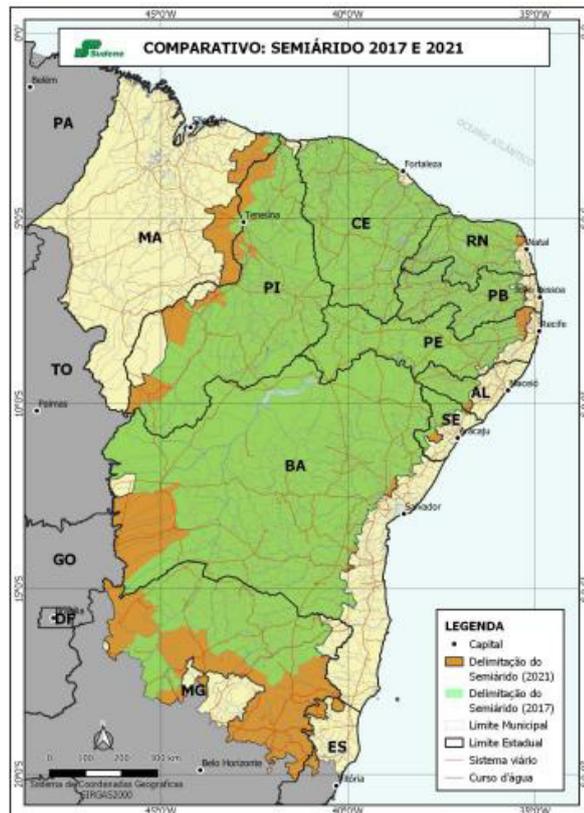
A região do semiárido brasileiro possui evapotranspiração potencial média de 2.500 mm por ano, causando elevados déficits hídricos, dificultando o cultivo agrícola. Além disso, as características do semiárido favorecem a concentração de soluto nas fontes hídricas superficiais, degradando a qualidade da água através da eutrofização e salinização (Montenegro, 2012).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020a), a região semiárida do Nordeste brasileiro apresenta um déficit hídrico anual de aproximadamente 800 milhões de metros cúbicos. Esse déficit é causado pela combinação de baixos índices pluviométricos e altas taxas de evapotranspiração potencial.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), o semiárido brasileiro possui uma área total de 982.563,3 km² (Figura 1), sendo 89,5%

na região Nordeste. O Maranhão começou a fazer parte do semiárido em 2017, abrangendo a maior parte dos Estados nordestinos. Os outros 10,5% restantes de território semiárido é situado no estado de Minas Gerais, localizado na região Sudeste.

Figura 1 – Comparativo da delimitação do semiárido de 2017 e 2021.



Fonte: SUDENE (2021).

Contudo, a região semiárida brasileira muda constantemente. No ano de 2021, houve uma nova atualização implementada pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2021), que agregou mais 215 municípios e excluiu outros 50 por não atingir os critérios técnicos, resultando em 1.427 municípios inseridos no mapa do semiárido brasileiro, contendo uma extensão de 1.318.750 km² (Figura 1).

Portanto, a região semiárida é caracterizada por possuir áreas que são submetidas repetidamente aos efeitos severos da seca. Há enormes desafios de convivência com escassez de recursos hídricos no polígono das secas e no semiárido nordestino, ocasionando o êxodo rural. Assim, é buscado desenvolver atividades produtivas para reduzir a situação de pobreza e êxodo rural, que parte por uma melhor gestão dos recursos hídricos dessa região (Montenegro, 2005).

A ANA (2021) destaca a importância da gestão integrada dos recursos hídricos na região semiárida do Nordeste, que envolve a promoção da conservação da água, a recuperação de áreas degradadas e a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. Além disso, a ANA enfatiza a necessidade de ampliar o acesso à água potável e de garantir a segurança hídrica para as comunidades locais.

Segundo a ANA (2020b), a escassez de água na região semiárida do Nordeste tem sido agravada por fatores como a mudança do clima, o desmatamento e a exploração excessiva dos recursos hídricos. Esses fatores têm contribuído para o esgotamento dos aquíferos e para a redução da disponibilidade de água para os usos múltiplos.

De acordo com Almeida *et al.* (2004), as secas são mais severas em anos que ocorrem o fenômeno El Niño, acarretando a pobreza da região e provocando migração em massa. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2021), o El Niño é caracterizado por ser um fenômeno que ocorre no oceano Pacífico, no qual há um aquecimento anormal das águas superficiais, podendo afetar o clima mundial, mudando os padrões de vento da atmosfera, afetando os regimes de chuvas em regiões tropicais. Segundo Santos *et al.* (2012), o semiárido brasileiro sempre estará com chuvas irregulares e mal distribuídas ao longo da região, isso se deve a três fenômenos: ao El Niño, à temperatura da água do oceano Atlântico e à baixa umidade atmosférica.

O Atlas do Nordeste (ANA, 2018) destaca a significativa importância das águas subterrâneas na região, representando a maior parte dos recursos hídricos disponíveis. Nesse contexto, a construção e manutenção de infraestruturas hídricas tornam-se essenciais no semiárido nordestino, incluindo açudes, barragens, poços e sistemas de distribuição de água. Essas estruturas desempenham um papel fundamental ao armazenar e distribuir água durante períodos de seca, assegurando o fornecimento para a população e para atividades produtivas.

O Atlas do Nordeste (ANA, 2018) também destaca a necessidade de se promover a conservação e recuperação dos recursos hídricos na região semiárida do Nordeste, por meio da implantação de programas de reflorestamento, da construção de barragens e bacias de retenção de água, e da promoção da agricultura sustentável.

A água é essencial para uma série de atividades vitais, incluindo a criação de animais, o cultivo de alimentos e o desenvolvimento industrial. Há locais, em que o sistema de abastecimento de água fornecido pela companhia não funciona,

ocasionando agravamento da situação, submetendo os moradores a procurarem maneiras alternativas para a captação de água, como a construção de cisternas, a utilização de açudes, barreiros, dentre outros, no qual nem sempre são suficientes para se manter por toda a época de estiagem. Uma alternativa para esse problema é a captação de água nas aluviões, que vem acontecendo frequentemente em algumas regiões do semiárido nordestino (Santos, 2017).

2.2 ACUMULAÇÃO DE ÁGUA E SEDIMENTOS NAS ALUVIÕES

As aluviões são formadas por sedimentos clásticos, ou seja, cascalhos, areias e finos, sendo formados principalmente por meio da erosão fluvial e transportados pelo escoamento superficial, no qual são depositados ao longo de vários anos no leito e nas margens de um sistema fluvial (Sá; Diniz, 2012).

Segundo Braga (2016), as camadas da aluvião são formadas a partir de sedimentos que vêm se acumulando ao longo de milhares de anos no leito dos cursos de água dos rios do semiárido nordestino, esses sedimentos são provenientes da erosão dos solos e são transportados por calhas que são geradas pelas enxurradas em épocas de intensa precipitação.

Grande parte do solo no Nordeste possui embasamento cristalino e pouco profundo, havendo solos rasos e poucas áreas com aquíferos sedimentares. Dessa forma, é possível encontrar água em fissuras de rochas do embasamento cristalino. Porém, normalmente em região cristalina há água de má qualidade, com acúmulo de sais e em pouca quantidade. Há, no entanto, a possibilidade de fonte hídrica com boa qualidade no semiárido nordestino, que podem ser encontradas nas camadas aluvionares existentes em fundos de vales ou nos leitos secos de rios. No entanto, há pouca quantidade de água armazenada nessas camadas aluvionares, que está mais vulnerável à poluição ou mesmo exploração, sendo necessário garantir sua preservação de forma estratégica (Araújo Filho *et al.*, 2016).

Santos *et al.* (2016) realizaram um estudo no município de Pesqueira, no agreste pernambucano, analisando a água de uma barragem subterrânea. A pesquisa classificou a água como de alto risco de salinidade e baixo risco de sodicidade, recomendando seu uso para irrigação apenas em situações especiais, onde haja drenagem adequada do solo. Para dessedentação animal, a água foi considerada dentro dos limites aceitáveis de sólidos dissolvidos totais (SDT), sendo de boa

qualidade para consumo bovino, que representa a principal fonte de renda da propriedade.

Os reservatórios de água nos aquíferos aluvionares no Nordeste brasileiro vêm sendo utilizados principalmente para dessedentação de animais, agricultura de pequeno porte, uso doméstico, dentre outras diversas aplicações, sendo considerado uma fonte renovável de recursos hídricos, funcionando como cisternas naturais (Cabral *et al.*, 2016).

O escoamento superficial da água possibilita a exposição à incidência de radiação solar, gerando um aquecimento maior da água, elevando assim a taxa de evaporação. Contudo, nas aluviões a radiação solar é menos incidente devido à camada de areia que há acima do nível de água da reserva hídrica, pois ela incide diretamente na areia e não na água, sendo transferido posteriormente parte do calor para a água, que evapora. Portanto, quanto maior for a camada de areia acima do nível de água, menos calor irá ser transferido e menos água irá evaporar. O processo de condução de calor não é tão eficaz, e a partir de uma certa espessura de areia, a radiação para de agir sobre a reserva hídrica, pois toda a radiação será absorvida pela camada de areia da aluvião (Araújo Filho *et al.*, 2014).

Araújo Filho *et al.* (2016) conduziram uma análise comparativa entre dois tipos de areias com granulometrias diferentes, denominadas areia do tipo A com porosidade de 0,451 e areia do tipo B com porosidade de 0,473. As amostras foram coletadas em pontos distintos da aluvião no alto curso do rio Capibaribe, com o objetivo de determinar a espessura mínima da camada de aluvião necessária para evitar a influência da evaporação. Concluíram que a espessura mínima para a areia do tipo A deve ser maior que 38,5 cm e para a areia do tipo B seria 42 cm, ou seja, observou-se que o tipo de areia é um fator determinante para estimar a espessura mínima da camada da aluvião. Embora os processos hidrológicos sejam complexos e sujeitos a variações temporais e espaciais, é evidente a importância crucial de preservar a camada de areia situada acima do aquífero em rios intermitentes. Tal medida ajuda a reduzir o impacto da evaporação, prolongando a disponibilidade desse recurso hídrico (Araújo Filho *et al.*, 2016).

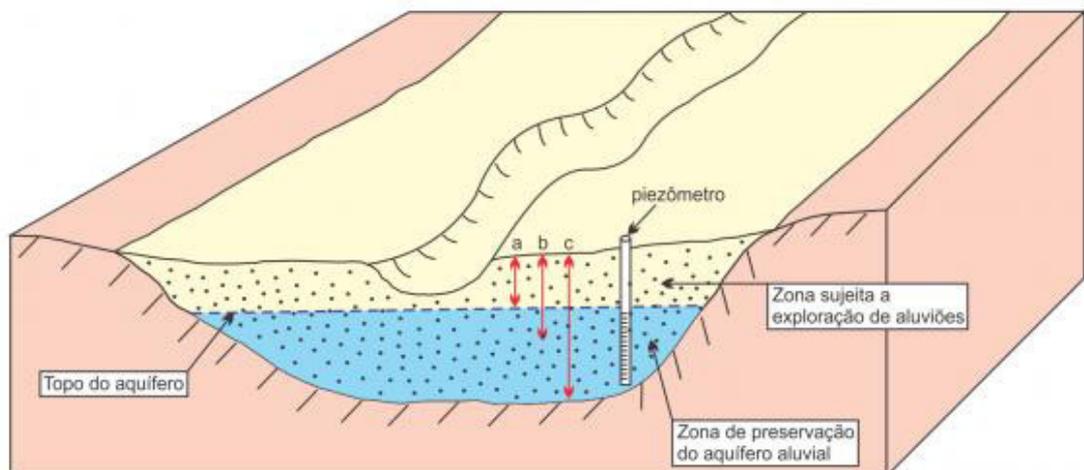
Contudo, com o crescimento econômico da região semiárida nordestina, a demanda por areia aumentou muito, fazendo com que a retirada de areia da camada aluvionar seja frequente, reduzindo a camada de areia que protege o aquífero da evaporação (Braga *et al.*, 2014).

Há um conflito socioambiental em relação ao leito seco de rios intermitentes no semiárido nordestino por meio de duas atividades de exploração de recursos naturais: a areia para a construção civil e a água para abastecimento da população local, possuindo maior intensidade em períodos de estiagem (Araújo Filho *et al.*, 2014).

Segundo o CONSEMA – PE, Conselho Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco (2013), em sua Resolução n° 01/2013, exige-se que seja realizada uma concessão da licença ambiental e outorga de uso dos recursos hídricos para que seja autorizado a exploração de aluviões em rios intermitentes. Antes da exploração da aluvião também é necessário realizar um estudo por meio de uma malha de sondagens investigativa, sendo coletadas amostras da aluvião desde a superfície até o substrato rochoso. A exploração da areia nas aluviões não se pode exceder em 50% da espessura do depósito aluvial, sendo também vetado explorar sob a superfície freática do aquífero aluvial (Figura 2).

Na Figura 2 são apresentadas: (a) a profundidade do nível hidrostático, que seria o nível da água ou topo do aquífero, sendo essa região que está sujeita à possíveis explorações; (b) a cota resultando em 50% da espessura total da areia aluvionar; e (c) a espessura total do depósito aluvial, contendo todas as zonas da aluvião, desde a zona que está suspeita a ser explorada, até a zona de preservação do aquífero (CONSEMA, 2013).

Figura 2 – Zona de exploração e preservação de aluviões.



Fonte: CONSEMA (2013).

Visto que no semiárido brasileiro há um déficit hídrico com precipitações anuais baixas e alta taxa de evaporação, logo é de extrema importância que a aluvião se mantenha com espessura de areia suficiente, evitando a evaporação da água através da radiação solar, para que em épocas de estiagem existam reservas hídricas no aquífero aluvionar.

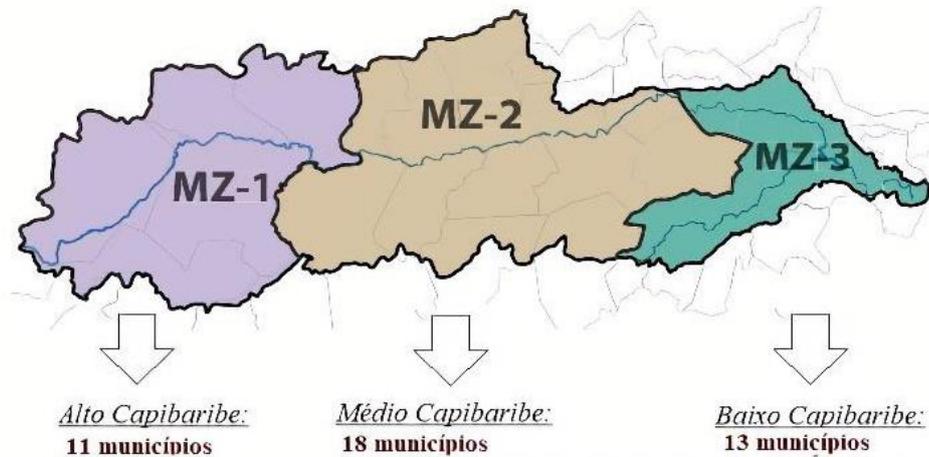
2.3 BACIA DO RIO CAPIBARIBE

Os rios intermitentes e os riachos efêmeros constituem mais da metade da extensa rede fluvial global, abrangendo todos os continentes. No Brasil, esses corpos d'água predominam especialmente na região semiárida, caracterizada pela presença da Caatinga, embora se façam presentes em todos os biomas do país (Teixeira, 2023).

A Bacia do Capibaribe é uma das principais bacias hidrográficas de Pernambuco, abrangendo uma área de aproximadamente 10.500 km². Esta bacia é de extrema importância para o abastecimento hídrico da região, abrangendo cerca de 50 municípios e uma população de mais de 3 milhões de pessoas (Gomes *et al.*, 2017).

A Bacia do Capibaribe pode ser dividida entre três macrozonas: Alto (MZ-1), Médio (MZ-2) e Baixo (MZ-3) Capibaribe (Figura 3), sendo construídas da nascente até a foz cinco barragens ao longo do percurso, como a barragem de Poço Fundo, localizada no município de Santa Cruz do Capibaribe, barragem de Jucazinho, situada no município de Surubim, a barragem de Tapacurá, localizada em São Lourenço da Mata, a barragem do Prata, no município de Bonito, e a barragem de Carpina, no município de Carpina, com a função de conter cheias, abastecimento e irrigação (Souza, 2011; APAC, 2024).

Figura 3 – Macrozonas da Bacia do Rio Capibaribe.



Fonte: Adaptado de Moura (2020).

A Bacia do Capibaribe, assim como outras bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro, é fortemente impactada pela escassez de água. Segundo Gomes *et al.* (2017), essa bacia enfrenta uma constante falta de água, principalmente durante a estação seca, o que gera graves problemas para o abastecimento da população e para a atividade agrícola da região.

Segundo a ANA (2018a), a bacia do Capibaribe é classificada como de nível de criticidade alto, com indicadores de vulnerabilidade elevados em termos de disponibilidade hídrica.

A escassez de água na Bacia do Capibaribe pode ser atribuída a diversos fatores, como o clima semiárido da região, a baixa capacidade de armazenamento dos reservatórios, a intensa utilização dos recursos hídricos para a irrigação e a falta de investimentos em infraestrutura de saneamento básico (Melo *et al.*, 2017).

Devido a esses fatores, a gestão dos recursos hídricos na Bacia do Capibaribe é fundamental para a garantia da segurança hídrica da região. Segundo Lima *et al.* (2016), é necessário o desenvolvimento de políticas públicas de gestão e preservação dos recursos hídricos da bacia, envolvendo diferentes atores da sociedade, como os governos, as empresas e as comunidades locais.

Além disso, a implementação de medidas de eficiência no uso da água, como a reutilização de água e o uso de técnicas de irrigação mais sustentáveis, também pode contribuir para a mitigação da escassez de água na região (Ribeiro *et al.*, 2014).

2.3.1 Alto Capibaribe

O Alto Capibaribe, localizado no estado de Pernambuco, é uma das sub-regiões do semiárido nordestino que enfrenta maiores desafios em relação à gestão dos recursos hídricos e ao desenvolvimento sustentável (Ferreira *et al.*, 2018).

A região do Alto Capibaribe é a mais afetada com a escassez hídrica, estando situada em área de clima semiárido. Para a obtenção desse recurso, a população tem explorado cada vez mais as áreas subterrâneas de aquíferos aluvionais, com a construção de poços superficiais conhecidos como poços amazonas (cacimbões) e cacimbas, funcionando como cisternas naturais (Braga, 2016).

A escassez de água nas aluviões do Alto Capibaribe tem sido agravada pela intensificação das mudanças climáticas e pelo uso insustentável dos recursos hídricos (Silva *et al.*, 2021). A disponibilidade limitada de água nas aluviões do Alto Capibaribe tem afetado negativamente a produção agrícola e a segurança alimentar das populações locais, que dependem em grande parte da irrigação para a sobrevivência (Melo *et al.*, 2019).

De acordo com Lima (2018), a gestão do Rio Capibaribe é um desafio para as autoridades públicas, tendo em vista que o rio é utilizado para abastecimento humano, irrigação, navegação e outros usos. O autor destaca ainda que a degradação ambiental e a poluição do rio são problemas recorrentes, que afetam a qualidade da água e comprometem os usos múltiplos.

A gestão sustentável dos recursos hídricos é essencial para garantir a segurança hídrica nas aluviões do Alto Capibaribe e em outras regiões do semiárido nordestino (Lima *et al.*, 2019).

A adoção de práticas de conservação do solo e da água, como a construção de barragens subterrâneas e a implementação de sistemas agroflorestais, pode contribuir para aumentar a disponibilidade de água nas aluviões do Alto Capibaribe e promover a resiliência das comunidades locais (Silva *et al.*, 2018).

A escassez de água nas aluviões do Alto Capibaribe é um desafio importante para as comunidades locais e para a gestão dos recursos hídricos na região do semiárido nordestino. A adoção de medidas para a conservação dos recursos hídricos e a promoção da resiliência das comunidades locais é fundamental para enfrentar esse desafio e garantir a segurança hídrica na região. Nesse sentido, é essencial que

sejam promovidas ações de gestão participativa e integrada dos recursos hídricos, envolvendo os governos, a sociedade civil e as comunidades locais.

2.3.2 Poços amazonas e cacimbas

Quando não há escoamento superficial de água na região do Alto Capibaribe, acentua-se a exploração de poços amazonas, que são conhecidos como cacimbão, ou através de poços escavados, que são as cacimbas, sendo construídos geralmente em caráter emergencial (Paiva *et al.*, 2014).

A construção de poços do tipo amazonas, comumente designados de cacimbões, tem sido uma saída para enfrentar as épocas de estiagem para alguns moradores da região. Esses poços são caracterizados por possuírem grande diâmetro e paredes com grande largura, feitas geralmente de alvenaria. Recentemente, tem sido utilizado também estruturas de concreto armado em formato de anéis e bombas hidráulicas fixas para extração da água (Braga *et al.*, 2014).

Na maioria das vezes, a construção e manutenção desses poços são feitos pela própria população que mora na região, sendo comum a construção sem estudos prévios. A seleção da construção do poço é feita de forma aleatória ou empírica, baseando-se na experiência de poços escavados anteriormente. Portanto, isso resulta em poços mal alocados, em que o depósito da aluvião tem espessura muito pequena, poços com recarga hidráulica insuficiente, desgaste das paredes por vários fatores externos, contaminação da água, ou ausência de tampa do poço podendo ocasionar aterramento no mesmo, entre outros problemas (Silva, 2015).

Segundo Araújo Filho *et al.* (2014), da nascente do Rio Capibaribe até o reservatório de Poço Fundo, há um elevado número de cacimbões, onde foram registradas 110 deles no curso de 79 km, sendo utilizados também para a agricultura irrigada, cultivando principalmente cenoura, beterraba e tomate. Da jusante da barragem de Poço Fundo até a cidade de Santa Cruz do Capibaribe foram registrados 27 cacimbões no curso de 10 km, porém com o uso destinado principalmente à abastecimento de propriedades rurais e urbanas através de caminhões pipa, fornecendo água para a cidade de Santa Cruz do Capibaribe e região.

De acordo com Paiva *et al.* (2014), desses poços registrados da nascente do Rio Capibaribe em Poço até a cidade de Santa Cruz do Capibaribe, 74% são do tipo amazonas e 26% escavados ou cacimbas. As profundidades variam, porém, maior

parte tem entre 3,0 e 5,0 metros. Em relação aos diâmetros, os cacimbões tiveram em média 2,7 m e as cacimbas 6,0 m. Para os poços do tipo amazonas, foram utilizadas diversas técnicas construtivas com os seguintes materiais: alvenaria de tijolos maciços; alvenaria de tijolos de furos; anéis de concreto; alvenaria de pedras assentadas; cano de ferro; alvenaria de blocos de cimentos; composição de mais de um material. O tipo mais comum de poço amazonas é feito de alvenaria de tijolos maciços, seguido de anéis de concreto.

Cerca de 81% poços amazonas analisados nessa região não possuem tampa para proteção sanitária, deixando o poço exposto à contaminação, principalmente em períodos de cheias, além de causar acidentes em pessoas e animais que caem dentro do poço devido à falta de uma tampa (Paiva *et al.*, 2014).

2.4 BARRAGEM SUBTERRÂNEA

Entre as alternativas para lidar com o clima semiárido, destaca-se a barragem subterrânea como uma solução de baixo custo, de fácil implementação e que permite o armazenamento eficiente de água no subsolo, reduzindo as perdas por evaporação (Oliveira *et al.*, 2010). Essa técnica envolve a captura da água da chuva, tanto da escorrência superficial quanto da infiltração subterrânea, por meio de uma barreira construída transversalmente ao movimento das águas. Dessa forma, ela contribui para elevar o lençol freático, mantendo o solo úmido por mais tempo e possibilitando o cultivo mesmo em períodos prolongados de seca. Além disso, viabiliza a coleta de água por meio da instalação de poços tipo amazonas, os quais podem ser usados para diversas finalidades, incluindo a irrigação (Costa *et al.*, 1998).

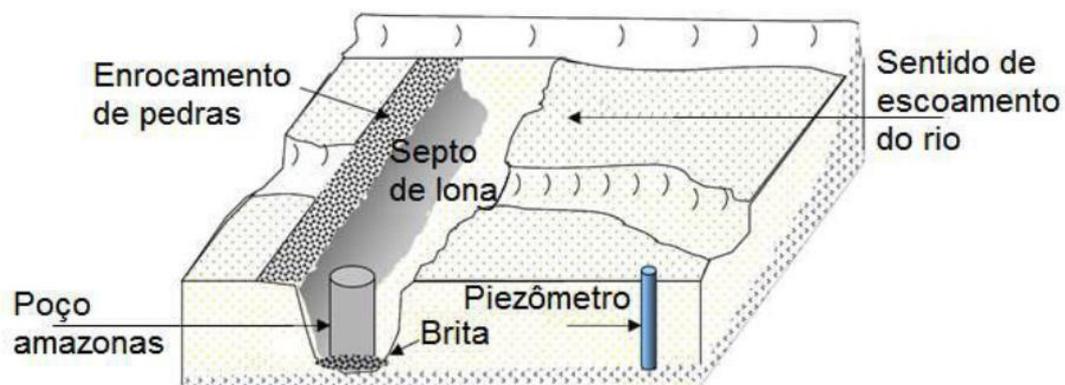
Devido ao barramento, a água se acumula por mais tempo no solo, possibilitando a recarga do aquífero, ocorrendo principalmente em solo arenosos. Esse tipo de solo, favorece a percolação para infiltração da água, propiciando um acúmulo maior no substrato do solo (Costa *et al.*, 1998).

O septo em uma barragem subterrânea é uma estrutura construída transversalmente no solo, com a finalidade de interceptar o fluxo de água da chuva que se infiltra no solo e com isso elevar o nível do lençol freático (Azevedo *et al.*, 2010). Ao decidir sobre o material a ser utilizado para o septo, é crucial considerar principalmente a sua disponibilidade. O septo pode ser feito de material compactado, como solo argiloso, solo-cimento ou solo-bentonita, com um coeficiente de

permeabilidade máximo de $10^{-5} \text{cm. s}^{-1}$, além de alvenaria de pedra, diafragma com lona plástica ou concreto (Silva, 2013).

O modelo da barragem subterrânea, idealizado por Waldir D. Costa e Pedro G. Melo (Figura 4), foi adaptado para melhor se adequar às condições específicas do semiárido. As etapas fundamentais da construção desse modelo compreendem a escavação de uma trincheira, que deve ser reta e perpendicular à direção do fluxo do rio. Posteriormente, ocorre a instalação de um septo impermeável ao longo da trincheira, a construção de pelo menos um poço do tipo amazonas a montante próximo do septo impermeável, a formação de um enrocamento de pedras dispostas na superfície sem o uso de rejunte, sendo essencial que essas pedras estejam próximas ao septo, mais precisamente à jusante. Além disso, o processo inclui a instalação de pelo menos um piezômetro na bacia hidráulica da barragem (Costa, 2004).

Figura 4 – Barragem subterrânea, Modelo COSTA & MELO.



Fonte: Costa, 2004.

O modelo desenvolvido por Costa & Melo é caracterizado pela sua simplicidade e eficiência na implementação, possibilitando o monitoramento da qualidade da água em relação à salinização e o acompanhamento do nível de água ao longo de todo o ano.

2.5 RECARGA HÍDRICA SUBTERRÂNEA ATRAVÉS DO MÉTODO WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)

Na estimativa de recarga hídrica de águas subterrâneas, o método WTF tem como princípio analisar medições de níveis freáticos em poços de monitoramento ou piezômetros durante um determinado período. Esse método baseia-se na premissa de que as variações positivas do nível estático da água subterrânea estão relacionadas com as águas das precipitações que, após percolarem no solo, atingem o nível freático subterrâneo, ocorrendo assim a recarga (Healy; Cook, 2002). A recarga das águas subterrâneas pode ser calculada pelo método WTF através da Equação 1.

$$R = S_y \frac{dh}{dt} \quad \therefore \quad R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que:

R = Recarga hídrica (mm);

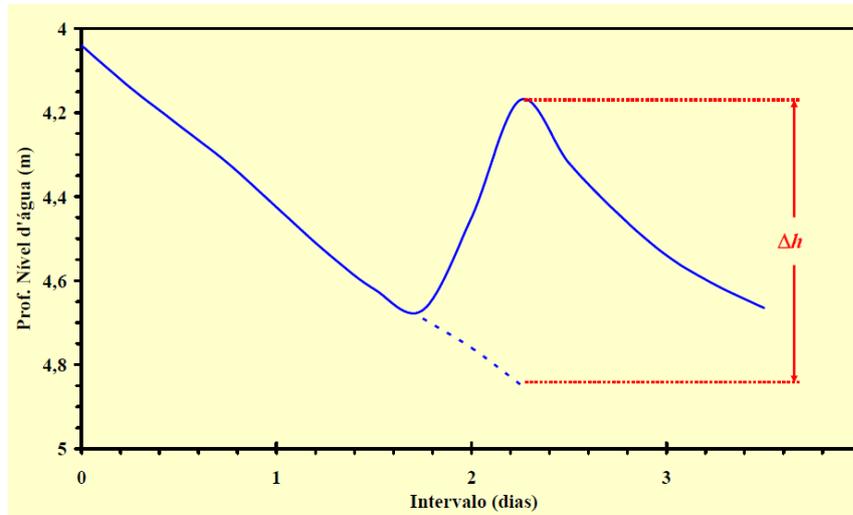
S_y = Rendimento específico (adimensional);

Δh = Variação da altura do nível de água (mm);

Δt = Período escolhido para estimativa (dia, mês, ano).

A aplicação da Equação 1 é realizada de forma individual para cada pico de elevação do nível de água, em que Δh é considerado a variação entre o pico mais baixo e o pico mais alto de cada recarga, podendo ocorrer várias recargas durante o ano (Maziero; Wendland, 2005). Para a determinação do Δh é preciso analisar a diferença entre o pico superior e a projeção do pico inferior caso não ocorresse o fenômeno de precipitação (Figura 5).

Figura 5 – Exemplo hipotético de elevação do nível de água em poço com uma recarga de precipitação.



Fonte: Maziero e Wendland (2005).

Healy e Cook (2002) destacaram não haver um tipo específico de função para o desenho da linha extrapolada de recessão, no entanto, Wendland *et al.* (2007); Coelho (2016); optaram por utilizar a função potencial (Equação 2), escolha esta que foi adotada neste estudo.

$$N_c = a(P - P_0)^b \quad (2)$$

N_c representa o nível calculado; P é o número de dias desde o início do monitoramento dos níveis; enquanto a , b e P_0 são parâmetros a serem determinados. Com a identificação dos parâmetros da função de recessão, aplica-se essa função aos demais períodos de recessão. A extrapolação da curva deve estender-se até o ponto de início de um novo período recessivo (Coelho, 2016).

O S_y pode ser definido como uma quantidade de água no solo que depois de saturado é drenado por gravidade, podendo acontecer isso quando há um rebaixamento dos aquíferos (Meinzer, 1923). Os valores do S_y podem ser determinados através de uma formulação empírica proposta por Biecinski (Pazdro, 1983 *apud* Alvarez; Niedzielski, 1996), sendo relacionado o S_y com a condutividade hidráulica (Equação 3). O S_y é um coeficiente, portanto, não possui unidade de medida, podendo também ser expresso em porcentagem.

$$S_y = 0,117 \cdot \sqrt[3]{K} \quad (3)$$

Em que:

S_y = Rendimento específico;

K = Condutividade hidráulica (m/dia).

A Equação 3 foi empregada por Correia *et al.* (2021) para determinar o S_y na bacia sedimentar de Campos, localizada no estado do Rio de Janeiro. O método WTF foi aplicado em dez poços ao longo do período de um ano.

Maziero *et al.* (2005) analisaram a recarga de poços na cidade de São Carlos – SP e utilizaram o método WTF no período de fevereiro de 2004 a fevereiro de 2005, onde a recarga total foi estimada em 16,40% da precipitação registrada.

Simon *et al.* (2017) analisaram a estimativa de recarga de poços na região do Aquífero Guarani, localizado na bacia do rio Ibicuí, utilizando o método WTF em cinco poços, aplicado para a média mensal dos níveis de água de cada poço, durante o período entre 24 e 39 meses. Os autores encontraram uma recarga em relação à precipitação que variam entre 11 e 18%, com média de 13,82%.

Tesfaldet *et al.* (2019) analisaram a estimativa de recarga de 28 poços em Thepkasattri na Tailândia, a partir do método WTF, com dados entre 2012 e 2015. A recarga estimada resultou em 26% da precipitação anual em 2015.

Baum *et al.* (2015) aplicaram o método WTF analisando treze poços no município de Frederico Westphalen, no Rio Grande do Sul, e encontraram uma recarga média de 13,74% em relação à precipitação do ano em análise. Carvalho *et al.* (2014) aplicaram o método WTF em cinco poços, no município de Viçosa, no estado de Minas Gerais, e encontraram uma recarga hídrica subterrânea média de 17,4% em relação à precipitação para o ano em análise.

Coelho *et al.* (2017) realizaram um estudo na região semiárida do nordeste brasileiro, especificamente na bacia do Rio Ipanema, no riacho Mimoso, durante os anos de 2011 e 2012. O estudo comparou os resultados obtidos através do método WTF com os do método WB (*Water Balance*) utilizando dados de satélites. Os resultados indicaram uma taxa de recarga total de 13,3% em relação à precipitação pelo método WTF, enquanto o método WB apresentou uma taxa de recarga total de 10,3%.

Albuquerque *et al.* (2015) conduziram uma análise na região da bacia do Alto Ipanema, próxima à Pesqueira, comparando o método de WTF com o balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (TM) durante o período de 2002 a 2011. De acordo com o método TM, o ano de maior recarga foi 2004, registrando 28,63%, enquanto o método WTF registrou uma recarga total de 27,47% para o mesmo período. O estudo revela uma correlação de Pearson ($R = 0,97$) entre os dois métodos, indicando uma diferença mínima de apenas 1,9% na estimativa da recarga em relação à precipitação total.

Vários autores estimaram a recarga hídrica de poços usando o WTF ao redor do mundo, como Crosbie *et al.* (2019) na região norte da Austrália, Delottier *et al.* (2018) na França, Yimam *et al.* (2023) na Etiópia, e Boumis *et al.* (2022) na Carolina do Norte, nos Estados Unidos da América.

O método WTF apresenta a vantagem de permitir a estimativa da recarga de maneira relativamente simples, utilizando apenas dados obtidos através da medição periódica do nível da água subterrânea. No entanto, uma limitação do método é a ausência de procedimentos específicos para verificar se os valores atribuídos ao coeficiente de armazenamento específico (S_y) são apropriados, o que pode comprometer a precisão das estimativas obtidas (Teramoto, et al. 2018).

As principais vantagens no método WTF incluem simplicidade, custo relativamente baixo, e facilidade de aplicação em grandes áreas e aquíferos não confinados. Além disso, o método pode se beneficiar da disponibilidade de dados históricos de monitoramento, permitindo análises de tendências de longo prazo. No entanto, sua precisão depende de uma estimativa confiável da porosidade efetiva do solo, o que pode introduzir incertezas, além de ser sensível a fatores como bombeamento de água, mudanças sazonais e fluxos laterais, que afetam o nível do lençol freático (Healy & Cook, 2002).

Em comparação com outros métodos, como o balanço hídrico e o método de cloretos, o WTF é mais simples, porém menos abrangente, e pode fornecer resultados menos precisos. Ele também requer monitoramento contínuo e pode ser influenciado por fatores que não refletem diretamente a recarga, como a extração de água. Em áreas onde há extração significativa, o WTF pode subestimar ou superestimar a recarga, ao contrário de métodos como o lisímetro, que medem diretamente a percolação da água (Scanlon et al., 2002; Healy, 2010).

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão explicitadas características gerais da área de estudo, na aluvião do Rio Capibaribe, bem como do monitoramento dos níveis potenciométricos nos poços amazonas e as condições da metodologia WTF aplicada.

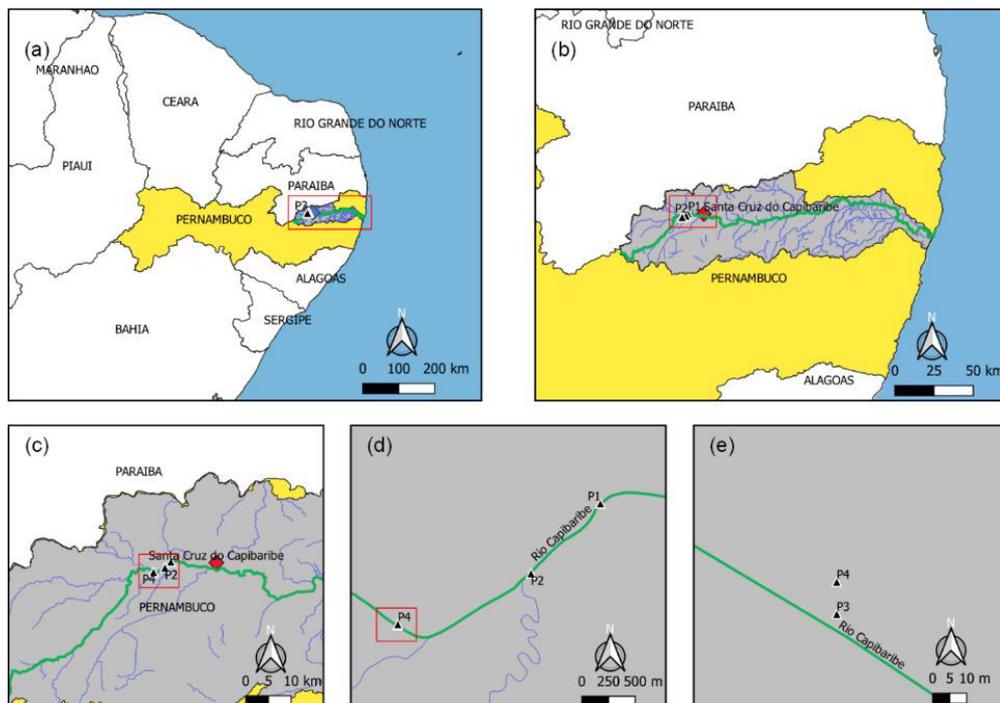
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.2 Localização

O projeto foi desenvolvido na região semiárida nordestina, mais especificamente na bacia do Rio Capibaribe, na região do Alto Capibaribe, próximo à cidade de Santa Cruz do Capibaribe e ao distrito de Poço Fundo, no estado de Pernambuco (Figura 6).

Foram analisados quatro poços (P1 a P4), e na escolha do local levou em consideração a segurança dos equipamentos, uma vez que a região apresenta uma predisposição a furtos. Portanto, os poços foram selecionados em áreas mais seguras e próximas da PE-160, visando facilitar o acesso e garantir a integridade dos dispositivos. Adicionalmente, é importante destacar que os poços P3 e P4 estão situados próximos um do outro, como indicado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Localização da área de estudo, no Alto Rio Capibaribe.



Fonte: Autor (2023).

Figura 7 – Imagem de satélite dos poços selecionados na área de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2023).

Os parâmetros geográficos, como a latitude, longitude, altitude e a profundidade dos poços analisados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Poços cacimbão selecionados na área de estudo.

Poço	Cota (m)	Latitude	Longitude	Profundidade (m)
P1	451	7°56'43.60"S	36°17'48.20"O	3,00
P2	452	7°57'26.66"S	36°18'30.76"O	3,30
P3	453	7°57'58.64"S	36°19'52.33"O	3,50
P4	453	7°57'58.02"S	36°19'52.33"O	3,25

Fonte: Autor (2023).

O Poço P1 localiza-se próximo da propriedade da Fazenda Fieza e cerca de 85,0 m da Rodovia PE-160 (Figura 8), possuindo diâmetro de 1,50 metros (Figura 9).

Figura 8 – Imagem de satélite com localização do Poço P1.



Fonte: Google Earth Pro (2023).

Figura 9 – Poço P1, localizado próximo à propriedade da fazenda Fieza.



Fonte: Autor (2021).

O Poço P2 se localiza cerca de 600 m da rodovia PE-160, podendo também ser detectado visualmente através da imagem de satélite (Figura 10). O Poço P2 possui diâmetro de 1,50 metros (Figura 11).

Figura 10 – Imagem de satélite com localização do Poço P2.



Fonte: Google Earth Pro (2023).

Figura 11 – Poço P2, localizado cerca de 600 m da rodovia PE-160.



Fonte: Autor (2021).

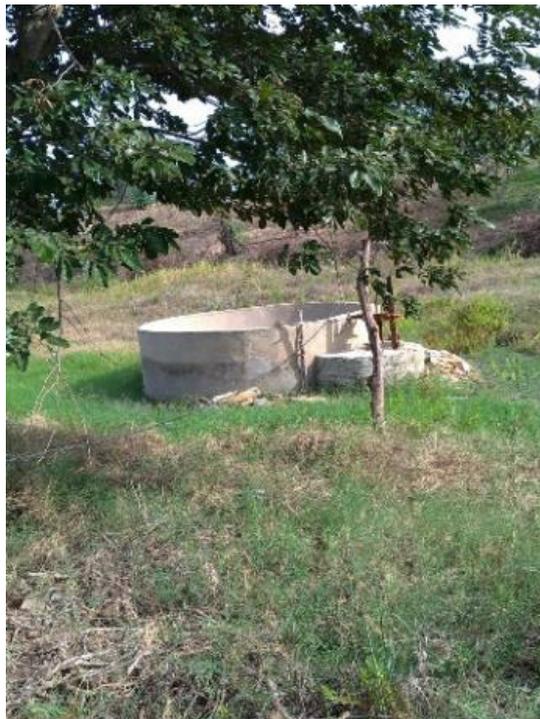
Os poços P3 e P4 se localizam cerca de 140 m da rodovia PE-160. Esses poços podem ser observados na imagem de satélite da Figura 12. Os poços P3 e P4 possuem o mesmo diâmetro de 3,40 metros (Figuras 13 e 14).

Figura 12 – Localização dos Poços P3 e P4.



Fonte: Google Earth Pro (2023).

Figura 13 – Poço P3, localizado cerca de 140 m da rodovia PE-160.



Fonte: Autor (2021).

Figura 14 – Poço P4, localizado cerca de 140 m da rodovia PE-160.



Fonte: Autor (2021).

3.2 MONITORAMENTO DO NÍVEL DE ÁGUA DOS POÇOS

O monitoramento dos níveis de água de poços é um processo que envolve a medição regular do nível da água ao longo do tempo, permitindo a avaliação da dinâmica dos aquíferos e a identificação de tendências e variações sazonais.

Para o monitoramento do nível de água nos poços cacimbão, utilizou-se um datalogger do tipo Dalo 105 da Ampeq (Figura 15) em cada poço para registrar o nível estático da água a cada 5 minutos. Todos os quatro sensores foram instalados em setembro de 2021, porém foram feitas medições manuais a partir de setembro de 2020. Planejou-se realizar a coleta dos dados 1 vez por mês para verificar também a situação do sensor (e.g. calibração). Com tal programação, foram coletados em média 8.640 dados por mês de cada poço, sendo bastante relevante para entender o comportamento da recarga hídrica. Para o download dos dados, foram utilizadas portas USB do notebook conectado ao Datalogger (Figura 16) pelo cabo tipo AM, comum para impressoras.

Figura 15 – Datalogger Dalo 105, utilizado para registrar o monitoramento dos poços.



Fonte: Autor (2021).

Figura 16 – Coleta de dados registrados pelo Datalogger com o notebook.



Fonte: Autor (2021).

Para aplicar o método WTF, são necessárias medições regulares do nível do lençol freático ao longo de um período de tempo. Essas medições foram feitas usando poços de observações com sensores instalados. A variação do nível foi então correlacionada com outros dados, como a precipitação local. Utilizou-se os dados da Estação 736041, gerida pela ANA (2023), (Tabela 2) localizada no município de Santa Cruz do Capibaribe, no estado de Pernambuco.

Tabela 2 – Dados da estação pluviométrica de Santa Cruz do Capibaribe.

Código	736041
Estado	Pernambuco
Município	Santa Cruz do Capibaribe
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-7.9619
Longitude	-36.2022
Altitude (m)	472

Fonte: ANA (2023).

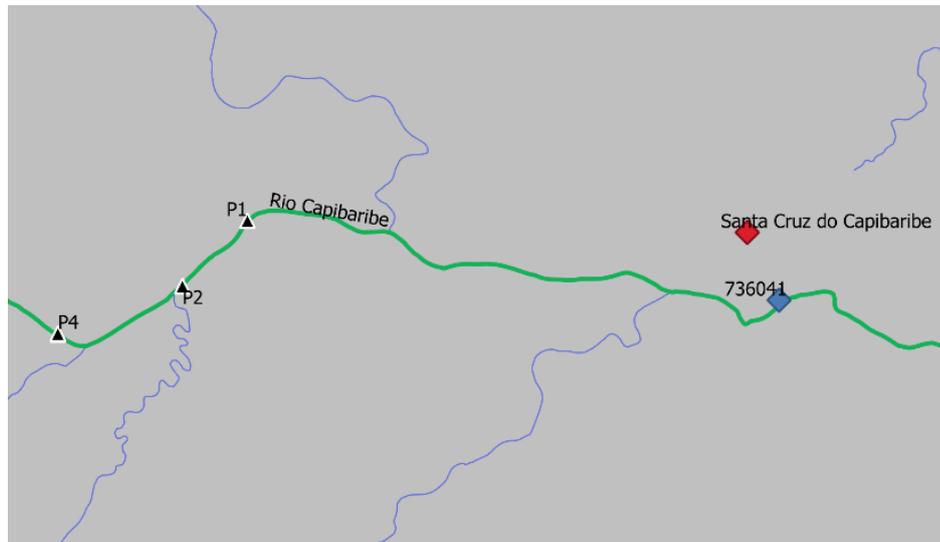
A Estação 736041 localiza-se a aproximadamente 10 km dos poços em análise (Figura 17), escolhida devido ser a única mais próxima dos poços a possuir os dados de precipitação atualizados, atendendo o período de análise do nível de água dos poços que começa em setembro de 2020, com exceção do Poço P1, cujos registros iniciaram apenas em setembro de 2021 por estar soterrado durante o período anterior. O escopo deste estudo engloba a análise da recarga dos poços ao longo de um período de até três anos, com exceção do Poço P1, que foi analisado dois anos, com término de análise em setembro de 2023 para todos os poços (Tabela 3).

Tabela 3 – Período de análise dos poços neste estudo.

Poço	Início	Término
P1	set/21	set/23
P2	set/20	set/23
P3	set/20	set/23
P4	set/20	set/23

Fonte: Autor (2023).

Figura 17 – Localização da estação pluviométrica 736041, da ANA.



Fonte: Autor (2023).

Durante o período de setembro de 2020 a setembro de 2021, as leituras do nível de água foram feitas exclusivamente manualmente, sendo os sensores instalados somente a partir de setembro de 2021.

Durante o período de pesquisa em campo, ocorreram momentos em que os sensores apresentaram problemas no seu funcionamento, portanto, na Tabela 4 há os períodos em que foram identificadas falhas nos sensores, comprometendo o monitoramento dos poços nesse período em questão.

Tabela 4 – Período em que os sensores ficaram sem funcionar.

Período sem registro de dados em P1	Período sem registro de dados em P2	Período sem registro de dados em P3	Período sem registro de dados em P4
07/05/22 até 06/10/22	10/04/22 até 19/04/22	07/03/23 até 17/09/23	07/01/22 até 03/03/22
-	19/07/22 até 17/09/23	-	11/05/22 até 05/12/22
-	-	-	29/01/23 até 22/02/23
-	-	-	09/05/23 até 17/09/23

Fonte: Autor (2023).

Durante o período em que os sensores estiveram inativos, procedeu-se à leitura manual do nível de água nos poços, com a exceção dos meses de junho e julho de 2022 para o Poço P1, o qual estava submerso em água (Figura 18). Os períodos em que foram feitas as leituras manuais estão descritos na Tabela 5, incluindo o período de 2020, quando ainda não haviam sido instalados os sensores de monitoramento.

Tabela 5 – Período em que foram realizadas apenas leitura manual.

P1	P2	P3	P4
Ago/22 – Set/22	Set/20 – Ago/21	Set/20 – Ago/21	Set/20 – Ago/21
-	Ago/22 – Mar/23	Abr/23 – Jun/23	Fev/22
-	-	-	Jun/22 – Nov/22
-	-	-	Jun/23 – Set/23

Fonte: Autor (2023).

Figura 18 – Poço P1 submerso em água, após eventos chuvosos.



Fonte: Autor (2022).

O Poço P2 passou por um período substancial em que não foi possível registrar dados entre o período de março de 2023 a setembro de 2023, devido à uma grande precipitação que causou acúmulo de sedimentos, notadamente areia, no interior do poço (Figura 19).

Figura 19 – Poço P2 com acúmulo de areia devido uma enxurrada.



Fonte: Autor (2023).

Não há registros disponíveis para o período compreendido entre julho de 2023 e setembro de 2023 para o Poço P3, devido à cobertura vegetal que se formou ao redor do poço, impossibilitando a realização de leituras manuais do nível de água. Além disso, durante esse intervalo de tempo, os sensores não estavam operando de maneira adequada (Figura 20).

Figura 20 – Poço P3 com cobertura vegetal.



Fonte: Autor (2023).

A quantidade de água retirada pelos usuários dos poços analisados é relativamente pequena, sendo destinada exclusivamente para uso doméstico em todos os quatro poços.

3.3 MÉTODO WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)

Neste estudo, determinou-se o valor de S_y utilizado para a aplicação do método WTF sendo estimado a partir da condutividade hidráulica (K), que foi obtida por Silva (2015). Este autor analisou o K usando o método baseado na Equação de Kozeny-Carman em três locais diferentes da região do Alto Capibaribe, em duas profundidades distintas, 0,5 m e 1,0 m (Tabela 6). A condutividade hidráulica foi aplicada na Equação 3 para calcular o rendimento específico S_y .

Tabela 6 – Condutividade hidráulica estimada para a aluvião no Alto Rio Capibaribe.

Amostra	Profundidade (m)	Coordenadas	K (m/s)
1	0,5	7° 56' 43,4" S	1,83E-06
2	1,0	36° 17' 48,6" O	2,07E-06
3	0,5	7° 57' 26,5" S	9,22E-06
4	1,0	36° 18' 30,8" O	7,64E-06
5	0,5	7° 57' 57,8" S	2,84E-05
6	1,0	36° 19' 54,6" O	2,28E-05

Fonte: Silva (2015).

Obteve-se os valores de K selecionados para o Poço P1 como a média entre as amostras 1 e 2, considerando a proximidade entre o Poço P1 e as amostras. O mesmo critério aplicou-se para os outros poços. No caso do Poço P2, utilizou-se o valor médio de K entre as amostras 3 e 4, enquanto para os poços P3 e P4, utilizou-se a média das amostras 5 e 6.

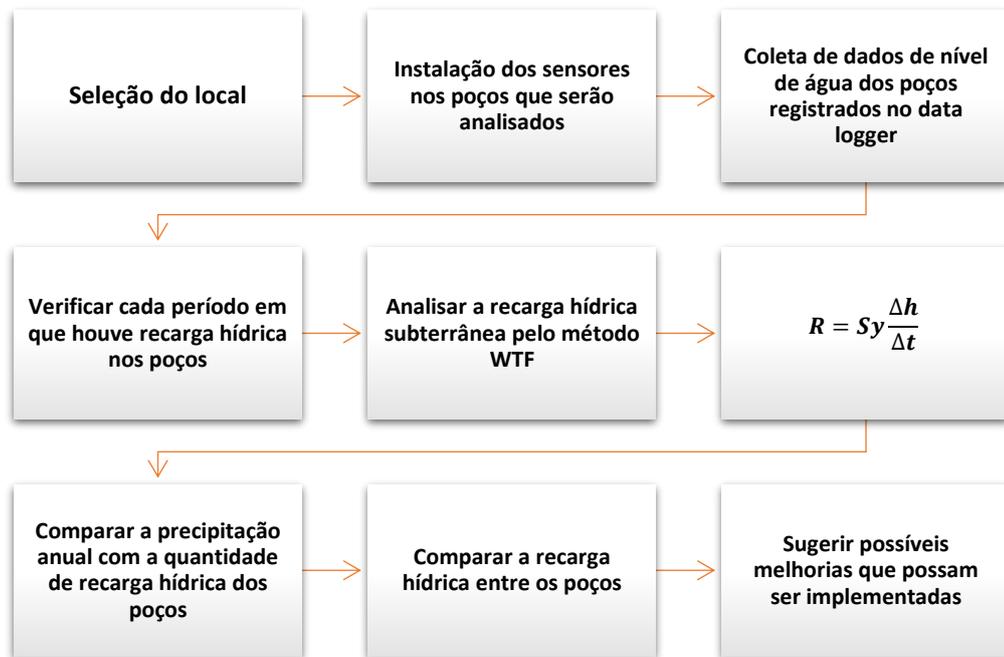
Calculou-se a recarga hídrica dos poços a partir da Equação 1, utilizando a variação do nível de água Δh (mm) em relação ao tempo Δt (mês). Portanto, a fim de calcular a recarga, a variação do nível da água subterrânea (Δh) assim obtida considerando a diferença entre o valor máximo (pico) e o valor mínimo (ponto mais baixo) da curva de recessão anterior, que é extrapolada até o momento do pico. Toda vez que houver uma recarga esse procedimento de cálculo foi repetido, e calculado o

somatório da recarga total em relação ao período de análise. Realizou-se também o cálculo de o quanto foi recarregado em média por mês em cada poço individualmente em relação ao período em análise.

A fim de realizar a extrapolação da curva de recessão, é essencial determinar os parâmetros da função potencial (Equação 2). Esse processo foi executado utilizando a ferramenta *Solver* do Excel.

A implementação do método WTF ocorreu em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 21. Tal abordagem permite uma compreensão sequencial e estruturada de como o referido método foi executado.

Figura 21 – Fluxograma de implementação dos sensores e aplicação do método WTF.



Fonte: Autor (2023).

Os dados obtidos pelos dataloggers registrados a cada 5 minutos foram derivados de forma que seja apresentado mensalmente, portanto foi realizado o seguinte tratamento dos dados: os registros de cada 5 minutos foram acumulados em dados diários através de sua mediana. Dado que os registros diários no geral não exibiram variações percentuais substanciais, optou-se por empregar a média mensal como base de avaliação da recarga em um período mais abrangente. Esse procedimento de cálculo foi usado também por Simon (2017), mas em vez de coletar dados a cada 5 minutos, os dados eram obtidos a cada hora.

Cada mediana diária é composta por 288 registros brutos, que no total de 2 anos de monitoramento por sensores foram registrados em torno de 210 mil dados de níveis de água por cada poço, embora seja importante notar que nos poços analisados, o número de registros pode ser ligeiramente inferior a 160 mil devido à interrupções temporárias no funcionamento dos sensores.

A partir dos dados mensais, foi obtida a variação do nível de água de acordo com a Figura 4, aplicando uma reta contínua no pico mais baixo no momento antes da recarga hídrica, e a distância entre o próximo pico mais alto e essa reta contínua resultou no valor de variação do nível de água Δh (mm) para esse ponto.

O resultado da soma anual da variação do nível da água Δh (mm) foi multiplicado pelo valor adotado para S_y . Isso culminará na obtenção da recarga hídrica anual R (mm). Dividindo-se o valor da recarga hídrica anual R (mm) pela precipitação anual (mm) do mesmo período de análise, é possível obter o percentual de recarga proveniente da precipitação. Ressalta-se que toda essa sequência de cálculo foi executada de forma independente para cada poço analisado.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM SUBTERRÂNEA

No contexto de enfrentamento da escassez hídrica, foi executada a instalação de uma barragem subterrânea no leito do Rio Capibaribe, próximo ao Poço P1, na data de 08 de maio de 2022, conforme ilustrado na Figura 22. A construção dessa barragem subterrânea objetivou otimizar o armazenamento de água subterrânea na região.

Figura 22 – Barragem subterrânea construída na propriedade da fazenda Fieza próximo ao Poço P1.



Fonte: Autor (2022).

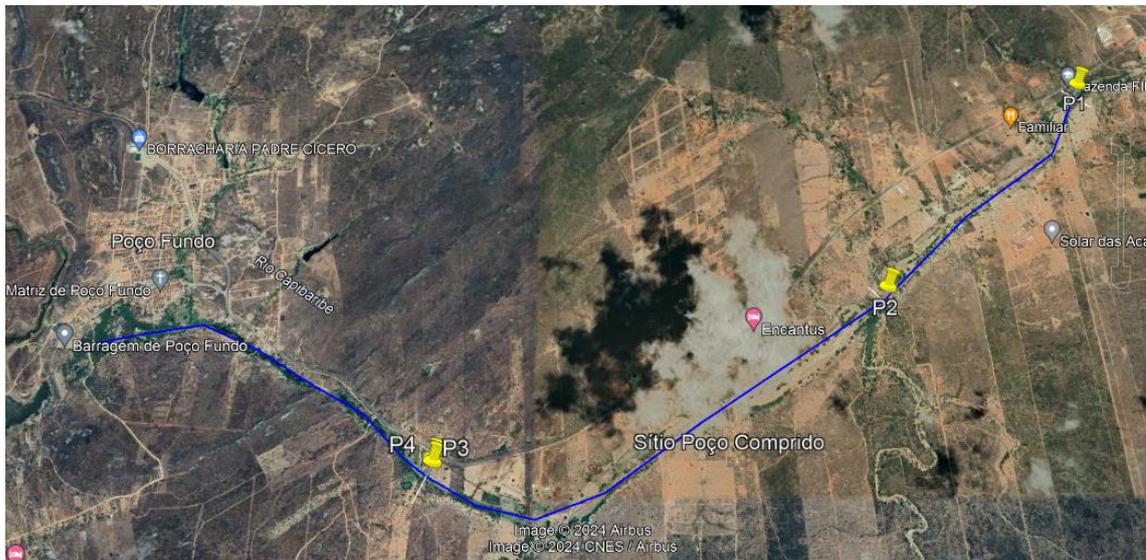
Na região, já existem práticas de utilização das águas armazenadas nos aquíferos aluviais, com o cadastramento de oito poços cacimbões na área de acumulação planejada para a barragem. A aproximadamente 500 metros a jusante do local escolhido para a construção da barragem, há uma intensa extração de areia. Logo, a exposição da superfície da água após a remoção dessa camada de sedimentos que a protegia, contribui para uma maior perda de água por evaporação (Araújo Filho *et al.*, 2016). Portanto, além da barragem subterrânea garantir maior

acúmulo de água, também tem a função de proteger o aquífero a montante da perda de água por fluxo subterrâneo para a área onde essa extração ocorre.

A espessura da camada da aluvião no trecho escolhido é de aproximadamente 3,50 m, medida que pode ser verificada através da profundidade do Poço P1 que se encontra ligeiramente à montante da barragem. Em relação as características geofísicas de acumulação de água, a composição dos sedimentos na aluvião é predominantemente de areia média a grossa (Silva, 2015).

Traçou-se o perfil longitudinal do terreno à montante da barragem subterrânea, que se localiza próximo ao Poço P1, com o objetivo de caracterizar a inclinação da área, estendendo-se desde o distrito de Poço Fundo até o Poço P1 na Fazenda Fieza, com o comprimento de aproximadamente 7 km (Figura 23). Essa representação visual proporciona uma compreensão mais detalhada das variações de elevação ao longo desse trecho, que foram obtidas através do Google Earth Pro.

Figura 23 – Trecho longitudinal utilizado para caracterização da elevação do terreno.



Fonte: Autor (2024).

Constata-se no perfil longitudinal de elevação do terreno que o trecho à montante da barragem subterrânea possui pouca declividade, com a cota média de 455 m e inclinação média de 2,0% considerando todo o percurso (Figura 24). Foi realizado o levantamento de três seções transversais, uma à jusante no Poço P1 (Figura 25), uma na região intermediária do trecho no Poço P2 (Figura 26), e outra à montante nos poços P3 e P4 (Figura 27).

Figura 24 – Perfil longitudinal de elevação do terreno.



Fonte: Autor (2024).

Figura 25 – Seção transversal Poço P1.



Fonte: Autor (2024).

Figura 26 – Seção transversal Poço P2.



Fonte: Autor (2024).

Figura 27 – Seção transversal Poços P3 e P4.



Fonte: Autor (2024).

Em relação à recarga proveniente de fontes hídricas superficiais, a área onde a barragem subterrânea foi construída está localizada a aproximadamente 80 km da nascente do rio Capibaribe e a cerca de 10 km da barragem de Poço Fundo.

A fim de executar a construção da barragem subterrânea, foi empregado um revestimento de lona plástica confeccionada em polietileno de baixa densidade. As dimensões desta barragem incluem uma profundidade máxima de 3,50 metros e um comprimento total de 73,00 metros.

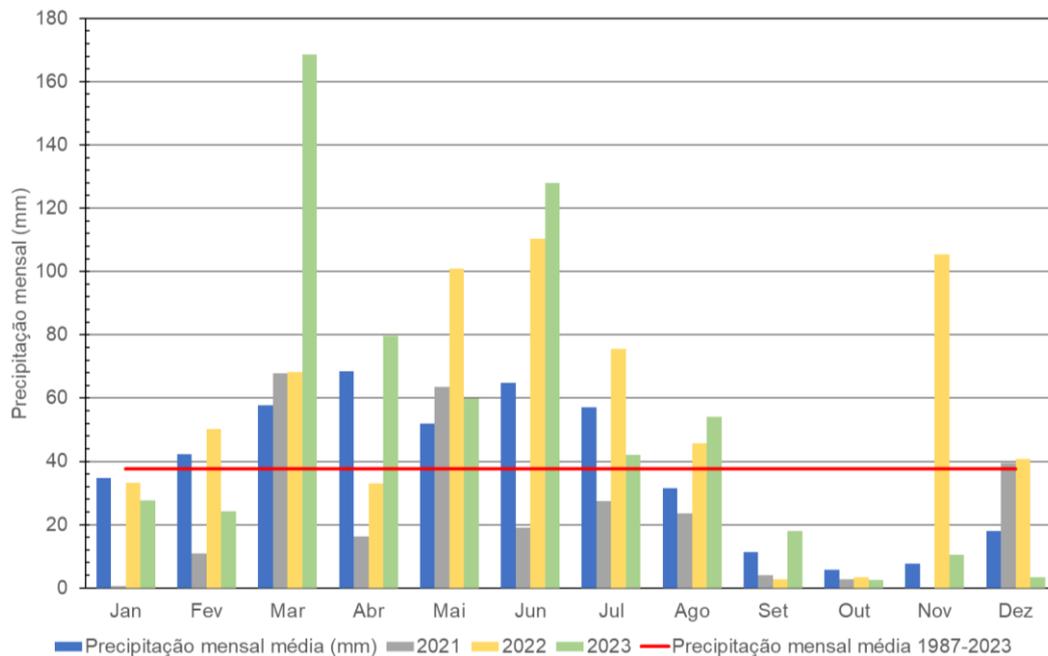
4 RESULTADOS

4.1 SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO DO ALTO CAPIBARIBE

A região do Agreste pernambucano, em particular o município de Santa Cruz do Capibaribe e suas proximidades, é caracterizada por experimentar consideráveis oscilações nas precipitações. Com o intuito de ilustrar essa sazonalidade, procedeu-se ao cálculo da média mensal de precipitação, ao longo da série histórica compreendida entre os anos de 1987 e 2023 (Figura 28), a partir dos registros da estação pluviométrica de Código 736041, situada em Santa Cruz do Capibaribe.

Conforme representado na Figura 28, é possível identificar que o período de maior pluviosidade na região ocorre de fevereiro a julho, com uma significativa redução nas chuvas durante os meses de agosto a dezembro. A máxima média mensal de precipitação ocorre em abril, atingindo 68,5 mm, enquanto a mínima é registrada em outubro, com apenas 5,67 mm. Os dados de precipitação mensal selecionados entre setembro de 2020 e setembro de 2023, demonstram a sazonalidade das precipitações na região no período em que foram monitorados os poços (Figura 28).

Figura 28 – Precipitação média mensal na estação 736041 entre 1987 e 2023, e precipitação mensal entre set/2020 a set/2023.



Fonte: Autor (2024).

O período em análise foi caracterizado por ter precipitações intensas que a região não costumava ter, o que causou uma alteração abrupta no nível de água dos poços. Em março de 2023 ocorreu uma precipitação de 168,6 mm, enquanto a média histórica para esse mês é de 57,69 mm. Junho de 2022 registrou 110,3 mm de chuva, e junho de 2023 registrou 127,9 mm, em comparação com uma média histórica de 64,8 mm para junho. Além disso, novembro de 2022 teve uma precipitação de 105,4 mm, muito acima da média histórica de apenas 7,61 mm para esse mês. Em contraste, no mesmo mês de novembro em 2021, não ocorreu precipitação. Esse evento de novembro de 2022 se destaca como uma ocorrência atípica para a região, mas é de suma importância para a recarga hídrica local, visto que é uma região semiárida com recursos hídricos escassos (Figura 28).

Conforme evidenciado no gráfico apresentado na Figura 28, destaca-se que o mês de março de 2023 foi o mais pluvioso durante o período em análise. Vale notar que, somente no dia 13 de março, houve um extraordinário acúmulo de 127,8 mm de chuva, resultando em extensas áreas de alagamento em toda a região.

Essa variação sazonal na distribuição da precipitação é de extrema relevância para a compreensão do clima local e tem implicações significativas em diversas áreas, incluindo agricultura, gestão de recursos hídricos (no caso dessa pesquisa, os recursos hídricos na aluvião), e prevenção de desastres naturais.

Por outro lado, no período de agosto a dezembro, quando a precipitação é menor, é importante adotar estratégias de conservação de água e planejamento agrícola adequado, já que a disponibilidade de recursos hídricos pode ser mais limitada.

4.2 FLUTUAÇÃO MENSAL DO NÍVEL DE ÁGUA DOS POÇOS

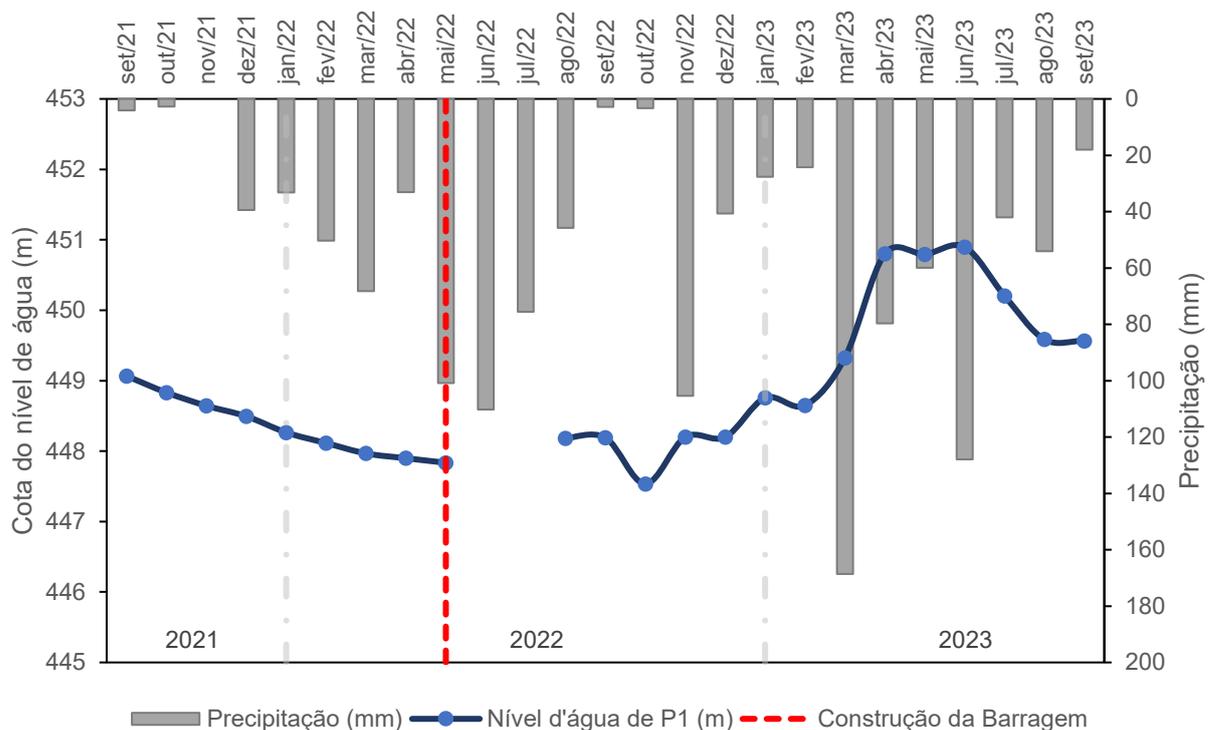
4.2.1 Flutuação mensal do nível de água do Poço P1

Na Figura 29, observa-se a variação dos níveis de água e precipitação ao longo do período de monitoramento do Poço P1. A Tabela 7, mostra ainda os valores de variação dos níveis de água mensais, que é relevante para identificar se houve alguma recarga ou perda hídrica.

Entre setembro 2021 e o começo de maio 2022, ocorreu apenas uma redução gradativa do nível de água no Poço P1, cerca de 124 cm (Tabela 7). Em maio de 2022

ocorreram precipitações intensas que resultaram na interrupção operacional do sensor associado ao Poço P1, impedindo, assim, o registro da recarga hídrica durante esse período. O funcionamento do sensor foi restaurado somente em outubro de 2022, porém foi possível registrar as medidas de forma manual somente a partir de agosto de 2022 devido o Poço P1 estar submerso. Em novembro de 2022 ocorreram altas taxas de precipitação, observou-se um aumento de 66 cm no Poço P1. Entre os meses de janeiro e julho de 2023, verificou-se um substancial aumento nos níveis de recarga hídrica deste poço, com ênfase no mês de março de 2023 que foi o mês que mais ocorreu precipitação (168,6 mm) e acréscimo de 215 cm no nível de água entre os meses de março e abril de 2023 no Poço P1.

Figura 29 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P1 e precipitação.



Fonte: Autor (2024).

Após a conclusão da barragem subterrânea, em maio/2022, houve uma notável melhoria no acúmulo de água no Poço P1, visto que é o poço em análise mais próximo da barragem, o que contribuiu significativamente para sua estabilidade hídrica. A estrutura da barragem indica estar desempenhando um papel fundamental na retenção e no aumento do suprimento de água disponível no poço.

Tabela 7 – Dados de flutuação de média mensal do Poço P1 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação.

	Média h (m)	Variação (m)	Precipitação mensal (mm)
set/21	449,07	0,00	4,1
out/21	448,83	-0,24	2,7
nov/21	448,64	-0,19	0,0
dez/21	448,49	-0,15	39,4
jan/22	448,26	-0,23	33,2
fev/22	448,11	-0,15	50,3
mar/22	447,97	-0,14	68,2
abr/22	447,90	-0,07	33,1
mai/22	447,83	-0,07	100,8
jun/22	-	-	110,3
jul/22	-	-	75,6
ago/22	448,18	-	45,8
set/22	448,19	0,01	2,8
out/22	447,54	-0,65	3,3
nov/22	448,20	0,66	105,4
dez/22	448,20	0,00	40,7
jan/23	448,76	0,56	27,7
fev/23	448,65	-0,11	24,2
mar/23	449,33	0,68	168,6
abr/23	450,80	1,47	79,6
mai/23	450,79	-0,01	59,9
jun/23	450,90	0,11	127,9
jul/23	450,21	-0,69	42,0
ago/23	449,59	-0,62	54,0
set/23	449,57	-0,02	18,0

Fonte: Autor (2024).

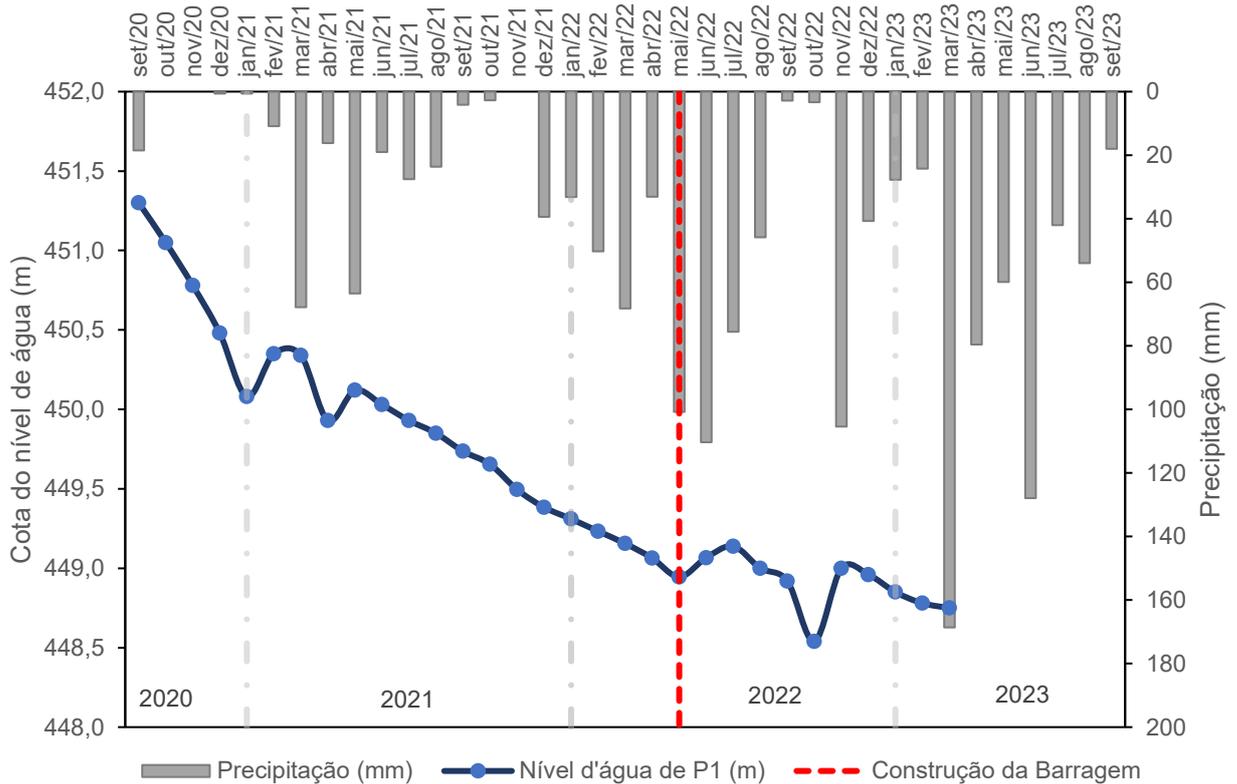
4.2.2 Flutuação mensal do nível de água do Poço P2

O Poço P2, enfrentou desafios consideráveis no que diz respeito ao registro dos níveis de água. Os dados de variação do nível de água do Poço P2 e da precipitação na estação pluviométrica de Santa Cruz do Capibaribe são apresentados na Figura 30 e Tabela 8.

Durante o período de setembro de 2020 a janeiro de 2021, observou-se uma redução nos níveis de água do Poço P2, cerca de 122 cm, seguida por uma leve recuperação de 27 cm entre janeiro e março de 2021. Posteriormente, houve outra pequena recarga com o acréscimo de 19 cm no nível de água em maio de 2021. No período de maio de 2021 até o início de maio de 2022, observou-se uma gradual diminuição de 117 cm no nível de água deste poço. Houve uma leve recuperação de

19 cm entre maio e julho de 2022, seguida por uma nova queda de 60 cm nos níveis de água. A recarga ocorreu novamente em novembro de 2022, mês em que se registrou uma precipitação de 105,4 mm, resultando no acréscimo de 46 cm no nível de água (Tabela 8).

Figura 30 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P2 e precipitação.



Fonte: Autor (2024).

A partir de agosto de 2022, os sensores de monitoramento do poço apresentaram defeitos, levando à necessidade de realizar leituras manuais dos níveis de água. Esse procedimento continuou até março de 2023, quando o poço se tornou inacessível por estar subterrado, após o dia 13 de março de 2023 que registrou 127,8 mm em apenas um dia.

A construção da barragem subterrânea aparentemente não teve um impacto significativo na melhoria do acúmulo de água no Poço P2. Houve falha no equipamento a partir de março de 2023, mas já seria perceptível algum efeito nas leituras de maio/2022 a março/2023. Essa diferença fica claro com o efeito do barramento observado nas leituras do Poço P1 com um maior armazenamento à

jusante da barragem subterrânea. No entanto, é importante ressaltar que seria necessário um período de análise mais longo para compreender plenamente seu efeito no comportamento do poço.

Tabela 8 – Dados de flutuação de média mensal do Poço P2 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação.

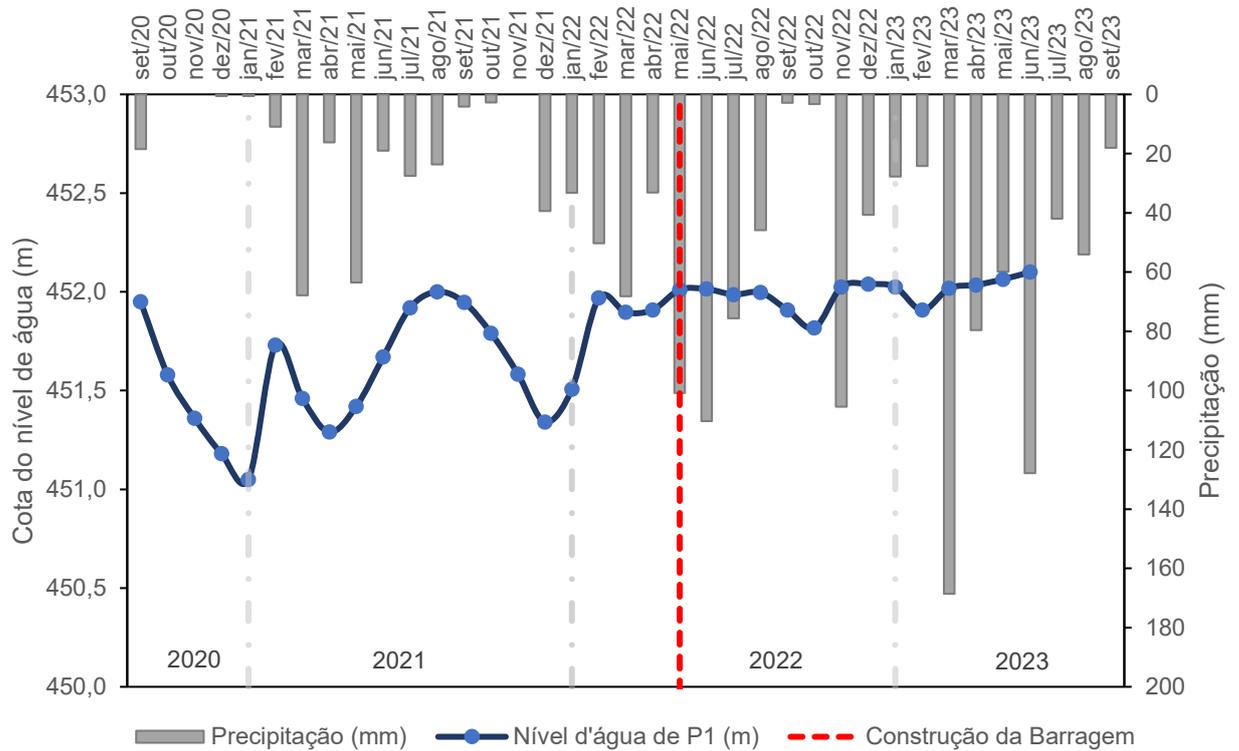
	Média h (m)	Variação (m)	Precipitação mensal (mm)
set/20	451,30	0,00	18,5
out/20	451,05	-0,25	0,0
nov/20	450,78	-0,27	0,0
dez/20	450,48	-0,30	0,6
jan/21	450,08	-0,40	0,6
fev/21	450,35	0,27	10,9
mar/21	450,34	-0,01	67,8
abr/21	449,93	-0,41	16,2
mai/21	450,12	0,19	63,5
jun/21	450,03	-0,09	19,0
jul/21	449,93	-0,10	27,5
ago/21	449,85	-0,08	23,6
set/21	449,74	-0,11	4,1
out/21	449,65	-0,09	2,7
nov/21	449,50	-0,15	0,0
dez/21	449,38	-0,12	39,4
jan/22	449,31	-0,07	33,2
fev/22	449,23	-0,08	50,3
mar/22	449,16	-0,07	68,2
abr/22	449,06	-0,10	33,1
mai/22	448,95	-0,11	100,8
jun/22	449,07	0,12	110,3
jul/22	449,14	0,07	75,6
ago/22	449,00	-0,14	45,8
set/22	448,92	-0,08	2,8
out/22	448,54	-0,38	3,3
nov/22	449,00	0,46	105,4
dez/22	448,96	-0,04	40,7
jan/23	448,85	-0,11	27,7
fev/23	448,78	-0,07	24,2
mar/23	448,75	-0,03	168,6
abr/23	-	-	79,6
mai/23	-	-	59,9
jun/23	-	-	127,9
jul/23	-	-	42,0
ago/23	-	-	54,0
set/23	-	-	18,0

Fonte: Autor (2024).

4.2.3 Flutuação mensal do nível de água do Poço P3

Os dados relativos à variação do nível de água do Poço P3, juntamente com os dados de precipitação da estação pluviométrica, são apresentados na Figura 31 e na Tabela 9.

Figura 31 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P3 Eduardo e precipitação.



Fonte: Autor (2024).

Ao longo do período entre setembro de 2020 e fevereiro de 2022, foram registradas três recargas significativas no poço. A primeira ocorreu em fevereiro de 2021, aumentando 68 cm do nível de água, seguida por outra entre abril e agosto do mesmo ano, resultando em um aumento de nível acumulado de 71 cm, e a terceira recarga entre dezembro de 2021 e fevereiro de 2022, aumentando 63 cm no nível de água.

Tabela 9 – Dados de flutuação de média mensal do Poço P3 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação na estação de Santa Cruz do Capibaribe.

	Média h (m)	Variação (m)	Precipitação mensal (mm)
set/20	451,95	0,00	18,5
out/20	451,58	-0,37	0,0
nov/20	451,36	-0,22	0,0
dez/20	451,18	-0,18	0,6
jan/21	451,05	-0,13	0,6
fev/21	451,73	0,68	10,9
mar/21	451,46	-0,27	67,8
abr/21	451,29	-0,17	16,2
mai/21	451,42	0,13	63,5
jun/21	451,67	0,25	19,0
jul/21	451,92	0,25	27,5
ago/21	452,00	0,08	23,6
set/21	451,95	-0,05	4,1
out/21	451,79	-0,16	2,7
nov/21	451,58	-0,21	0,0
dez/21	451,34	-0,24	39,4
jan/22	451,51	0,17	33,2
fev/22	451,97	0,46	50,3
mar/22	451,90	-0,07	68,2
abr/22	451,91	0,01	33,1
mai/22	452,01	0,10	100,8
jun/22	452,01	0,00	110,3
jul/22	451,99	-0,02	75,6
ago/22	452,00	0,01	45,8
set/22	451,91	-0,09	2,8
out/22	451,82	-0,09	3,3
nov/22	452,02	0,20	105,4
dez/22	452,04	0,02	40,7
jan/23	452,02	-0,02	27,7
fev/23	451,91	-0,11	24,2
mar/23	452,02	0,11	168,6
abr/23	452,04	0,02	79,6
mai/23	452,06	0,02	59,9
jun/23	452,10	0,04	127,9
jul/23	-	-	42,0
ago/23	-	-	54,0
set/23	-	-	18,0

Fonte: Autor (2024).

Entre os meses de setembro de 2021 e dezembro de 2021, foi observada uma diminuição nos níveis de água do Poço P3, cerca de 66 cm. No entanto, a partir do

mês de janeiro de 2022, iniciou-se um processo de recuperação dos níveis hídricos, atingindo o seu pico em fevereiro de 2022, recuperando 63 cm de nível de água, mantendo-se relativamente estável, com pequenas perdas, até outubro de 2022, quando ocorreu outra queda seguida por uma recuperação em novembro de 2022. Posteriormente, os níveis permaneceram estáveis, com ligeiro ganho de recarga hídrica até junho de 2023 (Figura 31 e Tabela 9).

Após a construção da barragem subterrânea, observou-se que os níveis de água do Poço P3 permaneceram estáveis, com poucas variações tanto em termos de ganho quanto de perda de água. A barragem subterrânea mantém o nível do poço P3 estável ao reduzir o escoamento de água, permitindo maior infiltração e retenção no aquífero.

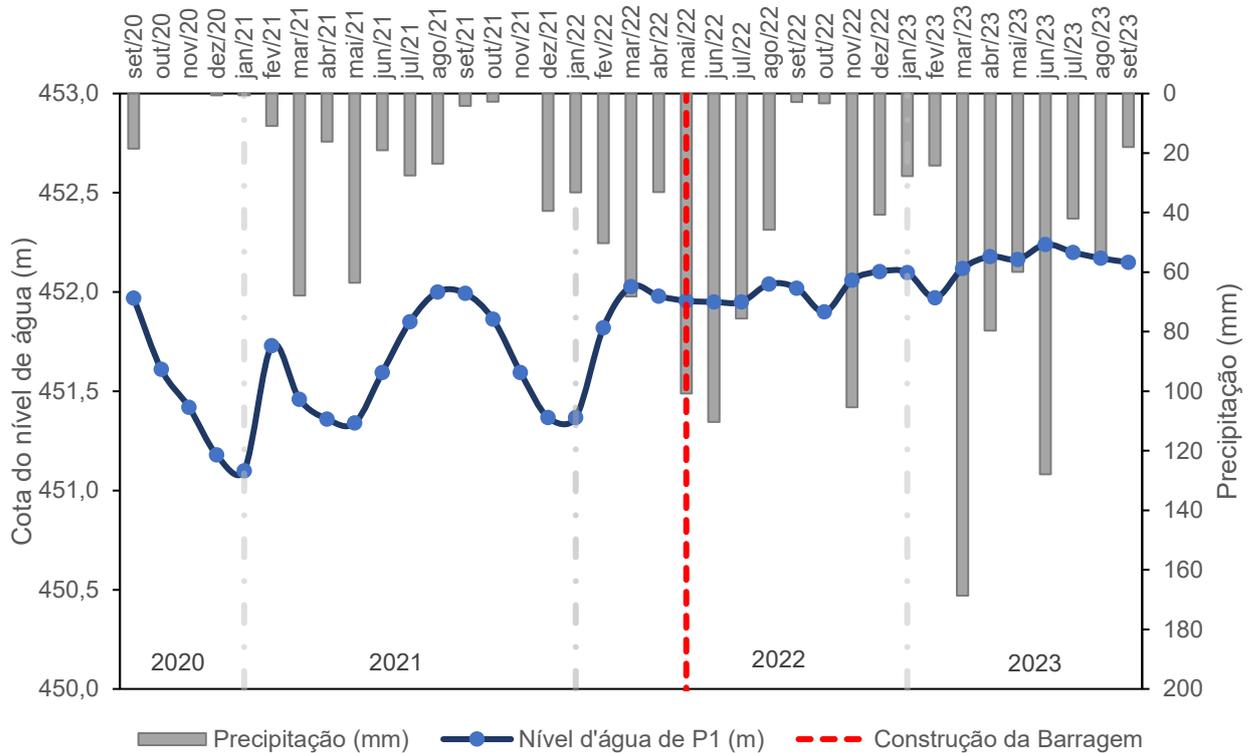
4.2.4 Flutuação mensal do nível de água do Poço P4

Os dados referentes aos níveis de água do Poço P4, em relação às informações de precipitação coletadas na estação meteorológica de Santa Cruz do Capibaribe, estão apresentados graficamente na Figura 32 e os dados na Tabela 10. O Poço P3 encontra-se posicionado no interior do leito do rio, enquanto o Poço P4 está localizado na margem do referido curso d'água.

Entre setembro de 2020 e agosto de 2021, o poço passou por dois eventos de recarga. O primeiro ocorreu em fevereiro de 2021, com o acréscimo acumulado de 63 cm no nível de água, seguido por outro em agosto do mesmo ano, resultando em um aumento acumulado de 66 cm (Tabela 10).

Entre o período de setembro de 2021 a dezembro de 2021, observou-se uma diminuição nos níveis de água do Poço P4, devido ao baixo índice de precipitação. A partir de janeiro de 2022, registrou-se uma grande recuperação, com elevação de 66 cm no nível de água, seguida por uma relativa estabilidade, com recarga hídrica e oscilações menores, no nível de água do Poço P4 (Figura 32 e Tabela 10). Esses padrões de recarga assemelham-se ao comportamento observado no poço P3.

Figura 32 – Flutuação mensal do nível de água do Poço P4 x precipitação.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 – Dados de flutuação de média mensal do Poço P4 com variação mensal dos níveis de água, e precipitação na estação de Santa Cruz do Capibaribe.

	Média h (m)	Varição (m)	Precipitação mensal (mm)
set/20	451,97	0,00	18,5
out/20	451,61	-0,36	0,0
nov/20	451,42	-0,19	0,0
dez/20	451,18	-0,24	0,6
jan/21	451,10	-0,08	0,6
fev/21	451,73	0,63	10,9
mar/21	451,46	-0,27	67,8
abr/21	451,36	-0,10	16,2
mai/21	451,34	-0,02	63,5
jun/21	451,60	0,26	19,0
jul/21	451,85	0,25	27,5
ago/21	452,00	0,15	23,6
set/21	451,99	-0,01	4,1
out/21	451,86	-0,13	2,7
nov/21	451,59	-0,27	0,0
dez/21	451,37	-0,23	39,4
jan/22	451,37	0,00	33,2
fev/22	451,82	0,45	50,3

mar/22	452,03	0,21	68,2
abr/22	451,98	-0,05	33,1
mai/22	451,96	-0,02	100,8
jun/22	451,95	-0,01	110,3
jul/22	451,95	0,00	75,6
ago/22	452,04	0,09	45,8
set/22	452,02	-0,02	2,8
out/22	451,90	-0,12	3,3
nov/22	452,06	0,16	105,4
dez/22	452,10	0,04	40,7
jan/23	452,10	0,00	27,7
fev/23	451,97	-0,13	24,2
mar/23	452,12	0,15	168,6
abr/23	452,18	0,06	79,6
mai/23	452,16	-0,01	59,9
jun/23	452,24	0,08	127,9
jul/23	452,20	-0,04	42,0
ago/23	452,17	-0,03	54,0
set/23	452,15	-0,02	18,0

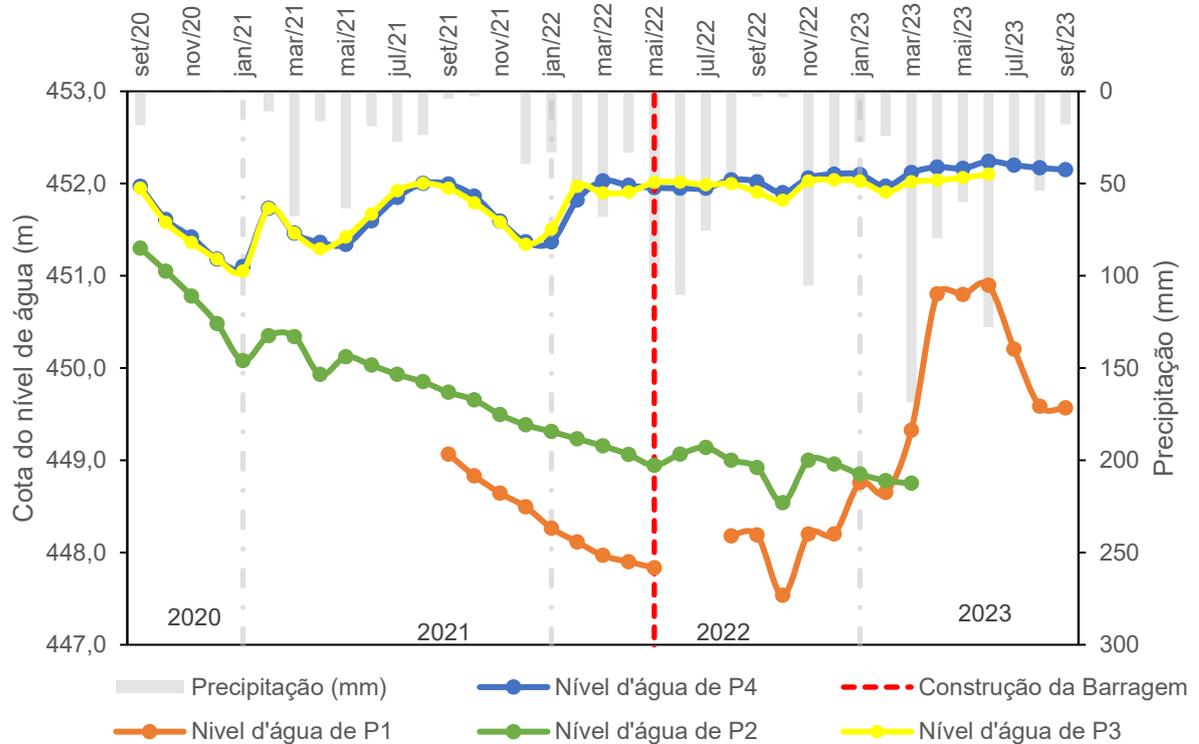
Fonte: Autor (2024).

4.2.5 Análise comparativa dos níveis de água nos poços

Os poços P1 e P2 manifestam uma variação nos níveis de água que apresenta certa concordância no período anterior a construção da barragem subterrânea até dezembro de 2022, ao passo que era previsível que os poços P3 e P4, dado seu posicionamento geográfico próximo, exibissem padrões de variação dos níveis de água similares (Figura 33).

De acordo com as tendências observadas na Figura 34 dos poços monitorados, notou-se maior estabilidade na variação do nível de água na maioria poços após a instalação da barragem subterrânea em maio de 2022, em que se deve também a maiores índices de precipitação. No Poço P1, a partir de outubro de 2022, foram observados aumentos significativos no nível de água. No entanto, no caso do Poço P2, não foram registradas mudanças substanciais no aumento do nível de água após a instalação da barragem. Quanto aos poços P3 e P4, percebeu-se que, após a construção da barragem, houve uma retenção maior no volume de água, com menos reduções no nível de água, mantendo-se em um nível elevado, considerando que a cota do terreno é de 453 metros e o nível de água permaneceu em torno de 452 metros (Figura 33).

Figura 33 – Variação dos níveis de água nos poços monitorados.



Fonte: Autor (2024).

No entanto, é importante ressaltar que a confirmação dessa tendência requer a análise de um conjunto mais extenso de dados, a fim de validar os resultados observados até o momento.

O poço que passou pelo período mais longo de retração no nível de água foi o Poço P2, abrangendo um período de um ano, de maio de 2021 a maio de 2022. Em seguida, o Poço P1 experimentou um período de retração entre setembro de 2021 e maio de 2022, em que apresentou baixo índice de precipitação nesse período. Por outro lado, os poços P3 e P4 não enfrentaram grandes períodos de escassez de água, sendo o maior intervalo observado entre setembro de 2020 e janeiro de 2021 (Figura 33).

Mediante a análise dos dados coletados referentes à variação dos níveis de água, foi possível a realização de uma análise comparativa entre os poços, identificando os períodos de acréscimo no nível de água mais significativos e as fases de escassez.

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)

4.3.1 Método WTF no Poço P1

Para determinar o rendimento específico (S_y) no Poço P1, calculou-se a média da condutividade hidráulica (K_{med}) utilizando o mesmo processo para todos os poços analisados. No caso do Poço P1, o valor de K_{med} resultou em $1,95 \times 10^{-6}$ m/s. Ao aplicar a Equação 3 com o valor de K_{med} , é possível obter o S_y para o Poço P1 resultando em 0,09 (Tabela 11).

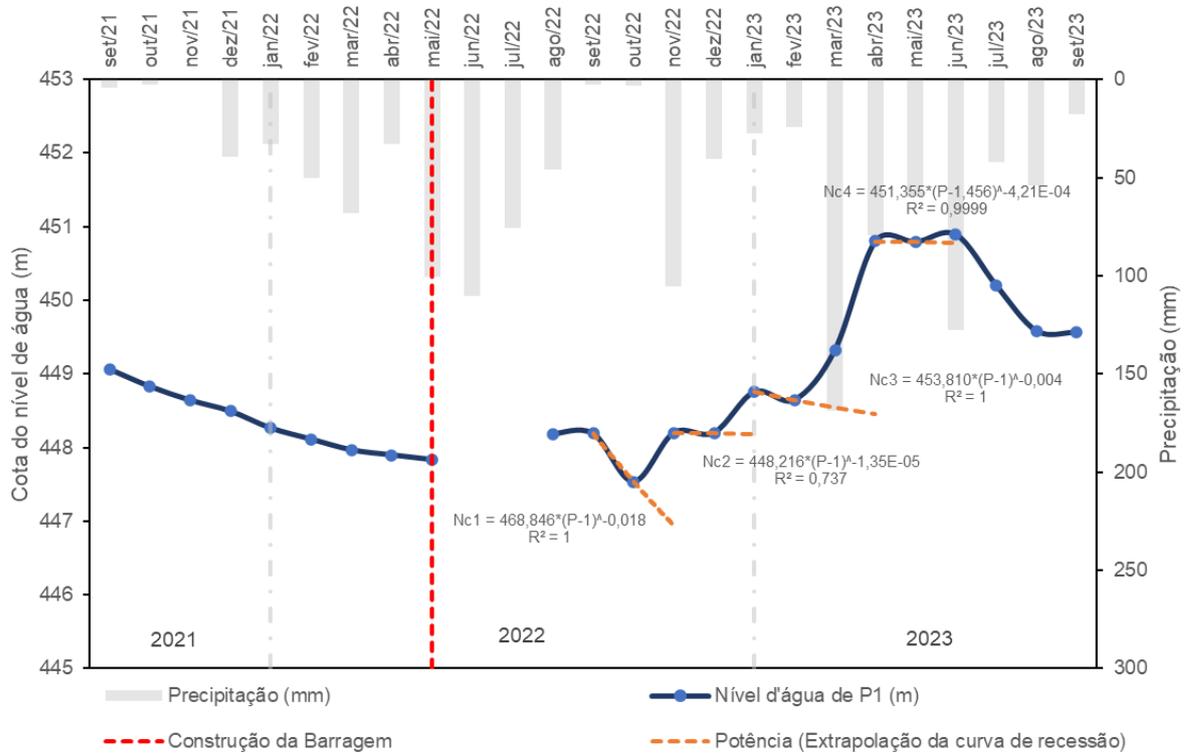
Tabela 11 – Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado no Poço P1.

K1 (m/s)	1,83 E-06
K2 (m/s)	2,07 E-06
Kmed (m/s)	1,95 E-06
S_y	0,09

Fonte: Autor (2024).

Por meio da aplicação da Equação 2, realizou-se o cálculo para extrapolar a curva nos pontos onde ocorreram recargas hídras Figura 34. Em que N_c é o nível calculado e R^2 é o coeficiente de determinação da equação obtida, sendo o ajuste entre a curva observada e a calculada para o período de recessão.

Figura 34 – Extrapolações das curvas de recessão para a aplicação do método WTF no Poço P1.



Fonte: Autor (2024).

Através da extrapolação da curva, determinou-se o valor de Δh . Este cálculo foi realizado quatro vezes para o Poço P1, considerando as recargas em novembro de 2022 ($\Delta h1$), janeiro de 2023 ($\Delta h2$), entre março e abril de 2023 ($\Delta h3$), e junho de 2023 ($\Delta h4$). O somatório dos valores de Δh foi registrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Variação do nível de água Δh do Poço P1.

$\Delta h1$ (m)	1,26
$\Delta h2$ (m)	0,56
$\Delta h3$ (m)	2,35
$\Delta h4$ (m)	0,12
$\sum \Delta h$ (m)	4,29

Fonte: Autor (2024).

Por meio da aplicação da equação 1, foram obtidos os resultados da recarga hídrica utilizando o método WTF. Foi calculada a recarga total, considerando todo o período em análise (Tabela 13).

Tabela 13 – Recarga hídrica total Poço P1.

$\Sigma\Delta h$ (m)	4,29
Sy	0,09
R (mm)	389,18
P (mm)	1317,6
R/P (%)	29,54

Fonte: Autor (2024).

Portanto, durante o período de setembro de 2021 a setembro de 2023, excluindo os meses de junho e julho de 2022 por falta de dados, foram obtidos 389,18 mm de recarga hídrica para o Poço P1, correspondendo a 29,54% da precipitação total (Tabela 13). Destaca-se que a maior recarga ocorreu entre março e abril de 2023, com um Δh de 2,35 m. Já a menor recarga ocorreu em julho de 2023, com um Δh de 0,12 m (Tabela 12).

4.3.2 Método WTF no Poço P2

O K_{med} para o poço P2 resultou em $8,43 \times 10^{-6}$ m/s. Ao aplicar a Equação 3 com o valor de K_{med} , obteve-se o S_y para o Poço P2, resultando em 0,11 (Tabela 14).

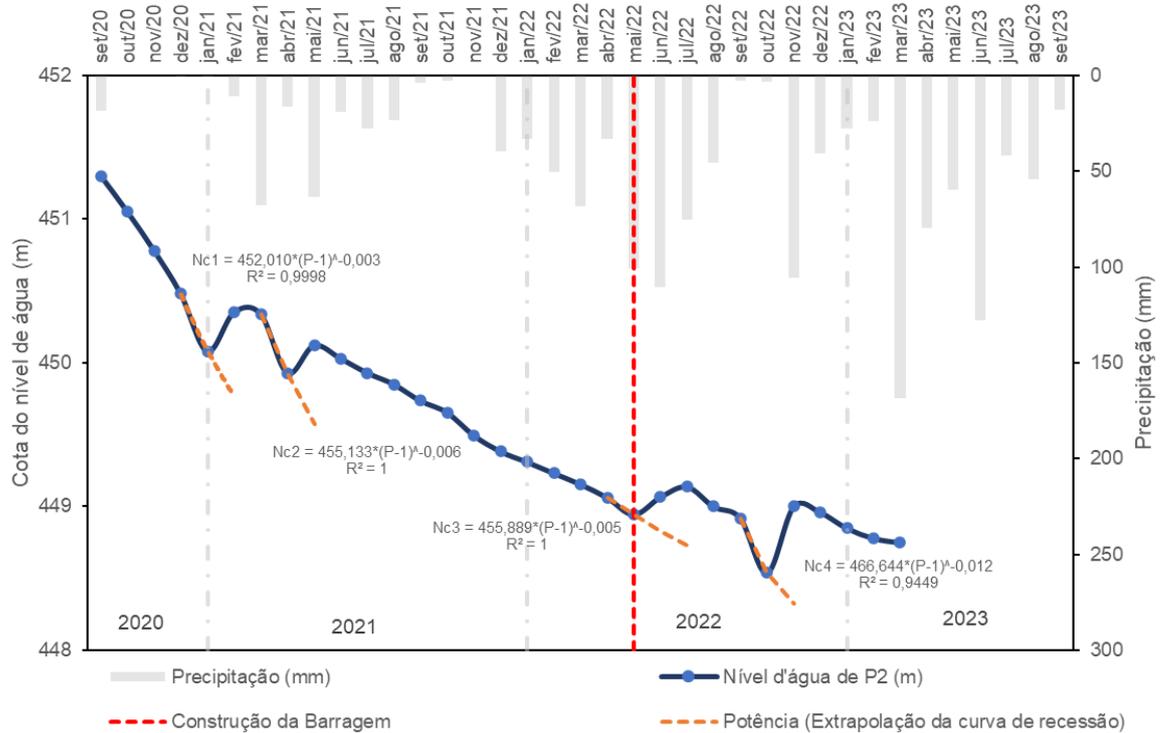
Tabela 14 – Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado no Poço P2.

K1 (m/s)	9,22 E-06
K2 (m/s)	7,64 E-06
K_{med} (m/s)	8,43 E-06
Sy	0,11

Fonte: Autor (2024).

Através da aplicação da Equação 2, calculou-se a extrapolação da curva nos pontos onde ocorreram recargas hídricas (Figura 35).

Figura 35 – Aplicação do método WTF no Poço P2.



Fonte: Autor (2024).

Através da extrapolação da curva, foi possível determinar o valor de Δh . Este cálculo foi realizado quatro vezes para o poço P2, considerando as recargas em fevereiro de 2021 (Δh_1), maio de 2021 (Δh_2), julho de 2022 (Δh_3), e novembro de 2022 (Δh_4). O somatório dos valores de Δh foi registrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Variação do nível de água Δh do Poço P2.

Δh_1 (m)	0,58
Δh_2 (m)	0,55
Δh_3 (m)	0,40
Δh_4 (m)	0,68
$\sum \Delta h$ (m)	2,21

Fonte: Autor (2024).

Através da aplicação da Equação 1, foram obtidos os resultados da recarga hídrica utilizando o método WTF. Foi calculada a recarga total, considerando todo o período em análise (Tabela 16).

Tabela 16 – Recarga hídrica total Poço P2.

$\Sigma\Delta h$ (m)	2,21
Sy	0,11
R (mm)	246,0
P (mm)	1565,8
R/P (%)	15,71

Fonte: Autor (2024).

No período analisado para o Poço P2, registrou-se uma recarga total de 246 mm pelo método WTF, o que representa 15,71% da precipitação total ocorrida (Tabela 16). A recarga mais significativa foi observada em novembro de 2022, com um aumento de Δh de 0,68 m, enquanto a menor recarga ocorreu em julho de 2022, com um aumento de Δh de 0,40 m (Tabela 15).

4.3.3 Método WTF no Poço P3

O Kmed do Poço P3 resultou em $2,56 \times 10^{-5}$ m/s. Ao aplicar a Equação 3 com o valor de Kmed, foi possível calcular o Sy para o Poço P3, resultando em 0,13 (Tabela 17).

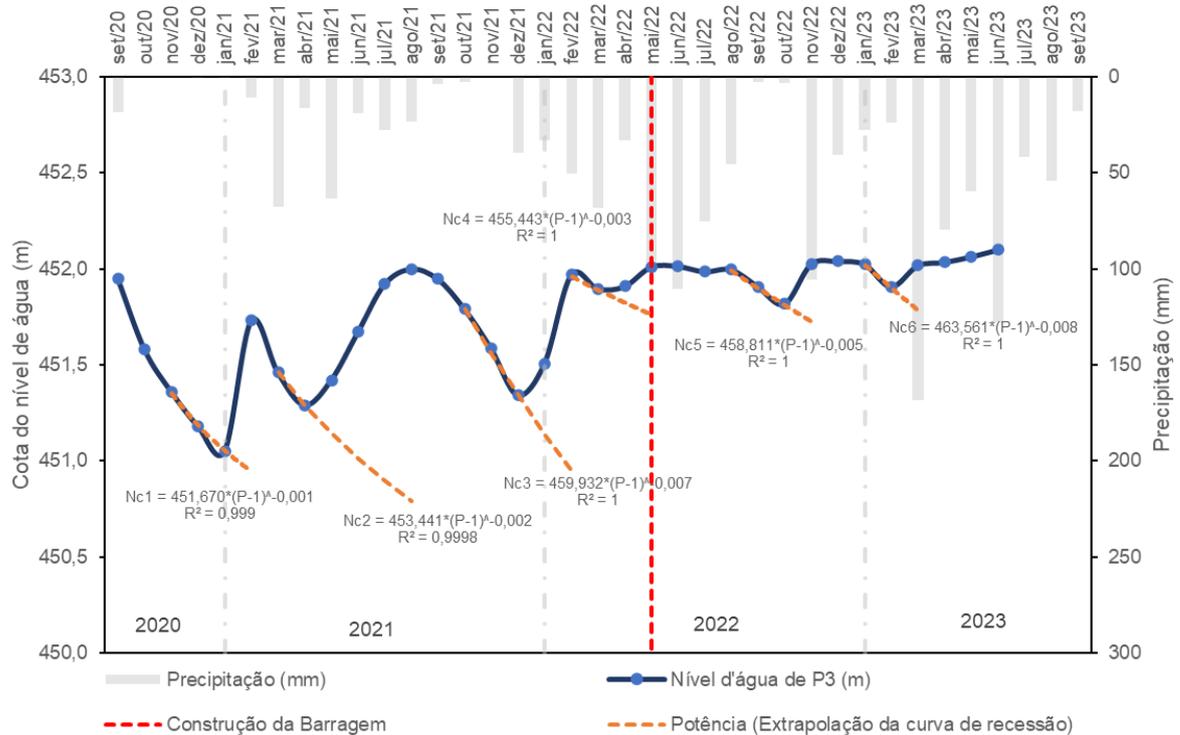
Tabela 17– Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado no Poço P3.

K1 (m/s)	2,84 E-05
K2 (m/s)	2,28 E-05
Kmed (m/s)	2,56 E-05
Sy	0,13

Fonte: Autor (2024).

Através da aplicação da Equação 2, foi possível calcular a extrapolação da curva nos pontos onde ocorreram recargas hídricas (Figura 36).

Figura 36 – Aplicação do método WTF no Poço P3.



Através da extrapolação da curva, foi possível determinar o valor de Δh . Este cálculo foi realizado seis vezes para o Poço P3, considerando as recargas em fevereiro de 2021 (Δh_1), agosto de 2021 (Δh_2), fevereiro de 2022 (Δh_3), maio de 2022 (Δh_4), novembro de 2022 (Δh_5), e março de 2023 (Δh_6). O somatório dos valores de Δh foi registrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Variação do nível de água Δh do Poço P3.

Δh_1 (m)	0,78
Δh_2 (m)	1,21
Δh_3 (m)	1,01
Δh_4 (m)	0,25
Δh_5 (m)	0,29
Δh_6 (m)	0,22
$\sum \Delta h$ (m)	3,77

Fonte: Autor (2024).

Através da aplicação da Equação 1, foram obtidos os resultados da recarga hídrica utilizando o método WTF. Foi calculada a recarga total, considerando todo o período em análise (Tabela 19).

Tabela 19 – Recarga hídrica total no Poço P3.

$\sum \Delta h$ (m)	3,77
Sy	0,13
R (mm)	494,06
P (mm)	1565,8
R/P (%)	31,55
Fonte: Autor (2024).	

No período analisado para o Poço P3, registrou-se uma recarga total de 494,06 mm pelo método WTF, o que representa 31,55% da precipitação total ocorrida (Tabela 19). A recarga mais significativa foi observada em agosto de 2021, com um aumento de Δh de 1,21 m, enquanto a menor recarga ocorreu em março de 2023, com um aumento de Δh de 0,22 m (Tabela 18).

4.3.4 Método WTF no poço P4

O valor médio de condutividade hidráulica (K_{med}) e o rendimento específico (Sy) para o Poço P4 resultaram nos mesmos valores utilizados para o Poço P3 (Tabela 17). Por meio da aplicação da Equação 2, foi possível calcular a extrapolação da curva nos pontos onde ocorreram recargas hídricas (Figura 37).

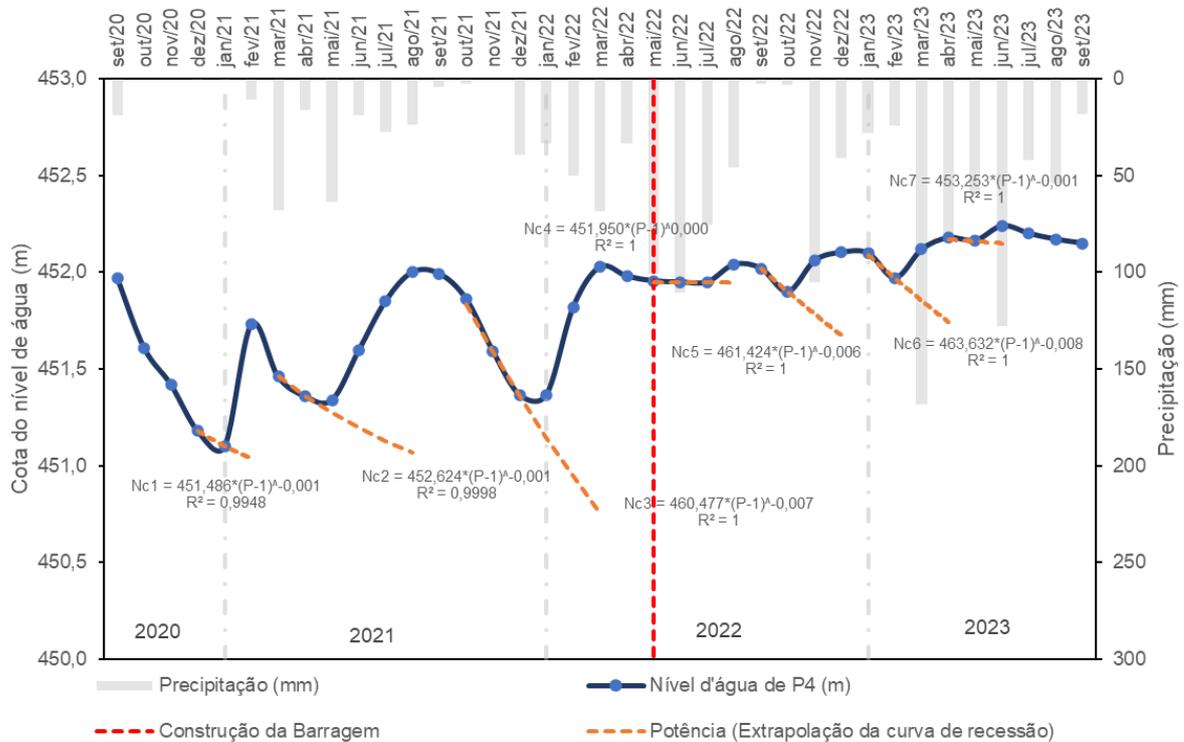
Através da extrapolação da curva, foi possível determinar o valor de Δh . Este cálculo foi realizado sete vezes para o Poço P4, considerando as recargas em fevereiro de 2021 (Δh_1), agosto de 2021 (Δh_2), março de 2022 (Δh_3), agosto de 2022 (Δh_4), dezembro de 2022 (Δh_5), abril de 2023 (Δh_6), e junho de 2023 (Δh_7). O somatório dos valores de Δh foi registrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Variação do nível de água Δh do Poço P4.

Δh_1 (m)	0,69
Δh_2 (m)	0,93
Δh_3 (m)	1,27
Δh_4 (m)	0,09
Δh_5 (m)	0,42
Δh_6 (m)	0,43
Δh_7 (m)	0,09
$\Sigma \Delta h$ (m)	3,92

Fonte: Autor (2024).

Figura 37 – Aplicação do método WTF no Poço P4.



Fonte: Autor (2024).

Através da aplicação da Equação 1, foram obtidos os resultados da recarga hídrica utilizando o método WTF. Foi calculada a recarga total, considerando todo o período em análise (Tabela 21).

Tabela 21 – Recarga hídrica total Poço P4.

$\Sigma\Delta h$ (m)	3,92
Sy	0,13
R (mm)	513,85
P (mm)	1565,8
R/P (%)	32,82
Fonte: Autor (2024).	

No período analisado para o Poço P4, registrou-se uma recarga total de 513,85 mm pelo método WTF, o que representa 32,82% da precipitação total ocorrida (Tabela 21). A recarga mais significativa foi observada em março de 2022, com um aumento de Δh de 1,27 m, enquanto a menor recarga ocorreu em junho de 2023, com um aumento de Δh de 0,09 m (Tabela 20).

4.3.5 Análise comparativa do método WTF entre os poços e melhorias na gestão hídrica

Os poços P1 e P2, embora apresentem certa similaridade no comportamento da variação do nível de água entre setembro de 2021 e dezembro de 2022, experimentaram recargas distintas, resultando em uma diferença de 13,83%. É importante ressaltar, no entanto, que os dados de monitoramento do Poço P2 foram interrompidos após março de 2023, enquanto o Poço P1 não possuía dados de monitoramento anteriores a setembro de 2021. Essas diferenças nos períodos de monitoramento podem ter influenciado significativamente essa discrepância na recarga observada.

Além disso, ao analisar o perfil longitudinal de elevação do terreno, é evidente que há pouca declividade, o que sugere um escoamento mais lento. Essa característica pode ter impactado na diferença de acumulação de água observada em P2. A recarga hídrica dos poços P3 e P4 pelo método WTF apresentou semelhanças significativas, como era esperado devido à proximidade entre eles, sendo registrada apenas uma pequena diferença de 1,27% na recarga entre esses poços.

Com base na recarga mensal de cada poço, observou-se que, embora o Poço P4 tenha registrado a maior recarga total em relação aos outros, o Poço P1 apresentou a maior taxa de recarga mensal, com 16,21 mm por mês, com uma recarga total de 389,18 mm. Por outro lado, o Poço P2 registrou a menor recarga total, com

246,00 mm, e uma taxa de 6,83 mm por mês. Os valores de recarga expressos como parcela da precipitação variaram entre 15,71% e 32,82%, com média de 27,40% (Tabela 22).

Outros estudos, como o de Andrade *et al.* (2014), também identificaram uma recarga hídrica semelhante com a recarga média aqui obtida, sendo uma recarga de 27% usando o método WTF para um aquífero aluvial na região semiárida de Pernambuco, especificamente no riacho Mimoso, no município de Pesqueira, durante o ano de 2004. Teramoto *et al.* (2018) também encontraram valores semelhantes, registrando uma recarga de 33% para um aquífero em São Paulo no ano de 2011.

Tabela 22 – Recarga mensal dos poços analisados.

Poço	Período (meses)	R (mm)	R mensal (mm/mês)	R/P (%)
P1	24	389,18	16,21	29,54
P2	36	246,00	6,83	15,71
P3	36	494,06	13,72	31,55
P4	36	513,85	14,27	32,82
	Média	410,77	12,75	27,40

Fonte: Autor (2024).

Através do comprimento do perfil longitudinal de elevação do terreno que compreende do trecho desde à Barragem de poço fundo até o Poço P1, resultando em 7 km, considerando a seção transversal da aluvião de 200 m (Figura 38), é possível estimar o quanto de água poderia ser acumulada na aluvião do rio considerando essas condições e a recarga calculada.

Figura 38 – Área considerada da aluvião para estimativa de acúmulo de água.



Fonte: Autor (2024).

Segundo Costa Filho e Costa (2000), a potencialidade dos aquíferos intersticiais, representados pelas bacias sedimentares, totaliza aproximadamente $1,25 \times 10^9$ m³/ano em todo o estado de Pernambuco. Adicionalmente, há cerca de $0,1 \times 10^9$ m³/ano contidos nos depósitos aluviais. Em contraste, o aquífero fissural apresenta uma potencialidade estimada em $0,28 \times 10^9$ m³/ano.

É possível obter cerca de 214,2 mil metros cúbicos de água por ano recarregados na aluvião do Rio Capibaribe no trecho calculado (Tabela 23). Esse volume tem o potencial de atender às necessidades da população rural local, especialmente durante os períodos de estiagem.

Tabela 23 – Volume de água que possivelmente pode ser recarregado na aluvião.

Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)	R mensal (mm/mês)	V mensal (m ³ /mês)	V anual (m ³ /ano)
7000	200	1400000	12,75	17850	214200

Fonte: Autor (2024).

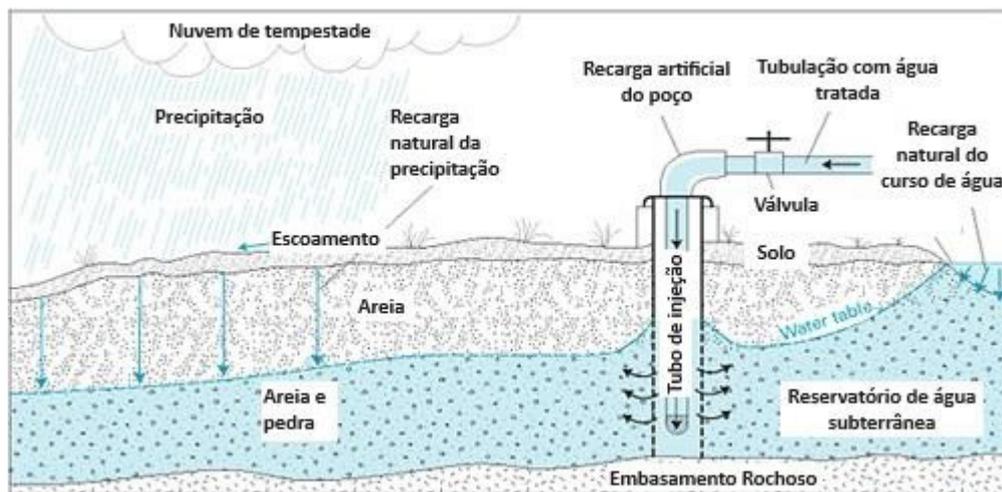
Para aprimorar a gestão hídrica dos poços é essencial estabelecer um sistema de monitoramento contínuo do nível de água nos poços, permitindo acompanhar as variações ao longo do tempo e identificar tendências.

Além disso, promover o uso eficiente da água é fundamental, incentivando práticas como técnicas de irrigação mais eficientes e a conscientização dos usuários

sobre a importância da conservação. Também é importante explorar alternativas como a recarga artificial, por meio de técnicas como a infiltração de água em aquíferos ou a construção de mais barragens subterrâneas, visando aumentar a disponibilidade de água nos poços, visto que houve certa estabilização no nível de água dos poços após a construção da barragem.

A gestão de recarga de aquífero visa armazenar água durante períodos de abundância para utilizá-la durante períodos de escassez. Em regiões semiáridas, como o Alto Capibaribe, a recarga artificial pode desempenhar um aumento do armazenamento de água subterrânea. Durante os períodos de grande disponibilidade de água, a água tratada ou proveniente da drenagem urbana pode ser injetada diretamente nos poços, permitindo sua infiltração no aquífero (Figura 39).

Figura 39 – Recarga artificial em aquíferos.



Fonte: Adaptado de United States Geological Survey (USGS, 2024).

Essa prática é particularmente eficaz para áreas onde a recarga natural de água subterrânea é limitada, sendo amplamente utilizado nos Estados Unidos, no estado da Califórnia (Pfeiffer et al., 2022) e na Flórida (Hibbs, 2016). Através da recarga artificial, é possível reabastecer aquíferos esgotados, prevenir a intrusão salina, estabilizar o subsolo contra a subsidência induzida pela extração excessiva de água e melhorar a qualidade da água subterrânea.

No entanto, é importante realizar uma gestão cuidadosa e planejada da recarga de aquíferos, levando em consideração as características hidrogeológicas locais, as demandas de água das comunidades e os impactos ambientais associados.

Diversificar as fontes de água, considerando opções como água de chuva, água de reuso e água de superfície, pode reduzir a pressão sobre os poços e garantir uma oferta mais estável de água. A realização de manutenção regular dos poços, incluindo limpeza, desinfecção e reparos, é igualmente importante para garantir seu bom funcionamento e prolongar sua vida útil.

Desenvolver planos de contingência e resposta a emergências é essencial para lidar eficazmente com situações de escassez de água ou outros eventos adversos. Além disso, é fundamental monitorar não apenas o nível de água, mas também a qualidade da água nos poços, garantindo que ela atenda aos padrões de potabilidade e seja segura para uso humano e ambiental. Ao implementar essas medidas, é possível melhorar significativamente a gestão hídrica dos poços, contribuindo para a sustentabilidade dos recursos hídricos e o bem-estar da região.

5 CONCLUSÃO

A aplicação do método WTF demonstrou facilidade de estimar recargas quando há disponibilidade de dados de nível d'água ao longo do tempo, embora os valores de recarga encontrados para P3 (31,55%) e P4 (32,82%) tenham sido um pouco mais altos do que os que geralmente são relatados na literatura, além de que os Poços P3 e P4 se encontram próximos da barragem de Poço Fundo, que contribui com o fluxo de água direcionado para a aluvião, podendo elevar os níveis de água. Isso também se deve ao fato de que o período analisado foi marcado por uma precipitação maior do que o esperado.

No geral, os poços apresentaram um bom desempenho relacionado à recarga hídrica durante o período analisado, com a média de recarga em relação à precipitação de 27,40%. O poço que obteve maior desempenho foi o Poço P4, com 32,82% de recarga em relação à precipitação, e o que teve pior desempenho foi o Poço P2, com 15,71%. Os poços P1 e P2 não demonstraram uma relação tão próxima com os poços P3 e P4, sendo que apresentaram um desempenho inferior em termos de acumulação de água em comparação com os poços P3 e P4. Essa disparidade pode ser atribuída à caracterização geofísica dos poços, que possuem diferentes espessuras da camada de aluvião. Além disso, a localização e a topografia do local, com pouca inclinação e muitas subidas e descidas ao longo do trecho, podendo influenciar no fluxo de água mais lento, juntamente com a variação do rendimento específico.

A barragem subterrânea teve grande influência em manter os níveis de água dos poços consistentemente altos após a ocorrência de precipitação. No caso do Poço P1, a partir de outubro de 2022, foram observados aumentos significativos no nível de água, com a recarga total de 29,54% para o período em análise. No entanto, para o Poço P2, não foram registradas mudanças substanciais no aumento do nível de água após a instalação da barragem. Houve falha no equipamento a partir de março de 2023, mas já seria perceptível algum efeito nas leituras de maio/2022 a março/2023. Essa diferença fica claro com o efeito do barramento observado nas leituras do Poço P1 com um maior armazenamento à jusante próximo da barragem subterrânea, quanto aos poços P3 e P4 houve uma retenção maior no volume de água, com menos reduções no nível de água. A barragem subterrânea desempenhou um papel importante na estabilização do acúmulo de água subterrânea na região. Entretanto,

recomenda-se o acompanhamento contínuo do monitoramento do nível de água dos poços para poder constatar como se comporta esse efeito em um período mais longo.

A determinação do S_y é um fator que influencia diretamente no cálculo da recarga hídrica pelo método WTF. Este parâmetro é variável não apenas da localização, mas também em relação à profundidade, tornando-se o aspecto mais complexo de determinar nesta metodologia.

Portanto, com base nos resultados do monitoramento, foi possível estimar um volume de 214,2 mil m^3 /ano de água potencialmente disponível na extensão da aluvião no trecho analisado. Esse volume representa uma quantidade significativa de água, especialmente considerando que a população rural muitas vezes enfrenta dificuldades no abastecimento de água fornecida pela companhia de abastecimento, recorrendo a fontes alternativas como essa.

Além disso, recomenda-se considerar a expansão e implementação de outras tecnologias para aumentar o acúmulo de águas subterrâneas. Isso poderia incluir a construção de mais barragens subterrâneas na região, bem como a adoção de técnicas de recarga artificial em aquíferos, visando garantir uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos na região.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. Sertões e sertanejos: uma geografia humana sofrida. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.13, n. 36, p. 07-59, mai/ago. 1999.
- ALBUQUERQUE, C. G. DE; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; FONTES JÚNIOR, R. V. de P. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Águas Subterrâneas**, 29(1), 60–71, 2015.
- ALMEIDA, T. A.; NETTO, M. L. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; BRANCO, A. M. Utilização de águas subterrâneas em aluviões no agreste pernambucano. **In: Anais... XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2004.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Diagnóstico dos recursos hídricos da região hidrográfica do São Francisco**. Brasília, DF: ANA, 2020a.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, DF: ANA, 2020b.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Plano Nacional de Segurança Hídrica: versão preliminar**. Brasília, DF: ANA, 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **HIDROWEB**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 08 de junho de 2023.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas do Nordeste**. Brasília, DF: ANA, 2018.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. 2018a. Disponível em: <<https://www.gov.br/anast/pdf/pnrh.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; RODRIGUES, D. F. B. Estimation of alluvial recharge in the semiarid. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.34, n.2, p.211-221, 2014.
- APAC - **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. Disponível em: <<https://www.apac.pe.gov.br/>>. Acesso em: 18 de março de 2024.

ARAÚJO FILHO, P. F.; CABRAL, J. J. S. P.; SILVA A. V. Processo de Evaporação no Leito Seco do Rio. Cap 3. *In: BRAGA, R. A. P. **Águas de Areias***. 1. ed. Recife: Ed. Clã. 366p. 2016.

ARAÚJO FILHO, P. F.; NÓBREGA, G. C.; CABRAL, J. J. S. P.; BRAGA, R. A. P.; SILVA, A. V. (2014). Dispositivo para determinação da influência da evaporação na aluvião de leito de rio no semiárido nordestino. *In: Anais... Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Natal, RN. Novembro de 2014. 10p.

AZEVEDO, M. A.; NASCIMENTO J. W. B.; FURTADO, D. A. Técnicas construtivas para barragens subterrâneas, bapucosa e poços amazonas. *Revista Educação Agrícola Superior*, v.25, n.1, p.31-36, 2010.

BAUM, C. A.; MANCUSO, M. A.; FRITZEN, R. R.; FORTES, P. R. Aplicação do método WTF para cálculo da recarga de aquífero freático em área urbana. *In: Anais... CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*, 2015.

BOUMIS, G.; KUMAR, M.; NIMMO, J. R.; CLEMENT, T. P. Influence of shallow groundwater evapotranspiration on recharge estimation using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 58, e2022WR032073, 2022.

BRAGA, R. A. P. *Águas de Areias*. 1. ed. Recife: Ed. Clã. 366p. 2016.

BRAGA, R. A. P.; PAIVA, A. L. R.; ARAÚJO FILHO, P. F.; CABRAL, JAIME J S P; SILVA, A. V.; GUSMÃO, P. T.; CAVALCANTI, E.; FARIAS; C. R.; COSTA, W.D. A Sustentabilidade do uso da água subterrânea frente à exploração de areias em leito de rios do semiárido brasileiro. *In: Anais... XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*. Belo Horizonte, MG. Setembro de 2014.

CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; ARAÚJO FILHO, P. F.; VASCONCELOS, G. L, M. B.; SILVA, D. J.; COUTINHO, A. P; (2016). Acumulação de Sedimentos e Água no Leito Seco dos Rios no Semiárido. Cap 2. *In: BRAGA, R. A. P. **Águas de Areias***. 1. ed. Recife: Ed. Clã. 366p. 2016.

CARVALHO, V. E. C. C.; REZENDE, K. S.; PAES, B. S. T. P.; BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G. Estimativa de recarga aquífera em uma sub-bacia hidrográfica

rural através do método de variação do nível d'água (VNA). **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 271-280., jan./mar. 2014.

CIRILO, J. A. Vulnerabilidade e Potencialidades do Semi-Árido Brasileiro. **Cadernos temáticos**. Recife, PE. 2010.

CIRILO, J. A.; CABRAL, J. J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. J. P. M.; LEITÃO, T. E.; MONTENEGRO, S. M. G.; GÓES, V. C. O Uso Sustentável dos Recursos Hídricos em Regiões Semi-Áridas. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH**, 2007.

COELHO, V. H. R. **Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2016.

COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, S.; ALMEIDA, C. N.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M.; GUSMÃO, A. C. V.; FREITAS, E. S.; MONTENEGRO, A. A. A. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**, Volume 548, Pages 1-15, ISSN 0022-1694, 2017.

CONSEMA, Conselho Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco. **Resolução CONSEMA/PE nº 01/2013**. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Governo do Estado de Pernambuco. 2013.

CORREIA, L. C.; ALVES M. G.; JÚNIOR G. C. S. Estimativa da recarga de água subterrânea utilizando o método WTF na porção continental da Bacia Sedimentar de Campos, Rio de Janeiro, Brasil. **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2021.

COSTA FILHO, W. D.; COSTA, W. D. Caracterização hidrogeológica do estado de Pernambuco. **1st Joint World Congress on Groundwater**, Águas Subterrâneas, 2000.

COSTA, W. D.; CIRILO, J. A.; PONTES, M.; MAIA, A. Z.; SOBRINHO, O. P. Barragens subterrâneas: uma forma eficiente de conviver com a seca. **Revista ABAS**, v. suplementar, p. 1-10, 1998.

COSTA, W. D. Barragens subterrâneas: conceitos básicos, aspectos locacionais e construtivos. In: CABRAL et al. (ORG.) Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. **Tópicos Especiais em Recursos Hídricos** Vol. 4. Recife: UFPE, p.13-60, 2004.

CROSBIE, R.S.; DOBLE, R.C.; TURNADGE, C.; TAYLOR, A.R. Constraining the Magnitude and Uncertainty of Specific Yield for Use in the Water Table Fluctuation Method of Estimating Recharge. **Water Resources Research**, 55, pp.7343–7361, 2019.

DELOTTIER, H.; PRYET, A.; LEMIEUX J.M.; DUPUY, A. Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation method. **Hydrogeology Journal**, 26, pp.2495–2505, 2018.

FERREIRA, V. M. et al. Diagnóstico da situação hídrica do Alto Capibaribe e entorno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 237-242, 2018.

GERHART, J.M. Ground-water recharge and its effect on nitrate concentrations beneath a manured field site in Pennsylvania. **Ground Water**, 24:483–389, 1986.

GIRARDI, R.; PINHEIRO, A.; VENZON, P. T. Parâmetros de qualidade de água de rios e efluentes presentes em monitoramentos não sistemáticos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, e2, 2019.

GOMES, J. A. C. et al. Caracterização físico-hídrica da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 156-161, 2017.

HALL, D. W.; RISSER, D. W. Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster county, Pennsylvania. **Water Resources Research**, 29:55–76, 1993.

HAO, A.; ZHANG, Y.; ZHANG, E.; LI, Z.; YU, J.; WANG, H.; WANG, Y. Review: Groundwater resources and related environmental issues in China. **Hydrogeology Journal**, 26, 1325-1337, 2018.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using ground-water levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v.10, P.91-110, 2002.

HIBBS, B. J. Groundwater in Urban Areas. **Journal of Contemporary Water Research & Education**. Volume 159, P 1-4, Dezembro de 2016.

HIRATA, R. C. A.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, Tundisi, Scheuenstuhl (orgs.). **Águas do Brasil: análises estratégicas**. Cap. IX, p. 149-161, 2010.

IBGE. **Semiárido Brasileiro**, 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 16 de Jun de 2021.

INPE. **Condições Atuais do Enos: Fase Neutra**, 2021. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 16 de Jun de 2021.

LIMA, E. S. (2018). Gestão de recursos hídricos: o caso do rio Capibaribe. Ambiente & Água, **Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 13(2), 1-11.

LIMA, J. L. et al. Gestão dos recursos hídricos no Semiárido nordestino: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 3, p. 1-13, 2019.

LIMA, M. A. C. et al. A bacia hidrográfica do Rio Capibaribe: diagnóstico socioambiental para subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos. In: **Anais... Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, 2016.

MAZIERO, T. A.; WENLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. In: **Anais... II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste**. USP. São Carlos, 2005.

MEINZER, O.E. The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles. **U.S. Geol. Survey Water Supply**, Pap 489, 321pp, 1923.

MEINZER, O. E.; STEARNS N. D. A study of ground water in the Pomperaug Basin, Connecticut, with special reference to intake and discharge. **U.S. Geol. Survey Water Supply**, Pap 597- B:73–146, 1929.

MELO, A. C. L. et al. Poluição da água por agrotóxicos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, PE. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 37-49, 2017.

- MELO, L. M. et al. Drought and food insecurity: perception and adaptation strategies of farmers in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 170, p. 59-66, 2019.
- MELO, R. F.; BRITO, L. T. L.; PEREIRA, L. A.; ANJOS, J. B. Avaliação do uso de adubo orgânico nas culturas de milho e feijão caupi em barragem subterrânea. **Revista Brasileira de Agroecologia**, 4 (2), p. 1264-1267, 2009.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALMEIDA, T. A.; COSTA NETTO, M. L. Uso de águas subterrâneas para a sustentabilidade da pequena agricultura no semi-árido do Nordeste. **Resumos de Comunicações do 7.º SILUSBA**. Lisboa. 2005.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Recursos hídricos em regiões semiáridas. **Instituto Nacional do Semiárido**, Campina Grande - PB, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cap. 1, 2012.
- MOURA, M. S. B. et al. Clima e água de chuva no Semiárido. In: BRITO, L. T. de L.; MOURA, M. S. B. de; GAMA, G. F. B. (Ed.). Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2007.
- MOURA, M. R. F. **Gestão integrada e desafios à segurança dos recursos hídricos: proposta de índice de vulnerabilidade hídrica (IVH) na bacia do rio Capibaribe**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. 111 f. CTG. Recife, 2020.
- NASCIMENTO, M., SILVA, J., SÁ, F. AND SILVA, E. Characterization and evaluation of the Campo Formoso karst aquifer, Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 56, pp.133-144, 2014.
- NOBRE, P. et al. O semiárido e a ciência. **Ciência e Cultura**, v. 68, n. 1, p. 46-51, 2016.
- OLIVEIRA, J. B.; ALVES, J. J.; FRANÇA, F. M. C. **Barragens subterrâneas: temáticas tecnologias e práticas hidroambientais para convivência com o Semiárido**. V. 3. Governo do Estado do Ceará – Fortaleza, 2010.
- PAIVA, A. L. R. DE; CAETANO, T. O.; SILVA, D. J.; CABRAL, J. J. S. P.; BRAGA, R. A. P. Ocorrência e características construtivas de poços escavados em aluvião -

trecho alto do Rio Capibaribe – PE. **In: Anais... XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE.** Natal, RN. 2014.

PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W.; RIBEIRO, L. F. Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais. **In: Anais... SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA,** Cabo Verde, 6., 2003.

PAZDRO, Z. Hydrogeologia Ogólna, W.G. Warszawa, p.575. **In: Alvarez, R.H.; Niedzielski, H., 1996. Estimacion de la recarga en la subcuenca Rio de las Avenidas Pachuca Hidalgo México. In: Anais... Congresso Latino-Americano de Hidr. Sub., 3. Atas. México: ALHSUD, p.35-46, 1983.**

PFEIFFER, C. L. S.; LARSEN, J. D.; POWELL, R. E.; MATTI, J. C.; MARTIN, P. M. Hydrogeology and Simulation of Groundwater Flow in the Lucerne Valley Groundwater Basin, California. **United States Geological Survey.** ISSN 2332-5607, 2022.

PINTO, E. J. de A.; LIMA, J. do. E. S.; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J. da.; DANTAS, C. D. de. O.; CANDIDO, M. de. O.; PALMIER, L. R.; MONTE-MOR, R. C. de. A. Estimativa da recarga natural do aquífero livre de uma sub-bacia da bacia representativa de Juatuba (MG) aplicado o método da variação dos níveis d'água (VNA). **In: Anais... XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS.** São Luís – MA, 2010.

RASMUSSEN, W.C; ANDREASEN, G.E. Hydrologic budget of the Beaverdam Creek Basin, Maryland. **U.S. Geol. Survey Water Supply,** Pap. 1472:106, 1959.

RIBEIRO, M. R. et al. Caracterização climática da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 18, n. 10, p. 1002-1009, 2014.

SANTOS, Paulo Henrique Neves; FERREIRA, Wesley Silva; SANTANA, Bruna Leidiane Pereira. Repercussões do El Niño e La Niña na precipitação do estado de Sergipe-Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 33, p. 409-437, 2023.

SANTOS, Wendell José Soares dos. **Fluxo de água na aluvião em um trecho do Rio Capibaribe no Semiárido Pernambucano.** UFPE, Caruaru, 2017.

- SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R.; SILVA, V. F. Qualidade da água em barragem subterrânea no semiárido. **Rev. Bras. Agric. Irr.** v. 10, nº.3, Fortaleza, p. 651 - 662, Mai – Jun, 2016.
- SANTOS, D. B.; SANTANA, G. S.; AZEVEDO, D. O.; SILVA, A. J. P.; NETO M. D. S. Recursos hídricos em regiões semiáridas. **Instituto Nacional do Semiárido**, Campina Grande – PB, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cap. 4, 2012.
- SÁ, J. U.; DINIZ, J. A. O. Aproveitamento das aluviões do semiárido do Nordeste. **In: Anais... XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**. Suplemento. Bonito, MS. Outubro de 2012.
- SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p.18-39. 2002.
- SILVA, DARLAN TELES *et al.*, Precipitação estimada por sensoriamento remoto no estado de Sergipe. Nativa, **Pesquisas Agrárias e Ambientais**. V.8, n.2, 2020.
- SILVA, D. J. **Caracterização da Aluvião no Alto Rio Capibaribe**. Trabalho de Conclusão do Curso, graduação em Engenharia Civil, Núcleo de Tecnologia, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2015.
- SILVA, J., SOUZA, F., DA SILVA, L. AND SILVA, E. Assessment of climate change impacts on groundwater resources in São Carlos Aquifer System, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 21, p.1-16, 2019.
- SILVA, M. B. et al. Agricultura irrigada no Semiárido nordestino: desafios e oportunidades para a sustentabilidade. **Irriga**, v. 23, n. 3, p. 434-449, 2018b.
- SILVA, M. S. et al. Impact of climate change on hydrology and water scarcity in Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 181-188, 2021.
- SILVA, R. L. L. **Monitoramento da qualidade da água em tempo quase-real: uma alternativa para a gestão de recursos hídricos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018a.

SILVA, V. F. **Avaliação da qualidade da água em barragem subterrânea no semiárido**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Programa de pós -graduação em Engenharia Civil e ambiental, Caruaru, 2013.

SIMON, F. W.; REGINATO, P.A.R.; KIRCHHEIM, R.E.; TROIAN, G. C. Estimativa de recarga do Sistema Aquífero Guarani por meio da aplicação do método da variação da superfície livre na bacia do Rio Ibicuí-RS. **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 12 – 29, 2017.

SOUZA, W. L. DA S. **Produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe para zona costeira da região metropolitana do Recife**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 2011.

SUDENE. **Delimitação do Semiárido**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf>>. Acesso em: 26 de Ago de 2023.

TEIXEIRA, Francisco Keilo. **Rios intermitentes do semiárido brasileiro: o efeito do ambiente e do espaço na estrutura da metacomunidade de peixes**. 82 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

TESFALDET, Y. T.; PUTTIWONGRAK, A.; ARPORNTHIP, T. Spatial and temporal variation of groundwater recharge in shallow aquifer in the Thepkasattri of Phuket, Thailand. **Journal of Groundwater Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 10-19, 2019.

TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Métodos WTF e simulação numérica de fluxo para estimativa de recarga – exemplo Aquífero Rio Claro em Paulínia/SP. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 173-180, 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Artificial Groundwater Recharge**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/artificial-groundwater-recharge#overview>>. Acesso em: 06 de Abril de 2024.

WENDLAND, E., BARRETO, C., GOMES, L.H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology** . 342, 261–269, 2007.

YIMAM, A.Y.; SISHU, F.K.; ASSEFA, T.T.; STEENHUIS, T.S.; REYES, M.R.; SRINIVASAN, R.; TILAHUN, S.A. Modifying the water table fluctuation method for calculating recharge in sloping aquifers. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 46(101325), (2023).