UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

WENDELL JOSÉ SOARES DOS SANTOS

GESTÃO DE ABASTECIMENTO ALTERNATIVO DE ÁGUA EM COMUNIDADE RURAL À MARGEM DE UMA ALUVIÃO EM UM TRECHO DO RIO IPANEMA NO SERTÃO ALAGOANO

Recife
2024

WENDELL JOSÉ SOARES DOS SANTOS

GESTÃO DE ABASTECIMENTO ALTERNATIVO DE ÁGUA EM COMUNIDADE RURAL À MARGEM DE UMA ALUVIÃO EM UM TRECHO DO RIO IPANEMA NO SERTÃO ALAGOANO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

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

Recife

2024

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S237g Santos, Wendell José Soares dos.
Gestão de abastecimento alternativo de água em comunidade rural à margem de uma aluvião em um trecho do Rio Ipanema no sertão alagoano / Wendell José Soares dos Santos – 2024.
151 f.: il., figs., qds., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Gerenciamento de recursos hídricos. 3. Água subterrânea. 4. Modelo numérico. 5. ModelMuse. 6. Abastecimento rural. I. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2024-72

WENDELL JOSÉ SOARES DOS SANTOS

GESTÃO DE ABASTECIMENTO ALTERNATIVO DE ÁGUA EM COMUNIDADE RURAL À MARGEM DE UMA ALUVIÃO EM UM TRECHO DO RIO IPANEMA NO SERTÃO ALAGOANO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 09/05/2024.

BANCA EXAMINADORA

_____
Profa. Dra. Sylvana Melo do Santos (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

_____
Profa. Dra. Rochele Sheila Vasconcelos (Examinadora Externa)
Universidade Estadual de Santa Cruz

participação por videoconferência

_____
Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

participação por videoconferência

_____
Prof. Dr. Severino Martins dos Santos Neto (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bênçãos que me foram concedidas ao longo da minha jornada e pela oportunidade de realizar este trabalho, por acreditar que eu seria capaz de enfrentar mais este desafio em minha vida. Sua presença constante nunca me abandonou e me sustentou diante das dificuldades e obstáculos que a vida nos apresenta. Quem deposita sua fé em Deus sabe que, no final, tudo dará certo.

Quero expressar minha gratidão à minha querida mãe, Maria Aparecida, que sempre acreditou em mim, muitas vezes mais do que eu mesmo, pelo seu amor, carinho, dedicação e por ter me ensinado os meus melhores valores. Agradeço também ao meu amado pai, Fernando Alves, pelo incentivo, apoio e paciência incansáveis. E às minhas irmãs Fernanda, Clara e Lesly, pelo apoio em toda a minha trajetória.

À minha esposa Hellen Beatriz, por me incentivar e me fazer despertar todas as vezes que pensei em desistir. Por todo o cuidado, amor, carinho e paciência em todos os momentos de incertezas e dificuldades durante a pesquisa e sempre. Por dedicar também, parte do seu tempo para me acompanhar e me ajudar nas diversas atividades de desenvolvimento da pesquisa. Todo o meu amor, e minha gratidão.

A minha amada avó Silene (*in memoriam*) pelas orações e pela fé depositada em mim, à minha tia Maria Soares por me acolher desde que comecei minha carreira acadêmica, pela paciência e cuidado.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva, pela dedicação constante, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas. Sua amizade e orientações foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional. Desde a graduação até o mestrado, o seu apoio e incentivo nunca me faltaram, e por isso sou imensamente grato. Pela confiança depositada, muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, por suas constantes contribuições e por seu apoio e pelo acolhimento no desenvolvimento inicial desta pesquisa, muito obrigado.

A todos os professores do PPGEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), pelos ensinamentos e conhecimentos passados em sala de aula, por sempre estarem dispostos a nos ajudar e por toda a dedicação com os alunos.

Ao meu amigo, Ryan Damasceno, que sempre esteve disposto a me ajudar nas atividades de campo, e não mediu esforços para me acompanhar, sempre que precisei.

Ao meu amigo e colega de pós-graduação Luttemberg Ferreira, por ter dividido os desafios diários do doutorado, e por todo apoio de sempre. A minha colega de pós-graduação Josielly Braz, que se prontificou para me dar suporte no desenvolvimento de algumas etapas finais da Tese.

Aos meus amigos Arnon Berg e Rayanne Karlla, por todo o apoio no desenvolvimento dos ensaios de laboratório. Por todo incentivo e tempo disponibilizado, na reta final de desenvolvimento da pesquisa, meu muito obrigado.

Por fim, a UFAL (Universidade Federal de Alagoas) Campus Sertão pela concessão do local para desenvolvimento dos ensaios da pesquisa, e todos os amigos e colegas dessa instituição, pelo incentivo para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

A disponibilidade de água em quantidade e qualidade no nordeste brasileiro é uma preocupação de longa data. O abastecimento público no período de estiagem, que por muitas vezes é longo, é um desafio, visto que a precipitação é concentrada em alguns meses do ano. Grande parte do território da região Nordeste encontra-se na região semiárida, onde os níveis pluviométricos anuais são relativamente baixos. Esse fator agrava ainda mais a situação de acesso à água nas zonas rurais, onde o abastecimento convencional é deficitário. Conhecer as demandas e fontes de água é fundamental para um melhor gerenciamento em cenário de escassez hídrica. Uma alternativa para essas regiões é a utilização da água subterrânea provenientes das aluviões, no entanto, frequentemente, esses mananciais são explorados sem um conhecimento adequado de seu comportamento. Para ajudar os gestores a compreender e gerenciar melhor os aquíferos, são utilizados modelos computacionais que representam a situação do ambiente real. No semiárido alagoano, às margens do Rio Ipanema, está localizada uma comunidade rural no município de Poço das Trincheiras, onde a população ribeirinha utiliza a aluvião disposta em um trecho do rio como principal fonte de abastecimento de água. O presente trabalho objetivou caracterizar o uso da água, os tipos de mananciais hídricos mais relevantes da região, e estimar suas ofertas e demandas, para contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis. Objetiva também avaliar o acúmulo de água na aluvião em um trecho de rio, e desenvolver um modelo numérico de fluxo subterrâneo do meio poroso. Para isto, foram realizadas entrevistas junto à comunidade, como também sondagens SPT e ensaios de caracterização do solo para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos em três pontos da área de estudo. O modelo conceitual da aluvião foi implementado no *software* ModelMuse, que executou o código MODFLOW-6. Com o auxílio do monitoramento dos níveis de água calibrou-se e foi alcançado um modelo numérico satisfatório. As fontes preponderantes de abastecimento de água foram a aluvião em 95,80% dos domicílios, sendo usada principalmente para os usos menos nobres (lavagens, banhos e sanitários) e a captação de água de chuva em 83,33% dos domicílios, usada principalmente em finalidades mais nobres (beber e cozinhar). A caracterização físico-hídrica da aluvião, mostrou um meio poroso arenoso, com bom potencial de acumulação de água e facilidade de escoamento, de acordo com os parâmetros de porosidade total média

de 31,25%, e condutividade hidráulica, que variou de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s. Estimou-se o potencial explorável da aluvião que foi de 58.088,44 m³/ano, para o trecho estudado. O modelo numérico possibilitou conhecer o comportamento do fluxo subterrâneo, que se dá no sentido do escoamento do rio. Foi possível avaliar a gestão das fontes de abastecimentos, e propor melhorias na sua utilização, destacando-se de maneira geral, boa disponibilidade das fontes de captação, desde que sejam utilizadas para as finalidades mais adequadas e em quantidades controladas, necessitando de atenção para a necessidade de tratamento dessas fontes, com um contínuo controle de qualidade da água. Os resultados confirmam que por meio de uma gestão adequada, a aluvião atende as necessidades de água da comunidade Quandú, e fornecem percepções visando garantir o abastecimento adequado de água e promover um uso consciente e eficiente dos recursos disponíveis.

Palavras-chave: gerenciamento de recursos hídricos; água subterrânea; modelo numérico; ModelMuse; abastecimento rural.

ABSTRACT

The availability of water in quantity and quality in the Brazilian Northeast has been a long-standing concern. Public supply during dry periods, which are often lengthy, poses a challenge as precipitation is concentrated in a few months of the year. A significant portion of the Northeast region's territory lies in the semi-arid zone, where annual rainfall levels are relatively low. This factor further exacerbates the situation of water access in rural areas, where conventional supply is deficient. Understanding water demands and sources is crucial for better management in times of water scarcity. An alternative for these regions is the use of groundwater from alluvial deposits; however, these sources are often exploited without adequate knowledge of their behavior. To assist managers in understanding and better managing aquifers, computational models representing real-world conditions are utilized. In the semi-arid region of Alagoas, along the banks of the Ipanema River, there is a rural community in the municipality of Poço das Trincheiras. The riverside population relies on the alluvial deposits along a stretch of the river as their main water supply. This study aimed to characterize water usage, the most relevant types of water sources in the region, and estimate their supplies and demands to contribute to better management of available water resources. It also aimed to evaluate water accumulation in the alluvial deposits along a river stretch and develop a numerical model of groundwater flow in the porous medium. To achieve this, interviews were conducted with the community, as well as Standard Penetration Test (SPT) and soil characterization tests to determine hydrodynamic parameters at three points within the study area. The conceptual model of the alluvium was implemented in the ModelMuse software, which executed the MODFLOW-6 code. With the aid of water level monitoring, a satisfactory numerical model was calibrated and achieved. The predominant water supply sources were alluvial deposits in 95.80% of households, primarily used for less noble purposes such as washing, bathing, and sanitation, and rainwater harvesting in 83.33% of households, mainly used for nobler purposes such as drinking and cooking. The physical-hydraulic characterization of the alluvium showed a sandy porous medium with good water storage potential and ease of flow, with average total porosity parameters of 31.25% and hydraulic conductivity ranging from 10^{-4} to 10^{-3} cm/s. The exploitable potential of the alluvium was estimated at 58,088.44 m^3/year for the studied stretch. The numerical model provided insight into the behavior of groundwater flow,

which follows the direction of the river flow. It was possible to evaluate the management of water sources and propose improvements in their utilization, emphasizing the overall good availability of collection sources as long as they are used for appropriate purposes and in controlled amounts. Attention is needed regarding the treatment requirements of these sources and continuous water quality monitoring. The results confirm that with proper management, the alluvium meets the water needs of the Quandú community and provide insights to ensure adequate water supply and promote conscious and efficient use of available resources.

Keywords: water resources management; groundwater; numerical model; ModelMuse; rural supply.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Situação climática da seca no Nordeste no mês de dezembro	23
Figura 2 -	Corte longitudinal do embasamento rochoso, com o aquífero aluvionar	28
Figura 3 -	Configuração e variáveis de um teste de bombeamento	31
Figura 4 -	Configuração dos ensaios *Slug Test* e *Bail Test*	32
Figura 5 -	Etapas para a modelagem computacional	40
Figura 6 -	Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema, localização povoado Quandú	47
Figura 7 -	Rede hidrográfica de Poço das Trincheiras, e localização do povoado Quandú	49
Figura 8 -	Localização do trecho da aluvião, Rio Ipanema - AL	50
Figura 9 -	Aluvião no trecho estudado, Rio Ipanema - AL	50
Figura 10 -	Poços escavados na aluvião, Rio Ipanema – AL	51
Figura 11 -	Fluxograma da metodologia adotada para a pesquisa	52
Figura 12 -	Levantamento dos poços, no trecho do Rio Ipanema	54
Figura 13 -	Poços de monitorados no trecho do Rio Ipanema	55
Figura 14 -	Localização dos poços monitorados, pontos de coleta de água e pontos de sondagens, na aluvião do rio Ipanema - AL	56
Figura 15 -	Ponto de possível lançamento de esgoto na aluvião do Rio Ipanema - AL	57
Figura 16 -	Realização de sondagem SPT na aluvião, Rio Ipanema, em 27/12/2023	58
Figura 17 -	Amostras do Ponto P1, separadas por profundidades de coleta	59
Figura 18 -	Preparação da amostra, do ponto P1, para o ensaio de análise granulométrica	61
Figura 19 -	Ensaio de sedimentação das amostras do Ponto P3	62

Figura 20 -	Ensaio de peneiramento, para a amostra do Ponto P1 a 0,5m	62
Figura 21 -	Área a ser modelada, trecho da aluvião do Rio Ipanema – AL	65
Figura 22 -	Delimitação do trecho da aluvião para a modelagem computacional, Rio Ipanema - AL	66
Figura 23 -	Malha do modelo, com as células ativas e inativas	68
Figura 24 -	Poços inseridos no modelo, para a área de estudo	69
Figura 25 -	Cargas hidráulicas iniciais, consideradas para o modelo	70
Figura 26 -	Fronteiras permeáveis, com cargas constantes para o modelo	71
Figura 27 -	Fontes de abastecimento de água observados, Povoado Quandú - AL	77
Figura 28 -	Residências por finalidade de uso e origem da água, Povoado Quandú – AL	80
Figura 29 -	Residências por animais criados, Povoado Quandú - AL	81
Figura 30 -	Tipos de destinação final, Povoado Quandú - AL	84
Figura 31 -	Tipos de águas residuárias por tipo de destinação final, Povoado Quandú - AL	84
Figura 32 -	Localização dos poços de bombeamento, na área de estudo	85
Figura 33 -	Exemplos de poços cacimbões construídos com blocos de cimento	87
Figura 34 -	Exemplos de poços cacimbões construídos com outros materiais	88
Figura 35 -	Variação temporal dos níveis de água e da precipitação, ao longo do ano de 2023, na área de estudo	89
Figura 36 -	Variação temporal dos níveis de água, ao longo do eixo longitudinal, na área de estudo	90
Figura 37 -	Perfil de sondagem do furo P1, na aluvião estudada, Rio Ipanema - AL	95
Figura 38 -	Perfil de sondagem do furo P2, na aluvião estudada, Rio Ipanema - AL	95

Figura 39 - Perfil de sondagem do furo P3, na aluvião estudada, Rio Ipanema - AL 96
Figura 40 - Seção litológica longitundinal da aluvião, no trecho estudado 96
Figura 41 - Triângulo textural do solo, baseado em USDA (1967), para o Ponto 1 98
Figura 42 - Curvas granulométricas, para as amostras do Ponto P1 99
Figura 43 - Triângulo textural do solo, baseado em USDA (1967), para o Ponto 2 100
Figura 44 - Curvas granulométricas, para as amostras do Ponto P2 101
Figura 45 - Triângulo textural do solo, baseado em USDA (1967), para o Ponto 3 102
Figura 46 - Curvas granulométricas, para as amostras do Ponto P3 103
Figura 47 - Valores simulados e observados para o Poço de Monitoramento 1 (PM-1) 108
Figura 48 - Valores simulados e observados para o Poço de Monitoramento 2 (PM-2) 109
Figura 49 - Valores simulados e observados para o Poço de Monitoramento 3 (PM-3) 110
Figura 50 - Variação temporal dos níveis de água e da precipitação, ao longo do ano de 2023, para os dados monitorados (linhas tracejadas) e calculados pelo modelo 112
Figura 51 - Mapa potenciométrico, cargas hidráulicas simuladas, período de 180 dias 113
Figura 52 - Mapa potenciométrico, cargas hidráulicas simuladas, período de 360 dias 113
Figura 53 - Série temporal da precipitação total anual do Posto 00937032 (1979-2023) 115
Figura 54 - Precipitação mensal média do Posto 00937032 (1979-2023) 116
Figura 55 - Desvio de precipitação mensal média, Posto 00937032, período 1979-2023 117

Figura 56 - Avaliação da eficiência operacional das fontes de abastecimento (número de parâmetros por classificação) 121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Exemplo de classificação dos parâmetros para avaliação operacional da gestão do abastecimento de água.	76
Quadro 2 -	Avaliação operacional da gestão compartilhada das fontes alternativas de abastecimento de água para a área de estudo	120
Quadro 3 -	Facilidades observadas para as fontes de abastecimentos para Povoado Quandú - AL	124
Quadro 4 -	Fragilidades observadas para as fontes de abastecimentos para Povoado Quandú - AL	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Coordenadas dos poços cacimbão monitorados, na aluvião do rio Ipanema - AL	55
Tabela 2 -	Profundidades dos pontos de realização da análise granulométrica	59
Tabela 3 -	Dados de precipitação do Posto 00937032, no ano de 2023	72
Tabela 4 -	Série histórica de precipitação do Posto 00937032	73
Tabela 5 -	Demanda doméstica de água da aluvião, Povoado Quandú – AL	82
Tabela 6 -	Estimativa da população de animais criados, Povoado Quandú – AL	82
Tabela 7 -	Demanda produtiva para a criação de animais, Povoado Quandú – AL	83
Tabela 8 -	Profundidade dos poços na aluvião, na área de estudo	86
Tabela 9 -	Diâmetros dos poços na aluvião, na área de estudo	87
Tabela 10 -	Qualidade da água na aluvião estudada, para os pontos analisados, em 28/02/2023	92
Tabela 11 -	Percentuais de areia, silte e argila no Ponto 1, aluvião do Rio Ipanema - AL	98
Tabela 12 -	Percentuais de areia, silte e argila no Ponto 2, aluvião do Rio Ipanema - AL	99
Tabela 13 -	Percentuais de areia, silte e argila no Ponto 3, aluvião do Rio Ipanema - AL	101
Tabela 14 -	Parâmetros para o cálculo da condutividade hidráulica para o Ponto 1	104
Tabela 15 -	Parâmetros para o cálculo da condutividade hidráulica para o Ponto 2	104
Tabela 16 -	Parâmetros para o cálculo da condutividade hidráulica para o Ponto 3	104
Tabela 17 -	Resultados da calibração do modelo de fluxo subterrâneo, para o PM-1	109

Tabela 18 - Resultados da calibração do modelo de fluxo subterrâneo, para o PM-2 110
Tabela 19 - Resultados da calibração do modelo de fluxo subterrâneo, para o PM-3 111
Tabela 20 - Balanço hídrico do modelo ao final dos 180 dias de simulação 114
Tabela 21 - Balanço hídrico do modelo ao final dos 360 dias de simulação 114
Tabela 22 - Balanço hídrico total do modelo após um ano de simulação 114
Tabela 23 - Potencial de captação mensal do Povoado Quandú, dados do Posto 00937032, série histórica 1979-2023 117
Tabela 24 - Demanda de água de chuva para os usos de lavagens, banho, beber e cozinhar 118
Tabela 25 - Volume captado *versus* demanda de água de chuva, para o Cenário 2 119

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 OBJETIVOS 22
1.1.1 Objetivo geral 22
1.1.2 Objetivos específicos 22
2 REFERENCIAL TEÓRICO 23
2.1 NORDESTE SEMIÁRIDO BRASILEIRO 23
2.2 ASPECTOS E FONTES ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO RURAL 25
2.3 AQUÍFERO ALUVIONAR 27
2.4 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MEIO SUBTERRÂNEO 28
2.4.1 Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos por meio de ensaios de campo 30
2.4.1.1 Teste de bombeamento e Slug Test 31
2.4.1.2 Ensaio de permeabilidade 32
2.4.1.3 Teste de Infiltração *33*
2.4.2 Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos por meio de equações semiempíricas 34
2.5 MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA 37
2.6 APLICAÇÃO DE MODELOS EM HIDROGEOLOGIA 39
2.6.1 Modelos de fluxo 42
3 MATERIAIS E MÉTODOS 47
3.1 ÁREA DE ESTUDO 47
3.2 LEVANTAMENTO DOS MANANCIAIS E USOS DA ÁGUA 52
3.3 LEVANTAMENTO DOS POÇOS DA ALUVIÃO 54
3.4 MONITORAMENTO DOS NÍVEIS DE ÁGUAS NOS POÇOS 55
3.5 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DA ALUVIÃO 56
3.6 ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DA ALUVIÃO 57
3.7 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DA ALUVIÃO 59
3.8 MODELAGEM DE FLUXO DA ALUVIÃO 64
3.8.1 Caracterização do modelo conceitual 65
3.8.2 Discretização do modelo 67
3.8.3 Modelagem do fluxo 73

3.9 VOLUME APROVEITÁVEL DA ÁGUA DE CHUVA PARA A ÁREA ESTUDADA 73
3.10 AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA PARA A GESTÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ÁGUA PARA A COMUNIDADE 75
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 77
4.1 FONTES DE ABASTECIMENTO, USO, DEMANDA E DESTINAÇÃO FINAL 77
4.1.1 Fontes de abastecimento alternativo 77
4.1.2 Finalidades de uso da água e demandas 79
4.1.3 Destinação final da água residuária 83
4.2 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS DA ALUVIÃO 85
4.3 MONITORAMENTO DOS NÍVEIS DE ÁGUAS DOS POÇOS 88
4.4 QUALIDADE DA ÁGUA DA ALUVIÃO 90
4.5 PROFUNDIDADE E PERFIL LOTOLÓGICO DA ALUVIÃO 94
4.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DA ALUVIÃO 97
4.6.1 Análise granulométrica 97
4.6.2 Parâmetros hidrodinâmicos 103
4.6.3 Reservas e potencialidade do aquífero aluvionar 106
4.7 MODELO DE FLUXO SUBTERRÂNEO DA ALUVIÃO, PARA O TRECHO ESTUDADO 107
4.8 VOLUME APROVEITÁVEL DA ÁGUA DE CHUVA PARA A ÁREA ESTUDADA 115
4.9 AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA PARA A GESTÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ÁGUA PARA A COMUNIDADE 120
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 127
5.1 RECOMENDAÇÕES 129
REFERÊNCIAS 131
APÊNDICE A – CADASTRO DOS MANANCIAIS E USOS DA ÁGUA 142
APÊNDICE B – PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DAS FONTES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ADAPTADO DE GARRIDO *ET AL.* (2016) 150
APÊNDICE C – FONTES DE ABASTECIMENTO, USO, DEMANDA E DESTINAÇÃO FINAL 151

1 INTRODUÇÃO

Ao passo em que a demanda pela água aumenta, a preservação da sua quantidade e qualidade se faz necessário para que o desenvolvimento sustentável se estabeleça. Os esforços para garantir o abastecimento de água para os seus múltiplos usos ainda não são, de forma global, suficientes. O desenvolvimento da agricultura e da indústria, e a diversificação dos usos múltiplos da água trouxeram novos tipos de apropriação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, produzindo conflito crescente entre os diversos usos da água ou a escassez de água (desequilíbrio entre disponibilidade e demanda) (Tundisi, 2014).

O Brasil apresenta uma disponibilidade hídrica privilegiada, que Segundo Costa e Cirilo (2011), possui mais da metade da água da América do Sul e 13,8 % do total mundial. Porém, há problemas como a má distribuição desses recursos, sendo afetado tanto pela escassez quanto pela abundância, bem como pela degradação por meio da poluição doméstica e industrial. A precipitação média anual (histórico de 1961-2007) no Brasil é de 1.761 mm, variando de valores na faixa de 500 mm, na região do Nordeste, a mais de 3000 mm, na região Amazônica (ANA, 2013), evidenciando a má distribuição do cenário nacional.

Sabendo que o Brasil tem 1.128.697 km² do seu território caracterizado como região semiárida, de acordo com Pernambuco (2020), e que grande parte está inserido no Nordeste, este é um dos lugares que mais sofrem com a problemática do pouco acesso à água. O Nordeste semiárido, segundo Montenegro *et al*. (2005), enfrenta cenários de secas com frequência, distribuição irregular de terras, como também pobreza rural. Sua precipitação anual é historicamente inferior à 800 mm, onde ocorre em um pequeno intervalo de tempo, em torno de quatro meses do ano (Moura *et al*., 2007). As frequentes secas limitam as atividades rurais, e todos esses aspectos contribuem para a migração em massa da população da região.

O abastecimento da população difusa, em geral, não ocorre, de maneira economicamente viável, por meio de medidas convencionais, como grandes adutoras. Assim, torna-se necessário encontrar alternativas para o melhor aproveitamento do potencial hídrico local, como a construção de cisternas para armazenamento de água das chuvas e o uso das águas acumuladas nas aluviões (Caetano *et al*., 2020), que são vales que acumulam sedimentos transportados pelas enxurradas, e assumem grande importância no contexto hídrico da região.

O conhecimento das demandas, tipos de usos e fontes alternativas de abastecimento de água de comunidades rurais são dados fundamentais que poderão auxiliar no gerenciamento desses recursos hídricos disponíveis.

Sendo uma alternativa para acesso à água, principalmente durante períodos de estiagem, os poços escavados em aluviões (Santos; Paiva; Silva, 2016) são utilizados sem que os usuários conheçam quanto o manancial pode oferecer, e como podem otimizar a conservação dessa água.

De acordo com Diniz (2015), as aluviões do Nordeste têm uma reserva hídrica total explorável de 5,4 bilhões de m³/ano, o que representa 20% de toda a água dos grandes açudes e demonstra sua importância estratégica. Santos (2009) ressalva a importância das aluviões dentro do semiárido para o suprimento de água das populações, principalmente pelas alternativas de uso que estes oferecem, tais como barragens subterrâneas, poços amazonas e/ou cacimbas, de modo a minimizar os impactos decorrentes das secas. Cabral *et al*. (2016), por meio de um estudo realizado na aluvião em um trecho do alto rio Capibaribe, para determinar suas características físico-hídricas, apontam que apesar do expressivo volume acumulado após as grandes enxurradas, o uso do aquífero aluvionar deve ser planejado com cuidado para evitar risco de superexploração.

Sendo assim, compreender como se comporta o fluxo nos depósitos aluvionares torna-se fundamental para a utilização desse recurso de forma consciente e para um planejamento estratégico. Uma ferramenta utilizada para estudar o meio subterrâneo e entender o seu comportamento é a criação de modelos matemáticos que possam representar o meio real, podendo objetivar a interpretação e previsão, como por exemplo, se haverá quantidade suficiente de água e se esta é de boa qualidade. Na criação desses modelos matemáticos é necessário a resolução de equações que regem o ambiente real representado, que geralmente são muito complexas e, para solucioná-las, faz-se uso de métodos numéricos. Paiva (2009) aponta que há vários métodos numéricos disponíveis, para solucionar as equações diferenciais parciais que governam o problema em questão: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF), Método de Elemento de Contorno (MEC), Método das Características, Modelos de Caminhamento Aleatório, Método de Diferenças Finitas Integradas, Método dos Volumes Finitos, Método dos

Elementos Analíticos, dos quais os mais conhecidos e mais usuais são os MDF e MEF.

A elaboração de modelos matemáticos de águas subterrâneas, é facilitado pela existência de diversos *softwares* disponíveis que resolvem as equações associadas (Santos *et al*., 2020). Para isto, são necessários dados de entradas para caracterizar o meio poroso a ser modelado e a definição dos cenários de simulação.

Nesse contexto, uma região que vem sofrendo com a escassez de água é o povoado Quandú, localizado na zona rural do município de Poço das Trincheiras em Alagoas, que está inserido na bacia do Rio Ipanema. A população faz uso da água armazenada na aluvião, que é usada para atividades domésticas, dessendentação de pequenas criações de animais e também para a agricultura familiar. Sendo assim, há necessidade de melhor caracterizar o gerenciamento do abastecimento alternativo de água da comunidade, podendo obter informações dos próprios morados sobre o uso das fontes hídricas disponíveis, para subsidiar a estimativa de consumo por domicílio. Também importante tentar compreender o funcionamento do escoamento e armazenamento na aluvião, o que pode ser desenvolvido por modelagem computacional de fluxo subterrâneo da aluvião em trecho do rio Ipanema, com informações prévias das características hidrogeológicas da aluvião.

O trabalho se justifica, pois contribui para a estimativa das demandas e ofertas de água para área de estudo, como também caracterizara os mananciais e tipos de usos dos recursos hídricos. Dessa forma, poderá ser uma ferramenta para auxiliar no planejamento de ações para o fortalecimento de políticas públicas para o desenvolvimento da área de estudo, podendo ser útil para nortear outras pesquisas em comunidades rurais que se assemelhem a mesma situação de vulnerabilidade à escassez hídrica.

A hipótese que norteia a pesquisa é a de que um aquífero em aluvião com adequada gestão pode atender às necessidades de água para as atividades domésticas e produtivas do pequeno agricultor rural no sertão Alagoano. Sendo necessário uma avaliação a partir da caracterização dos mananciais utilizados, no que diz respeito aos tipos de usos, qualidade da água, suas ofertas e demandas, podendo subsidiar a avaliação da gestão dessas fontes de abastecimento alternativos de água e propor melhorias para seus usos consciente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar, avaliar e propor melhorias na gestão do abastecimento alternativo de água em uma comunidade rural à margem de uma aluvião, em um trecho do rio Ipanema no sertão alagoano, por meio da realização de entrevistas à população e do auxílio de um modelo numérico de águas subterrâneas.

1.1.2 Objetivos específicos

a) Identificar os tipos de mananciais hídricos mais relevantes utilizados como fontes alternativas de abastecimento para a região;
b) Identificar as características de uso e finalidade de água da população local;
c) Analisar as ofertas e demandas dos mananciais utilizados pela comunidade;
d) Estimar os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero aluvionar da área de estudo;
e) Construir um modelo numérico de fluxo subterrâneo da área de estudo;
f) Avaliar e propor alternativas para o melhoramento da gestão das fontes alternativas de abastecimento de água, para comunidades difusas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

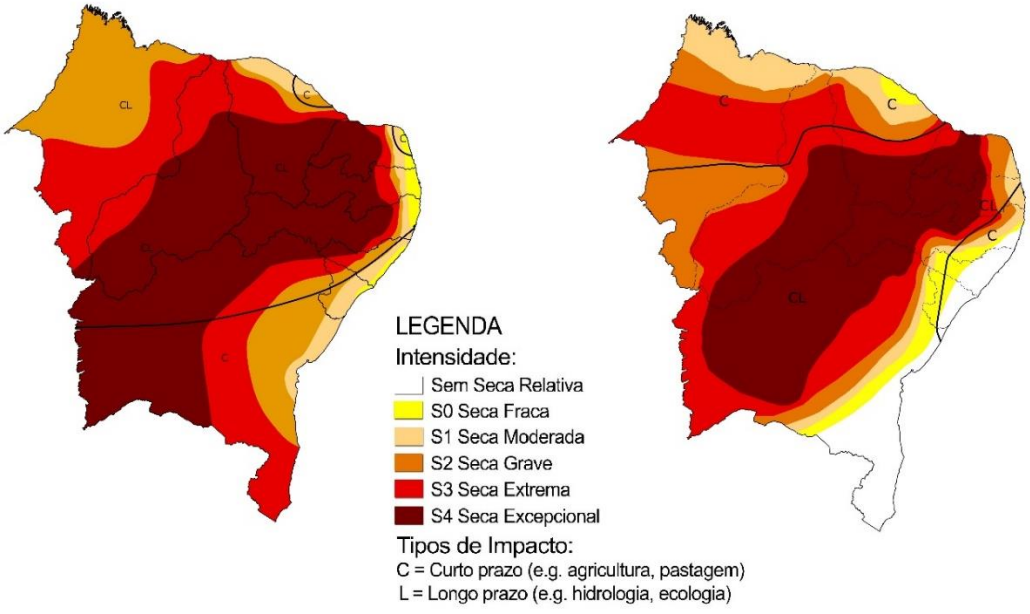
2.1 NORDESTE SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Segundo Cirilo (2010), o semiárido é uma região onde as precipitações médias anuais são entre 250 e 500 mm, a vegetação é composta prioritariamente por arbustos que perdem as folhas nos meses mais secos ou por pastagens que secam na época da estiagem.

Segundo Martins *et al.* (2018), a área central do Nordeste tem um clima semiárido com precipitação reduzida, em relação ao restante do Brasil, durante todas as estações. Diante disso, esta região vem sendo cada vez mais impactada pela escassez de água, e simultaneamente o crescimento econômico alavancado pelo setor agrícola que depende diretamente de água para irrigação (Silva; Figueiredo; Moraes, 2015).

No semiárido, é comum ocorrer secas cíclicas. Para auxiliar nesse cenário, a Agência Nacional de Águas (ANA), juntamente com os órgãos responsáveis pelos recursos hídricos dos estados nordestinos, realiza o monitoramento climático da região e divulga mensalmente o Mapa Monitor de Secas (ANA, 2023). A Figura 1 apresenta a evolução da seca nos anos de 2015 e 2017, e indica as zonas com diferentes graus de severidade e tipos de impacto.

Figura 1 - Situação climática da seca no Nordeste no mês de dezembro
(a) Ano: 2015 (b) Ano: 2017



Fonte: ANA (2023).

A perspectiva de aumento na frequência e duração de períodos secos tem gerado preocupação entre gestores de recursos naturais, agricultores, especialistas em desenvolvimento, pesquisadores e formuladores de políticas, tentando compreender até que ponto essas mudanças afetarão os recursos hídricos, a produção de alimentos, a renda e os meios de subsistência (Marengo *et al*., 2017). Para Martins *et al.* (2018), essa crise hídrica não é exclusivamente devido ao estado em evolução do sistema físico, mas também é agravada por vários problemas estruturais do sistema federal e estadual que afetam o monitoramento/previsão de secas, avaliação de vulnerabilidade, mitigação e planejamento de resposta. Tanto a exposição quanto a vulnerabilidade à crise permanecem elevadas e podem ser ainda mais intensificadas com a frequente falta de visão de longo prazo em decisões de curto e médio prazo.

Em localidades difusas, onde o sistema de abastecimento de água convencional não é viável, a situação piora, pois a população rural é submetida a outros meios de captação de água (cisternas, açudes, barreiros entre outros), que quase sempre na época de estiagem não são suficientes. Uma alternativa é o abastecimento dessas áreas, quando são próximas, pela exploração de água nas aluviões (Santos *et al*., 2024).

A aluvião é constituída principalmente por sedimentos, cascalho, areia e finos depositados no leito e nas margens de um sistema fluvial. No Nordeste brasileiro, esses depósitos aluviais formam importantes reservas de águas subterrâneas para as populações desenvolvidas nas margens dos cursos de água. Na porção semiárida dessa região, tais sedimentos são transportados no pequeno intervalo de tempo em que se concentram as chuvas. Além de transportar, a água das chuvas que chega até o leito do rio se infiltra na aluvião (Santos, 2017).

A região semiárida do Nordeste é pobre em volume de escoamento de água dos rios. Segundo Cirilo (2010), a situação se justifica em função da variabilidade temporal das precipitações e das características geológicas dominantes, onde predomina solos rasos baseados sobre rochas cristalinas e consequentemente baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente. Sendo assim, existe uma densa rede de rios temporários. Por outro lado, as reservas de água doce subterrânea nas bacias sedimentares do Nordeste permitem a captação anual de 20 bilhões de m^3 por ano, sem colocar em risco as reservas existentes (Rebouças, 1997 *apud* Cirilo, 2010).

Aguiar *et al.* (2019) apontam que nos últimos anos, fortes organizações sociais propõem o esforço na elaboração de políticas que visam alternativas para o convívio com a seca e para amenizar as desigualdades sociais, seja por meio de fontes alternativas de abastecimento, como o programa de criação de cisternas e medidas para captação de água, seja por financiamento para produtores rurais.

Para melhorar a situação do acesso aos recursos hídricos disponíveis na Região Nordeste, muito já se foi feito, como aponta Cirilo (2010) sobre as políticas públicas regionais, exemplificando com as construções de açudes e perfurações de poços ao longo dos anos, porém de forma mais abrangente ainda precisa-se avançar muito para o desenvolvimento sustentável dessa área. Além de suprir a demanda quantitativa e de qualidade por água, é necessário desenvolver políticas públicas mais assertivas voltadas para o gerenciamento de recursos hídricos, em comunidades rurais, de acordo com a realidade local.

2.2 ASPECTOS E FONTES ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO RURAL

A construção de infraestruturas de abastecimento de água tratada é fundamental para garantir o acesso à água segura e livre de contaminação. No entanto, em áreas rurais, é comum o uso de fontes alternativas, como poços, para atender às necessidades hídricas da população e suas atividades socioeconômicas (Silva, 2019). Segundo dados do censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010), a cobertura dos serviços de abastecimento de água no Brasil alcança cerca de 82,9% dos domicílios. A falta de acesso contínuo a fontes de água potável ainda é uma situação atual na realidade social brasileira, sendo especialmente crítico para os residentes na zona rural, em particular para aqueles núcleos dispersos e em situação de pobreza.

Os dados do IBGE (2015) revelam grandes discrepâncias na cobertura de abastecimento de água por meio de rede de canalização entre áreas urbanas e rurais, tanto em nível nacional quanto regional. Em termos nacionais, a cobertura de abastecimento de água por rede de canalização atinge 93,9% dos domicílios urbanos, enquanto apenas 34,5% dos domicílios rurais são atendidos. Em termos regionais, a região Nordeste apresenta uma cobertura de 92,5% dos domicílios urbanos, em comparação com apenas 42,7% dos domicílios rurais.

É evidente o papel preponderante da água dentro das políticas públicas, especialmente nas áreas rurais onde reside geralmente a população mais pobre e vulnerável. Nessas áreas, de acordo com Pineda (2013), o consumo de água, em grande parte sem tratamento, torna a instalação de sistemas de abastecimento de água um impacto significativo na qualidade de vida dos moradores. Os benefícios mais destacados dos sistemas de abastecimento de água incluem: a redução da morbidade de doenças transmitidas pela água e a liberação de recursos econômicos, já que as famílias são forçadas a comprar água, muitas vezes de qualidade duvidosa, por preços pouco acessíveis ou superiores aos que pagariam por um serviço de abastecimento de água.

Silva (2019) afirma que na área rural, a distribuição geográfica das comunidades é marcada pela grande dispersão espacial dos domicílios, o que torna inviável a implantação de infraestrutura de abastecimento, tornando as fontes alternativas de abastecimento as soluções mais adequadas para esse contexto.

As soluções alternativas são um tipo de abastecimento coletivo que busca fornecer água potável através da captação de mananciais subterrâneos ou superficiais, com ou sem uso de canalização e sem a existência de rede de distribuição (Brasil, 2017).

No Brasil, foram desenvolvidas ao longo dos anos políticas públicas regionais, como construção de açudes, podendo ser em grandes reservatórios com capacidade plurianual, ou em pequenos reservatórios chamados de barreiros. Porém, os altos índices de evaporação potencial trazem problemas para os pequenos reservatórios. A perfuração de poços também foi realizada ao longo dos anos e estima-se que cerca de 100.000 poços tenham sido perfurados no Nordeste (Cirilo *et al.*, 2010). Cirilo *et al.* (2010) afirmam ainda que outra solução bastante empregada é a cisterna, que é uma solução fundamental para o atendimento das necessidades mais essenciais da população rural difusa.

Entre as opções de tecnologias alternativas para fornecer água, uma das mais comuns é a utilização de sistemas de captação de água da chuva. Esse tipo de solução é implementado em locais onde o acesso a outras fontes de água é limitado, seja devido à distância entre as fontes e as residências, às condições climáticas locais ou à qualidade da água disponível. Essas tecnologias individuais também são uma

opção em locais onde a dispersão das residências dificulta a instalação de um sistema de abastecimento coletivo (Pineda, 2013).

A utilização de cisternas como meio de armazenamento de água da chuva tem sido comprovada como uma opção viável para atender aos desafios de acesso à água, sendo empregada em diversos países (Baguma; Loiskandl, 2010; Gomes, 2012; Domènech *et al*., 2012).

A utilização de poços para exploração dos mananciais subterrâneos vem sendo há muito tempo uma solução para o abastecimento. Quando se trata de comunidades rurais difusas, essa utilização tem grande importância devido às restrições de acesso ao sistema convencional. Poços profundos são bastantes utilizados de forma coletiva para exploração de mananciais subterrâneos, como também é comum a utilização de poços rasos como as cacimbas, cacimbões e poços amazonas que são perfurados no leito seco de rios intermitentes, e utilizados por comunidades próximas desses mananciais, os aquíferos aluvionares (Braga *et al.*, 2016).

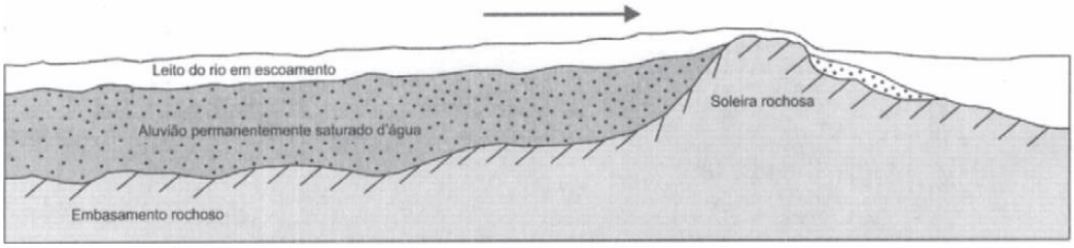
2.3 AQUÍFERO ALUVIONAR

A maioria dos rios que integram a rede hidrográfica do semiárido apresenta características intermitentes, ou seja, secam em determinadas épocas do ano devido à baixa pluviosidade, no entanto, alguns estados do nordeste são cortados por um dos rios mais importantes do país, o Rio São Francisco, que tem 80% de suas águas na região semiárida (Henig, 2023). Durante o restante do ano, esses cursos d'água intermitentes secam, e a água deixa de correr na superfície de seus leitos, resultando em um pequeno filete de água que serpenteia pela superfície (Braga, 2016). Ainda segundo Braga (2016), quando ocorrem enxurradas, é comum que cascalhos, argilas e areias sejam arrastados para o leito dos rios com diferentes intensidades, dependendo da quantidade de chuva, do relevo e da disponibilidade desses materiais no solo. Após as chuvas, grande parte desses sedimentos permanece no leito, formando as chamadas areias de aluvião, que são, por vezes, utilizadas na construção civil.

Ao longo das drenagens do substrato rochoso, é possível encontrar depósitos sedimentares de origem fluvial, compostos por areia e argila, conhecidos como aluviões (Figura 2). Esses depósitos apresentam boas condições para a recarga (infiltração), armazenamento e fluxo das águas subterrâneas, o que os torna aquíferos

com potencial hidrogeológico favorável. Na região semiárida, técnicas como a construção de barragens subterrâneas são empregadas para aumentar a disponibilidade de água nesse ambiente (Martins *et al.*, 2007).

Figura 2 - Corte longitudinal do embasamento rochoso, com o aquífero aluvionar



Fonte: CONSEMA (2013).

De acordo com Diniz (2015), as aluviões do Nordeste têm uma reserva hídrica total explorável de 5,4 bilhões de m³/ano, o que representa 20% de toda a água dos grandes açudes e demonstra sua importância estratégica. O autor também afirma que os açudes com mais de 100 milhões de m³ no Nordeste têm capacidade para armazenar 21 bilhões de m³ de água. Santos (2009) ressalva a importância das aluviões dentro do semiárido para o suprimento de água das populações, principalmente pelas alternativas de uso que estes oferecem, tais como barragens subterrâneas, poços amazonas e/ou cacimbas, de modo a minimizar os impactos decorrentes das secas.

Diante disso, para conhecer a capacidade de armazenamento do aquífero aluvionar, como também a disponibilidade do recurso hídrico para abastecimento, é necessário realizar uma caracterização do solo e determinar os parâmetros hidrodinâmicos que regem o fluxo subterrâneo.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MEIO SUBTERRÂNEO

O movimento da água em meios porosos a um nível microscópio pode ser muito complexo. Por meio de experimentos, Darcy mostrou que existe uma relação entre o fluxo de água que atravessa uma camada de areia e o gradiente hidráulico, introduzindo o conceito de condutividade hidráulica, sendo uma propriedade macroscópica do meio (Freeze; Cherry, 2017). A partir daí, é possível aplicar os

princípios da hidrodinâmica, os quais consideram o meio como um contínuo, com propriedades bem definidas, incluindo três parâmetros fundamentais: porosidade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento (Feitosa *et al.*, 2008). Darcy propôs a lei que pode ser expressa pela Equação 1.

$$Q = KA\frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (1)$$

Onde,

K: condutividade hidráulica [LT^{-1}];

A: área da seção transversal [L^2];

$(h_1\text{-}h_2)$ = Δh: diferença de cargas hidráulicas [L];

L: distância entre os pontos a ser medida [L].

Pode-se chamar de gradiente hidráulico a diferença de carga hidráulica $(h_1\text{-}h_2)$ dividida pela distância L, que pode ser entendido como a taxa de perda de carga por unidade de trajeto do fluido. Ao aplicar essa expressão na zona de transição entre o corpo d'água superficial e subterrâneo, é possível medir o fluxo que ocorre entre eles.

A condutividade hidráulica K, presente na lei de Darcy, representa a capacidade de um aquífero em transmitir água e está relacionada às propriedades do meio, tais como a porosidade, o tamanho, a distribuição, a forma e o arranjo dos grãos, bem como às propriedades do fluido que flui, como a viscosidade e a massa específica (Feitosa *et al*., 2008). Ela pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido pela Equação 2:

$$K = \frac{kg}{\nu} \quad (2)$$

Onde,

K = condutividade hidráulica [LT^{-1}];

k = permeabilidade intrínseca do meio poroso [L^2];

ν = viscosidade cinemática [L^2T^{-1}];

g = aceleração da gravidade [LT^{-2}].

A densidade e a viscosidade da água são dependentes da temperatura, sendo assim a condutividade hidráulica (K) também varia com a temperatura.

A porosidade total, também conhecida como porosidade simplesmente (η), é uma grandeza adimensional que representa a relação entre o volume dos vazios (V_v)

e o volume total (V) de uma amostra específica (Equação 3), podendo ser expressa como porcentagem. Ela é determinada pelo tamanho, distribuição e forma dos grãos, rugosidade superficial e tipo de arranjo.

$$\eta = \frac{V_V}{V} \tag{3}$$

A porosidade efetiva (η_e), assim como a porosidade total, é uma grandeza adimensional. Ela é definida como a relação entre o volume de água liberado (V_D) por uma amostra de rocha ou solo poroso saturado e o volume total (Equação 4).

$$\eta_e = \frac{V_D}{V} \tag{4}$$

A quantidade de água retida por unidade de volume é chamada de retenção específica (R_e), onde a soma da porosidade efetiva e a retenção específica é igual a porosidade total.

O armazenamento específico (S_s) de um meio poroso saturado é definido como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero quando submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica (Equação 5).

$$S_S = \frac{\delta V_{liberado}}{V \delta h} \tag{5}$$

Onde,

$V_{liberado}$ = volume de água liberado [L³];

V = volume do meio poroso [L³];

h = Carga hidráulica [L];

δ = indica uma pequena variação.

O coeficiente de armazenamento (S) é um parâmetro adimensional definido como a multiplicação do armazenamento específico pela espessura do aquífero.

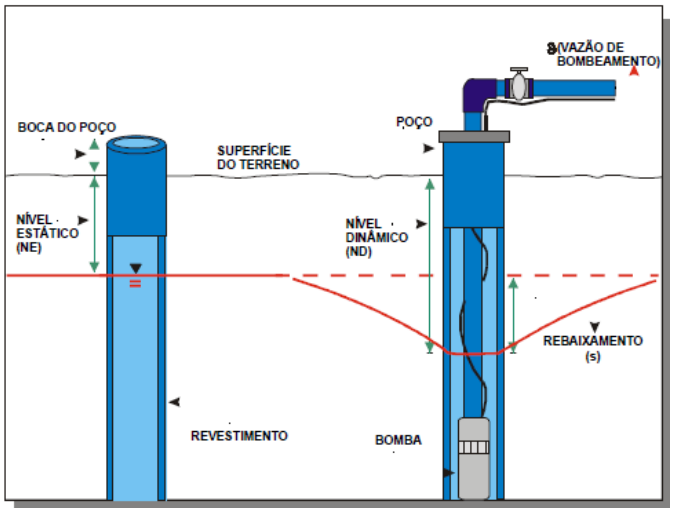
2.4.1 Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos por meio de ensaios de campo

2.4.1.1 Teste de bombeamento e Slug Test

De acordo com Pfannkuch *et al*. (2021), para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos são usados testes que interpretam o rebaixamento em poços ao longo do tempo em resposta a um estresse imposto ao meio poroso. Esses testes são a forma de mais fácil aplicação e maior garantia em seus resultados, além de ser a ferramenta indispensável para a determinação de vazões de explotação de poços.

Um teste de bombeamento envolve retirar volumes específicos de água de um poço de produção em um intervalo de tempo determinado, enquanto se mede a queda do nível da água em poços de observação. Quando há ausência de poços de observações, os rebaixamentos podem ser verificados no próprio poço de produção. A configuração e as variáveis envolvidas nesse teste são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Configuração e variáveis de um teste de bombeamento



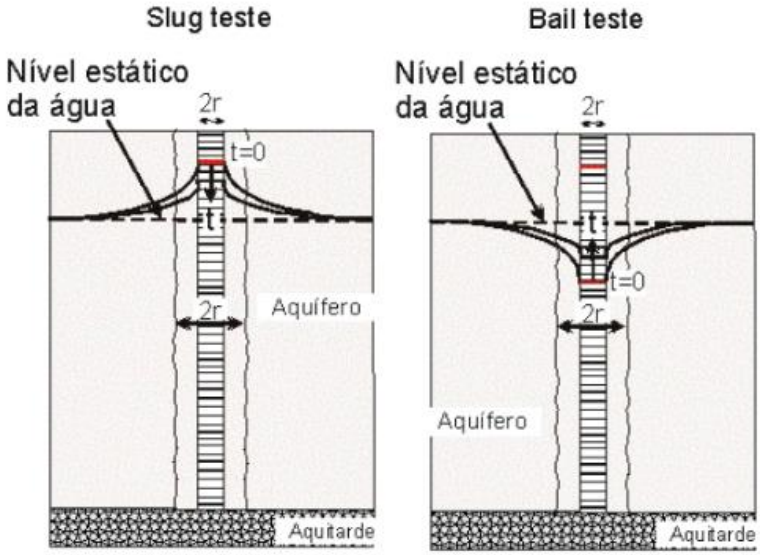
Fonte: Feitosa e Costa Filho (1998).

O *Slug Test* é um dos ensaios que vem sendo mais amplamente utilizados em todo o mundo para determinar a condutividade hidráulica de um aquífero. Esse teste envolve a introdução de um volume conhecido de água em um poço de monitoramento e a observação da recuperação do nível estático e do tempo associado a esse processo.

Segundo Fiori (2010), o *Slug Test* é frequentemente combinado com outro ensaio, o *Bail Test*. Esse último consiste em retirar abruptamente um volume conhecido de água do poço em análise, o que causa um rebaixamento no nível

estático. Em seguida, é possível observar o tempo de recuperação desse nível, permitindo a determinação da condutividade hidráulica. A Figura 4 ilustra os ensaios de *Slug Test* e *Bail Test*.

Figura 4 - Configuração dos ensaios *Slug Test* e *Bail Test*



Fonte: Fiori (2010).

Para Carvalho *et al*. (2013), esses dois últimos ensaios apresentam algumas vantagens: a) por ser simples, b) ser o mais utilizado para determinação da condutividade hidráulica em todo o mundo, c) apresentar resultados compatíveis com outros testes, d) não inserir ou extrair água significantes, e e) não utilizar equipamentos de bombeamento. No entanto, apresentam desvantagens por avaliar um raio de 1 m ao redor do poço; não determina o coeficiente de armazenamento.

2.4.1.2 Ensaio de permeabilidade

Existem dois tipos de equipamentos laboratoriais utilizados para determinar a condutividade hidráulica saturada de uma amostra de solo: o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga variável (Freeze; Cherry, 2017).

No teste de permeabilidade de carga constante, uma amostra de solo com comprimento L e área de seção transversal A é colocada entre duas chapas porosas em um tubo cilíndrico. Em seguida, uma carga constante H é aplicada à amostra através do tubo. De forma simples, é aplicada a Lei de Darcy que conduz à Equação 6, onde Q é a vazão volumétrica estabilizada através do sistema.

$$K = \frac{QL}{AH} \quad (6)$$

O método descrito acima, é normatizado pela NBR 13292 (ABNT, 2021). A aplicação deste método é restrita a solos granulares, contendo no máximo 10% em massa, de material que passa na peneira de 0,075 mm.

Já no teste de permeabilidade de carga variável, a carga aplicada a uma amostra de solo com área de seção transversal, faz variá-la de H_0 a H_1 ao longo de um tempo t. A condutividade hidráulica é calculada usando a Equação 7.

$$K = \frac{aL}{AT}\ln(\frac{H_0}{H_1}) \quad (7)$$

Para esse teste pode ser utilizado corpo de prova talhado ou moldado, obtidos, respectivamente, a partir de amostras indeformadas ou da compactação de amostras deformadas, cujos coeficientes de permeabilidade sejam menores do que 10^{-5} m/s, sendo a NBR 14545 (ABNT, 2021) utilizada para padronização do ensaio.

2.4.1.3 Teste de Infiltração

Segundo Vasconcelos (2015), a infiltração é compreendida como o processo inicial da entrada de água no solo, diante da aplicação na superfície do solo, ocorrendo por chuvas ou por irrigação, sendo a capilaridade é dominante nessa fase. A ocorrência desse fenômeno depende essencialmente da quantidade de água disponível para a infiltração, das características físicas do solo (em especial sua textura e estrutura) das condições da superfície do solo, da temperatura e das quantidades iniciais de água e ar presentes no seu interior.

As estimativas dos parâmetros hidrodinâmicos a partir de modelos simplificados da infiltração da água no solo podem ser determinados através de métodos unidimensionais e tridimensionais. O conhecimento do processo de infiltração é essencial para a solução de problemas relativos as áreas de conservação da água e do solo, armazenamento de água subterrânea, irrigação e drenagem, e controle do deflúvio superficial (Santos, 2017).

Um dos métodos mais utilizados para determinar a capacidade de infiltração unidimensional é o infiltrômetro dos duplos anéis concêntricos. Esse método envolve o uso de dois anéis colocados concentricamente, com o menor tendo um diâmetro de

25 cm e o maior com 50 cm, ambos com altura de 30 cm. No entanto, as dimensões podem variar dependendo do fabricante.

Os dois anéis são instalados concentricamente e enterrados 15 cm no solo, onde se adiciona, em ambos, uma lâmina d'água que deve ser mantida até o fim do ensaio (Figura 3), e a leitura da variação da lâmina é realizada no cilindro interno. Neste tipo de experimento, ocorre o estabelecimento de uma carga hidráulica constante sobre a superfície do solo nos dois anéis (interno e externo). Segundo Fernandes (2011), a finalidade do cilindro externo é manter verticalmente o fluxo de água do cilindro interno, reduzindo assim o efeito da dispersão lateral da água infiltrada do anel interno e evitando a superestimava da taxa de infiltração.

O uso do infiltrômetro de anel simples permite a realização de ensaios de infiltração tridimensional axissimétrica em função do tempo, possibilitando o estudo *in situ* do fenômeno de infiltração de água no solo sob diferentes sucções. Ele consiste de um cilindro metálico, sem as bases, de raio conhecido. O fluxo de água obtido por um infiltrômetro a disco é considerado como tridimensional (Souza, 2005). Para estimar os parâmetros das curvas de retenção da água no solo θ(h) e condutividade hidráulica K(θ) considerando a textura e a estrutura do solo, pode ser utilizado o método semifísico, denominado "*Beerkan"* (Haverkamp *et al*., 1998; Lassabatère *et al*., 2006).

2.4.2 Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos por meio de equações semiempíricas

Apesar dos métodos de campo existentes para determinações da condutividade hidráulica, a precisão na estimativa desse parâmetro por meios desses ensaios é limitada pela falta de conhecimento preciso da geometria do aquífero e dos limites hidráulicos (Uma; Egboka; Onuoha, 1989). Além disso, o custo das operações de campo e a construção de poços associados podem ser elevados. Por outro lado, os ensaios laboratoriais enfrentam desafios significativos na obtenção de amostras representativas e frequentemente exigem longos tempos de teste. Como alternativa, foram desenvolvidos e utilizados métodos de estimativa da condutividade hidráulica com base em fórmulas empíricas, que se baseiam nas características da distribuição granulométrica. Esses métodos granulométricos são comparativamente mais

acessíveis em termos de custo e não requerem informações detalhadas sobre a geometria e os limites hidráulicos do aquífero (Odong, 2008).

Vários pesquisadores investigaram essa relação e propuseram diversas fórmulas com base em trabalhos experimentais. Kozeny (1927) propôs uma fórmula que foi posteriormente modificada por Carman (1937, 1956) para se tornar a equação de Kozeny-Carman. Outras contribuições foram feitas por Hazen (1892), Terzaghi e Peck (1964), Shepherd (1989), e Alyamani e Sen (1993). A aplicabilidade dessas fórmulas varia conforme o tipo de solo para o qual se pretende estimar a condutividade hidráulica. No entanto, poucas fórmulas oferecem estimativas confiáveis devido à dificuldade de incorporar todas as variáveis possíveis em meios porosos (Odong, 2008).

A maioria das equações empíricas dependem da porosidade total do solo. Vukovic e Soro (1992) apontam que a porosidade (n) pode ser obtida empiricamente a partir da relação com o coeficiente de uniformidade de grãos (Cu) conforme a Equação 8.

$$n = 0{,}255(1 + 0{,}83^{Cu}) \tag{8}$$

O método de Hazen (1892) foi originalmente desenvolvida para determinação da condutividade hidráulica (Equação 9) de areia uniformemente graduada, mas também é útil para areia fina a cascalho, desde que o sedimento tenha um coeficiente de uniformidade inferior a 5 e tamanho efetivo de grão entre 0,1 e 3 mm.

$$K = \frac{g}{v} 6\text{x}10^{-4}[1 + 10(n - 0{,}26)]\text{d}_{10}^2) \tag{9}$$

onde K = condutividade hidráulica [L/T]; g = aceleração devido à gravidade [L/T^2]; *v* = viscosidade cinemática [L^2/T]; d_{10} = diâmetro efetivo do grão [L].

A equação de Kozeny-Carman (Equação 10) representa uma das formulações de condutividade hidráulica mais amplamente reconhecidas e aplicadas, em função das características do solo (Odong, 2008). Originalmente proposta por Kozeny (1927), foi posteriormente modificada por Carman (1937, 1956) para se tornar a equação de Kozeny-Carman. No entanto, essa equação não é adequada para solos com tamanho efetivo acima de 3 mm nem para solos argilosos (Carrier, 2003).

$$K = \frac{g}{v} 8{,}3\text{x}10^{-3} [\frac{n^3}{(1-n)^2}] \text{d}_{10}^2 \quad (10)$$

Beyer (1966) propôs um método que não leva em consideração a porosidade, portanto, a função de porosidade assume o valor 1. A fórmula de Beyer (Equação 11) é frequentemente considerada mais útil para materiais com distribuições heterogêneas e grãos mal classificados, com um coeficiente de uniformidade entre 1 e 20 e um tamanho efetivo de grão entre 0,06 mm e 0,6 mm.

$$K = \frac{g}{v} 6\text{x}10^{-4} \log\left(\frac{500}{Cu}\right) \text{d}_{10}^2 \quad (11)$$

A Equação 12, proposta por Slichter (Slichter, 1898) foi determinada após múltiplos experimentos de laboratório, com água movendo-se através de solos ou rochas porosas sob diferentes pressões. Algumas pesquisas (Vukovic; Soro, 1992; Cheng; Chen, 2007; Odong, 2008) testaram essa fórmula com diferentes materiais, e seus resultados indicam que ela é mais confiável em amostras de areia com tamanhos de grão entre 0,01 e 5 mm, sem restrições quanto ao coeficiente de uniformidade do meio granular.

$$K = \frac{g}{v} 1\text{x}10^{-2} n^{3{,}287} \text{d}_{10}^2 \quad (12)$$

Conforme resumido em Vukovic e Soro (1992), o Bureau de Reclamação dos Estados Unidos (USBR), em colaboração com vários cientistas, desenvolveu uma fórmula (Equação 13) para a condutividade hidráulica de solos compostos por areias de grão médio e coeficientes de uniformidade inferiores a cinco (USBR, 1978). Algumas pesquisas indicam que o USBR tende a subestimar as condutividades (Odong, 2008; Salarashayeri; Siosemarde, 2012).

$$K = \frac{g}{v} 4{,}8\text{x}10^{-4} \text{d}_{20}^{0{,}3} \text{d}_{20}^2 \quad (13)$$

Aqui, d_{20} na fórmula representam o diâmetro do grão em para os quais, 20% da amostra são mais finos do que esse diâmetro.

A equação de Terzaghi (Equação 14) conforme apresentada por Vukovic e Soro (1992), inclui a forma dos grãos e a graduação dos sedimentos por meio de uma constante empírica Ct, que assume um valor de 0,0061 para areias mais grossas e 0,107 para grãos lisos (Vukovic; Soro, 1992).

$$K = \frac{g}{v} C_t \left(\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2 \mathrm{d}_{10}^2 \quad (14)$$

O método apresentado por Alyamani e Sen (1993) também requer uma análise granulométrica, pois depende dos valores de D_{10} e D_{50} (diâmetro médio das partículas), além da variável I_0, que é a interseção de D_{10} e D_{50} no eixo das abcissas, em milímetros (Equação 15). De acordo com Santos *et al.* (2016), este ponto assume valores próximos de zero ou de D_{10}, refletindo a finura do solo, onde um valor maior de I_0 indica um solo mais grosso e, consequentemente, mais permeável.

$$K = 1300\mathrm{x}(\mathrm{I}_0 + 0{,}025(D_{50} - D_{10}))^2 \quad (15)$$

Odong (2008), objetivando avaliar a aplicabilidade e confiabilidade de alguns das fórmulas empíricas comumente usadas para a determinação da condutividade hidráulica de solos, concluiu que: a estimativa da condutividade hidráulica dos solos em termos de características granulométricas pode levar a uma subestimação ou superestimação relativa, a menos que o método apropriado seja utilizado; para as amostras estudadas e, possivelmente para uma ampla gama de tipos de solo, a melhor estimativa geral de permeabilidade é alcançada com base na fórmula de Kozeny-Carman, seguida pela fórmula de Hazen; a fórmula de Beyer é a melhor para a estimativa de amostras de solo altamente heterogêneas; as fórmulas de Slichter, USBR e Terzaghi subestimaram grosseiramente as condutividades hidráulicas em comparação com as outras fórmulas avaliadas; a fórmula de Alyamani e Sen é muito sensível à forma da curva granulométrica e, deve ser usada com cuidado.

2.5 MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea é um recurso limitado e precioso que está sujeito à intervenção humana, tornando-o vulnerável à poluição e à superexploração, os quais são os principais problemas associados a esse recurso. A gestão sustentável das águas subterrâneas envolve medidas quantitativas e um monitoramento qualitativo

para garantir a proteção desse recurso precioso, sendo esse um passo fundamental para alcançar a sustentabilidade (Wu *et al*., 2017). Para Feitosa *et al.* (2008), vários obstáculos são enfrentados para o planejamento de um programa de monitoramento, de ordens conceituais, técnica e financeira, causados pela falta de dados e pela heterogeneidade dos meios aquíferos.

As redes de monitoramento devem ter características próprias e adequadas visando os objetivos destinados. O custo de sua implantação é relativamente alto, e precisa ser otimizado. De forma geral, se desenha uma rede de monitoramento preliminar que evolui para uma rede permanente e operativa. As principais dificuldades técnicas estão associadas à heterogeneidade hidráulica do aquífero, ao posicionamento dos poços de observações em relação ao fluxo, às técnicas e análise da água, e ao custo envolvido (Feitosa *et al.*, 2008).

Devido a essa situação, instituições de gestão de água e centros de pesquisa recentemente demonstraram crescente interesse no desenvolvimento de metodologias para o projeto de redes de monitoramento ideais para obter altos níveis de informação com um investimento econômico mínimo (Rau *et al*., 2020).

Pode-se ter dois tipos de monitoramento: quantitativo e qualitativo. O primeiro consiste nas medidas dos níveis de água pelo menos uma vez por mês, podendo objetivar o acompanhamento e a recuperação de rebaixamentos e para determinar limites de explotação, como também ajudar na modelagem conceitual e numérica do aquífero. O segundo é voltado para o controle, diagnóstico e prognóstico do risco de contaminação.

Na fase de estruturação do projeto de monitoramento, é indispensável a definição clara dos objetivos e definir: o que monitorar (meta); quem irá monitorar (responsável); quais os parâmetros de controle (atividade e meio hidroquímico); onde (local); quando e com que frequência aferir as medidas (prazo); com qual tecnologia deve-se medir (métodos) (Feitosa *et al*., 2008).

Para lidar com o grande volume de dados gerados pelo monitoramento das águas subterrâneas, é fundamental contar com sistemas eficientes de armazenamento e disponibilidade desses dados. O sistema de informações utilizado deve permitir a coleta, tratamento, armazenamento, recuperação e disponibilidade de informações precisas sobre a qualidade e quantidade da água subterrânea, bem como os fatores que influenciam na sua gestão.

2.6 APLICAÇÃO DE MODELOS EM HIDROGEOLOGIA

Santos *et al*. (2020) apontam que para planejar atividades relacionadas ao uso, controle e conservação da quantidade e qualidade da água subterrânea, é fundamental compreender o movimento da água no solo. Isso permite uma abordagem mais eficaz na gestão desse recurso, levando em consideração fatores como a recarga de aquíferos e a contaminação da água subterrânea.

Entretanto, resolver condições complexas de fluxo com modelos analíticos pode ser trabalhoso e demandar muito tempo, como os problemas que envolvem equações diferenciais parciais mais difíceis, exemplo destes, é o caso da equação que rege o fluxo subterrâneo, sendo comum o uso de ferramentas computacionais para sua resolução.

A análise numérica e computacional é uma área da matemática onde se encontram vários métodos para se determinar, exata ou aproximadamente, soluções numéricas de problemas modelados matematicamente. Os modelos computacionais auxiliam a sistematizar a informação de campo, e a detectar locais onde é necessário um maior estudo. E fornecem subsídios para fazer previsões sobre consequências das ações a serem realizadas nos recursos hidrogeológicos (Feitosa *et al*., 2008).

Os modelos utilizados na hidrogeologia são comumente categorizados em modelos de fluxo e modelos de transporte de massa. Os modelos de fluxo são empregados para simular o movimento da água, considerando os fluxos naturais do aquífero, as recargas e as extrações de água realizadas. Já os modelos de transporte na água subterrânea vêm sendo muito utilizados para propagação de poluentes, análise de opções de remediação e previsão de cenários de risco do transporte de contaminantes (Paiva, 2009).

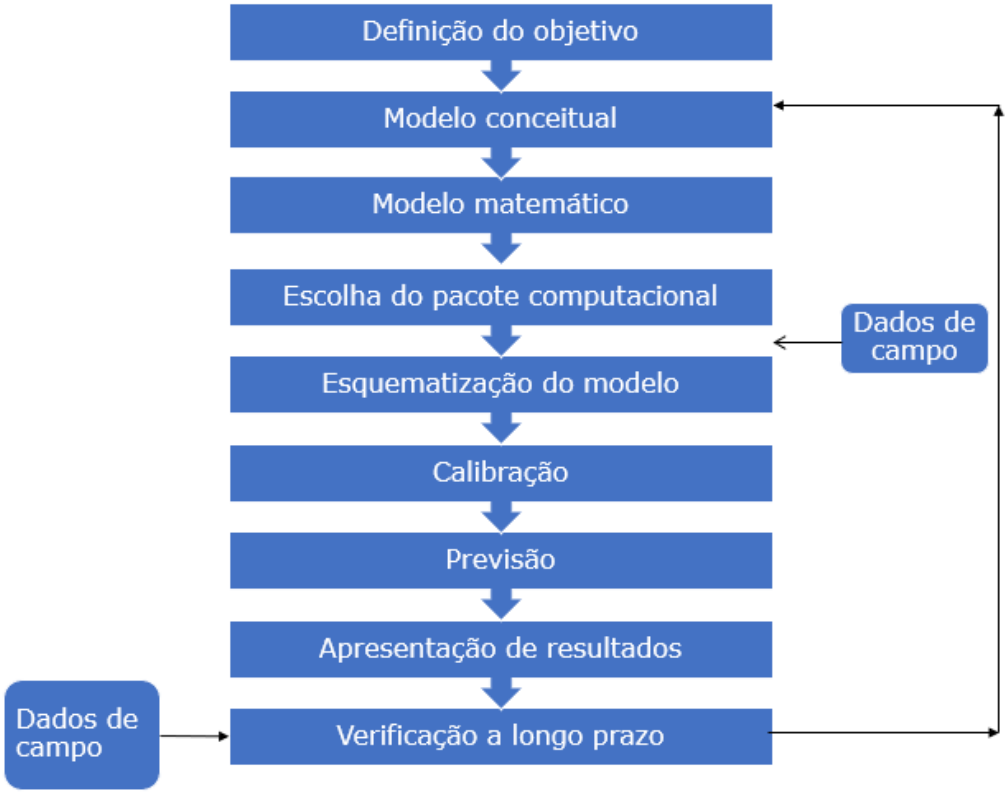
Os modelos matemáticos podem ser divididos em analíticos e numéricos, os primeiros apresentam uma solução exata do problema, ao contrário dos modelos numéricos em que a solução é aproximada (Safre, 2018). Um exemplo de modelo analítico, é um bombeamento transiente em um aquífero homogêneo e isotrópico. Porém, na maior parte das vezes os aquíferos não são homogêneos e seus contornos não são polígonos retangulares, de modo que fica quase impossível obter uma solução analítica. Desse modo, surgiram então os métodos numéricos, em que as equações são resolvidas utilizando técnicas de aproximações numéricas. Segundo Feitosa *et al*. (2008), os modelos matemáticos podem ser classificados também

quanto: à variação no tempo (permanente ou transiente); às probabilidades de ocorrência (determinístico ou estocástico); e às equações (lineares e não-lineares).

É fundamental ter visão dos objetivos que se pretendem com os modelos. Normalmente, os objetivos são de previsão e de interpretação. No primeiro caso, o modelo é utilizado para prever o comportamento do aquífero devido à determinadas ações, e no segundo, procura-se estender o seu funcionamento e sistematizar as informações.

De acordo com Safre (2018), alguns autores como Bear (1972), Anderson e Woessner (1992), Spitz e Moreno (1996) e Kresic (1997) definiram metodologias, nas quais algumas etapas (Figura 5) são envolvidas na modelagem do aquífero, onde a simulação computacional é apenas um dos passos, conforme Figura 5, e descrito com maiores detalhes após.

Figura 5 - Etapas para a modelagem computacional



Fonte: Adaptado de Feitosa *et al*. (2008).

- Modelo conceitual: ao elaborar, busca-se determinar a geometria do sistema, incluindo suas camadas geológicas, contornos, interconexões hidráulicas, recargas e bombeamentos.

- Modelo matemático e escolha do modelo computacional: definir a formulação matemática do problema, e após é necessário selecionar o pacote computacional a ser utilizado. Há diversos pacotes disponíveis no mercado que possuem interação fácil com o usuário.
- Esquematização do modelo: inclui as atividades de escolher como discretizar o problema, selecionar o intervalo de tempo para simulação, definir as condições de contorno, selecionar os parâmetros iniciais do aquífero e verificar as recargas e bombeamentos.
- Calibração: consiste no ajuste dos parâmetros do modelo para reproduzir as cargas hidráulicas e fluxos observados em campo.
- Dados de campo: os dados de campo, como é o caso de medições dos níveis de água ao longo de vários anos, auxilia na calibração do modelo.
- Previsão: fornece a resposta para compreender o funcionamento do sistema aquífero sujeito a futuros bombeamentos e recargas.
- Verificação em longo prazo: é crucial continuar monitorando os aquíferos e realizando simulações ao longo do tempo à medida que novos dados de campo são obtidos, a fim de corrigir as modelagens anteriores.

Para resolver a equação geral do fluxo subterrâneo, é necessário conhecer as condições de contorno, e para o caso transiente é necessário também conhecer as condições iniciais. A determinação das condições de contorno é um passo crítico, pois uma má determinação pode levar a sérios erros na solução do problema (Feitosa *et al*., 2008). Essas condições podem ser do tipo físico, quando existem características físicas quem influenciam o escoamento, ou hidráulico, quando é formado devido às condições do escoamento.

Há vários métodos numéricos disponíveis para solucionar as equações diferenciais parciais que governam o problema em questão: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF), Método de Elemento de Contorno (MEC), Método das Características, Modelos de Caminhamento Aleatório, Método de Diferenças Finitas Integradas, Método dos Volumes Finitos, Método dos Elementos Analíticos, dos quais os mais conhecidos e mais usuais são os MDF e MEF. Embora os programas computacionais resolvam bem as equações, contudo, é necessário ter um bom entendimento do modelo para evitar erros devido à utilização inadequada.

O MDF, método amplamente utilizado atualmente, é o mais antigo dentre os métodos existentes. Ele se baseia na aproximação das derivadas parciais presentes nas equações matemáticas em expressões algébricas discretas em pontos específicos do modelo, denominados de nós (Santos, 2017). A seleção desses nós é chamada de discretização do modelo e cada nó representa uma porção limitada do aquífero, com atribuição constante de parâmetros para a região que ele representa (quadrícula). Quanto maior o número de pontos, mais próximo do modelo real será a representação e, consequentemente, maior desempenho será exigido do software utilizado no desenvolvimento do modelo.

2.6.1 Modelos de fluxo

Para avaliar os recursos hídricos nos meios porosos é essencial o conhecimento do comportamento, direções e velocidades do fluxo subterrâneo. As equações que governam o fluxo no meio subterrâneo estão representadas pela lei proposta por Henry Darcy (Equação 16), considerando o meio poroso e isotrópico e que a descarga não varia no tempo (Feitosa *et al.*, 2008).

$$q = \frac{Q}{A} = K\frac{(h_1 - h_2)}{L} \tag{16}$$

Onde,

q: velocidade de Darcy [L/T];

Q: vazão específica [L^3/T];

K: condutividade hidráulica [L/T];

A: área da seção transversal [L^2];

$(h_1\text{-}h_2)$ = Δh: diferença de cargas hidráulicas [L];

L: distância entre os pontos a serem medidos [L].

Pode-se chamar de gradiente hidráulico a diferença de carga hidráulica $(h_1\text{-}h_2)$ dividida pela distância L, o qual é entendida como a taxa de perda de carga por unidade de trajeto do fluido. Aplicando esta expressão na zona de transição do corpo d'água superficial e subterrâneo, pode-se medir o fluxo entre eles.

É possível expressar a lei de Darcy na forma diferencial (Equação 17):

$$q = -K\frac{\partial h}{\partial L} \tag{17}$$

O sinal negativo indica que o fluxo da água ocorre no sentido dos potenciais decrescentes. A lei de Darcy para o escoamento tridimensional pode ser representada pela Equação 18.

$$q_x = -K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\ ;\ q_y = -K_{xx}\frac{\partial h}{\partial y}\ ;\ q_z = -K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z} \tag{18}$$

Utilizando as derivadas parciais, tem-se agora o vetor velocidade de Darcy (Equação 19):

$$q = -K\left(\frac{\partial h}{\partial x}i + \frac{\partial h}{\partial y}j + \frac{\partial h}{\partial z}k\right) \tag{19}$$

Considerando a condição estacionária, em que a carga não varia com o tempo, é possível desenvolver equações que descrevem o fluxo subterrâneo utilizando a lei da conservação de massa ou o princípio da continuidade. Esta lei afirma que não há variação de massa do fluido em um pequeno volume conhecido como Volume Elementar Representativo (VER). O volume que entra no VER é igual ao que sai.

Assumindo que o fluido é incompressível e que não existem fontes ou sumidouros dentro de VER, pode-se chegar equação de fluxo (Equação 20):

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right)\Delta x(\Delta y.\Delta z) + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)\Delta y(\Delta x.\Delta z) + \left(\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)\Delta z(\Delta y.\Delta x) = 0 \tag{20}$$

Dividindo todos os termos da equação por $\Delta V = \Delta x.\Delta y.\Delta z$, é obtido a Equação 21, equação de continuidade para o estado estacionário:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \tag{21}$$

Ao combinar a equação da continuidade com a Lei de Darcy, obtém-se a equação diferencial parcial conhecida como equação de Laplace (Equação 22):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(-K\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-K\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(-K\frac{\partial h}{\partial z}\right) = 0 \tag{22}$$

Visto que já foi feita a consideração de meio isotrópico e homogêneo, pode ser retirada a condutividade hidráulica da Equação 23.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{23}$$

Em regime transiente, a equação diferencial do fluxo subterrâneo em meios porosos pode ser escrita para duas dimensões pela Equação 24.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial T} \tag{24}$$

Onde,

S é o coeficiente de armazenamento;

T é a transmissividade.

De modo geral os códigos computacionais empregam a Equação 25 para descrever o fluxo subterrâneo em meio saturado tridimensional.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right) + R_v = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \tag{25}$$

Onde, R_v é o fluxo volumétrico por unidade de volume (fontes ou sumidouros);

K_{xx}, K_{yy} e K_{zz} representam a condutividade hidráulica nas direções principais (com isto o tensor de condutividade hidráulica se reduz a 3 componentes);

S_s é o coeficiente de armazenamento específico.

Se a água é adicionada ao aquífero o valor de R_v será positivo, se é retirada será negativo.

Existem diversos programas disponíveis para resolver a equação que descreve o fluxo em meios porosos, sendo o MODFLOW (modelo de fluxo de água subterrânea em diferenças finitas modular) o mais conhecido. Segundo McDonald e Harbaugh (1988), MODFLOW é um programa de computador que utiliza um método de diferenças finitas para simular o fluxo tridimensional de água subterrânea em meio poroso. Esse código foi desenvolvido pela USGS (United States Geological Survey) em 1984, no decorrer dos anos foram surgindo outras versões como MODFLOW-88 e MODFLOW-96 onde novos pacotes foram adicionados, e hoje já está na versão MODLOW-2000.

O MODFLOW é composto por um programa principal e vários módulos, cada um com atividades específicas. Esses módulos são agrupados em “pacotes”. Segundo Harbaugh *et al*. (2000), existem vários pacotes como por exemplo: BAS (Básico) que gerencia as tarefas do modelo com um todo; BCF (Bloco de Fluxo Centrado) que calcula termos das equações de diferenças finitas as quais representam o fluxo dentro do meio poroso; WEL (Poço) adiciona termos

representando o fluxo dos poços para as equações; RCH (Recarga) adiciona termos representando a recarga distribuída por área nas equações, entre outros.

Os diversos pacotes existentes nessa nova versão do MODFLOW são agrupados em “processos”. Os processos existentes são:

- Processo Global: gerencia todas as operações do programa, incluindo o ajuste dos dados para outros processos; define o problema a ser resolvido; define as opções de saída; define a discretização espacial e temporal do modelo e as unidades de medida.
- Processo de Fluxo de Água Subterrânea: engloba todos os aspectos da resolução da equação de fluxo, desde a formulação das equações de diferenças finitas até os dados de entrada (propriedades do fluxo e condições de contorno), a resolução simultânea das equações resultantes e os dados de saída.
- Processo de Observação: produz valores calculados pelo modelo para compará-los com valores observados, como carga, balanço de vazão ou concentração.
- Processo de Sensibilidade: calcula a sensibilidade das cargas em relação a determinados parâmetros selecionados.
- Processo de Estimação de Parâmetros: utiliza uma variação do método de Gauss-Newton para ajustar iterativamente os valores dos parâmetros escolhidos pelo usuário, a fim de minimizar o valor da função objetivo.
- Processo de Transporte: emprega o MOC3D para realizar o cálculo do transporte de uma única substância nas águas subterrâneas, podendo considerar a advecção, dispersão, decaimento de primeira ordem, efeitos de porosidade dupla e adsorção.

Em diversos países, diferentes programas computacionais foram desenvolvidos com o uso do código computacional MODFLOW, como mostram as pesquisas de Mooers *et al*. (2018), Sathish, Mohamed e Klammler (2018), Fang *et al*. (2019), Rossman, Zlotnik e Rowe (2019), Klaas *et al*. (2020), Ochoa *et al*. (2020) e Zeinali, Azari e Heidari (2020) e Kresic e Panday, (2021).

Ehtiat, Mousavi e Srinivasan (2018) desenvolveram um modelo integrando o SWAT para estimativa de recarga com MODFLOW, com o objetivo de avaliar o

comportamento do fluxo subterrâneo do sistema aquífero Dehloran, localizado na região oeste árida do Irã, em resposta a mudanças no uso do solo, sistema de irrigação e bombeamentos. Os resultados destacam a importância da modelagem integrada para entender a interação entre águas superficiais e subterrâneas.

D'Oria e Zanini (2019) utilizaram o MODFLOW para avaliar a heterogeneidade hidráulica do aquífero aluvial localizado sob uma barragem contra inundações e sua área à jusante no norte da Itália. O objetivo foi analisar a interação entre o rio e o aquífero em diferentes cenários de inundações.

Gropius *et al*. (2022), usando MODFLOW, desenvolveram um modelo numérico regional de fluxo de águas subterrâneas para toda a Jordânia e a parte mais ao sul da Síria. Após a calibração transitória usando medições do nível das águas subterrâneas dos aquíferos, os resultados do modelo reproduzem os grandes declínios do nível das águas subterrâneas ocorridos nas últimas décadas, que levaram à seca de várias nascentes.

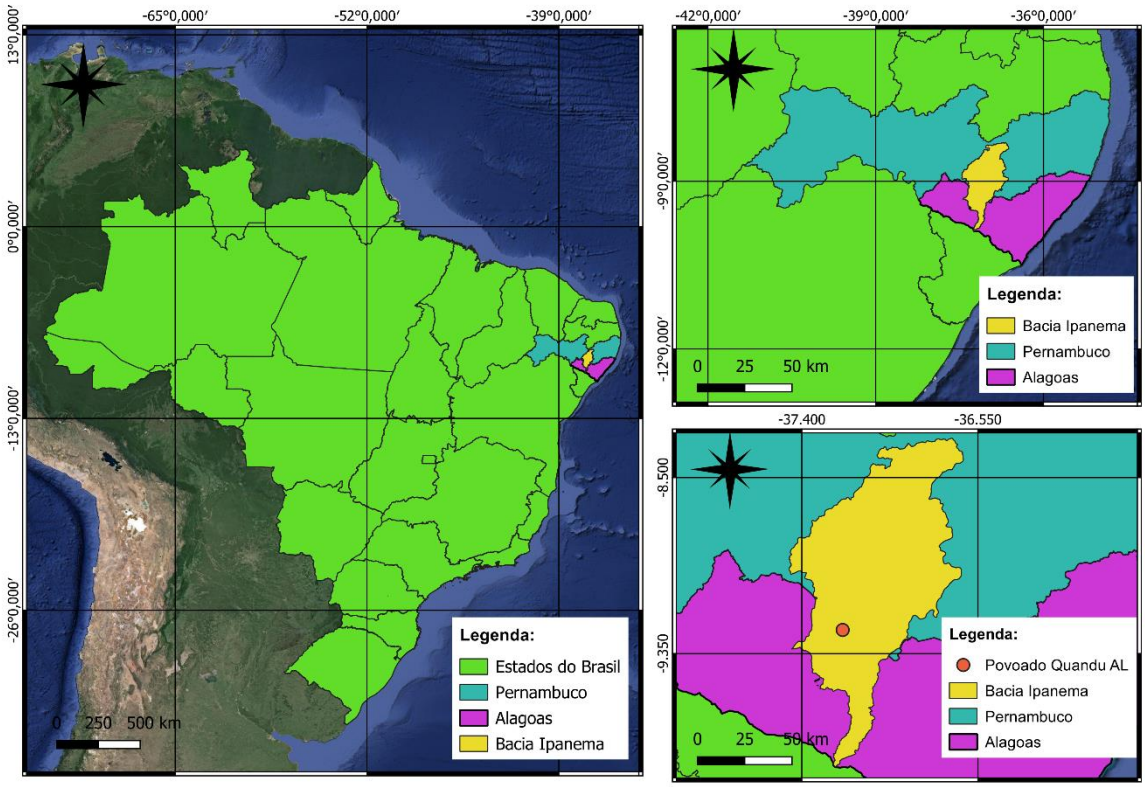
Com o objetivo de desenvolver uma agricultura sustentável na região, Arnaud *et al*. (2022), para auxiliar na tomada de decisões, construíram um modelo de águas subterrâneas do Aquífero Plaine du Nord-Massacre, que é um dos maiores aquíferos do Haiti, supostamente com alto potencial para abastecimento de água e irrigação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, povoado Quandú, está inserida na bacia hidrográfica do Rio Ipanema (Figura 6). Sua bacia nasce em território pernambucano, atravessa o território alagoano e deságua no rio São Francisco. Segundo IICA (2007), a bacia tem 6.174,3 km² no estado de Pernambuco e 1.886,29 km² no estado de Alagoas. A bacia limita-se ao norte com a bacia do rio Ipojuca no estado de Pernambuco; ao sul com o rio São Francisco, na divisa com o estado de Sergipe; a oeste com as bacias do Rio Capiá, do Riacho Grande e do Rio Moxotó; e a leste com a bacia do Rio Traipú.

Figura 6 - Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema, localização povoado Quandú



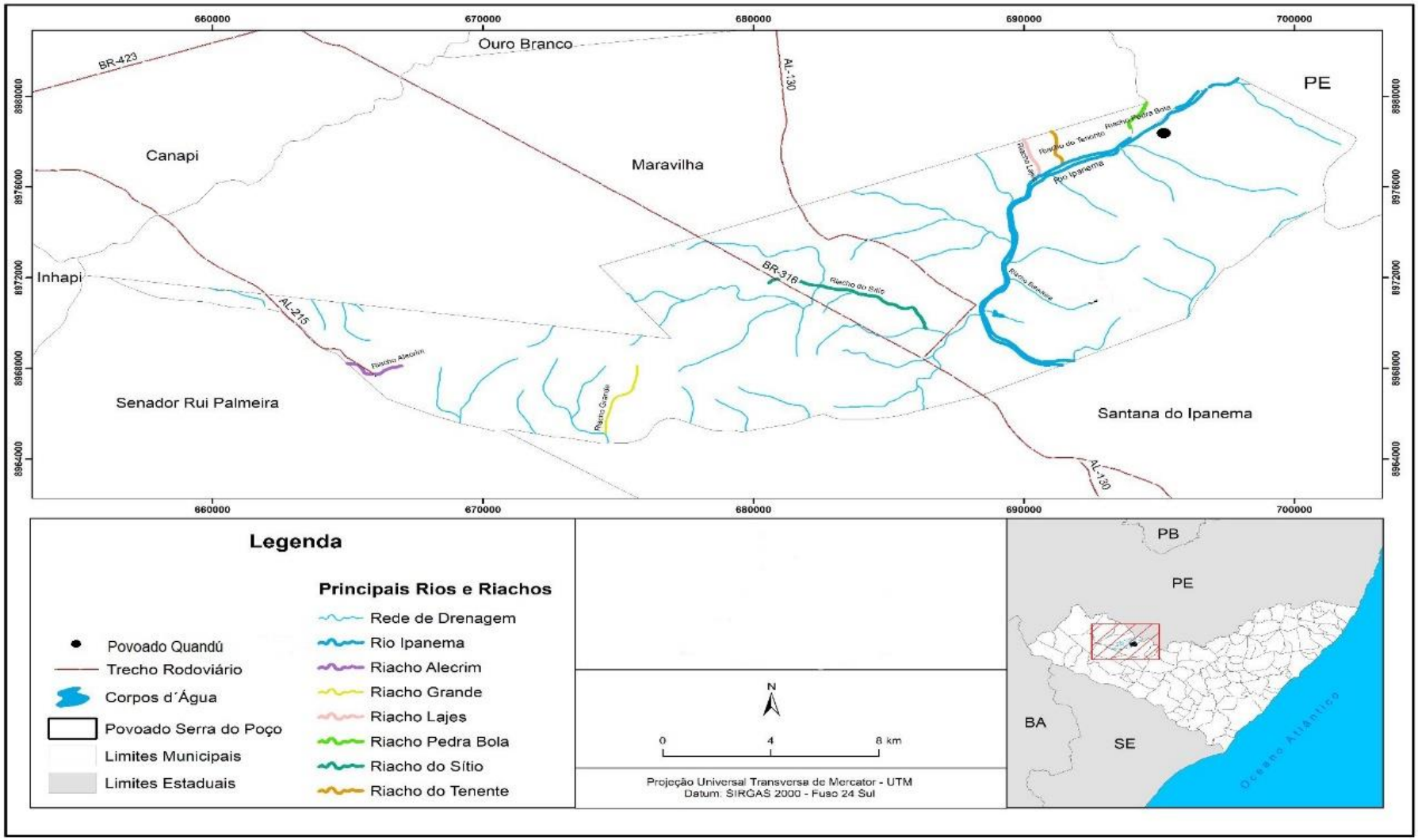
Fonte: O Autor (2024).

Na porção alagoana da bacia no Rio Ipanema está localizado o município de Poço das Trincheiras, que faz parte da Mesorregião do Sertão Alagoano e integra a Microrregião Geográfica de Santana do Ipanema. Limita-se, ao norte, com o estado de Pernambuco e com o município alagoano de Maravilha; ao sul, com Santana do Ipanema-AL e Senador Rui Palmeira - AL (Figura 7).

O município de Poços das Trincheiras possui uma área de 284.9260 km² (IBGE, 2021), distante 215 quilômetros da capital Maceió - AL, sendo suas principais vias de acesso as rodovias BR 316 e AL135. Na zona rural de Poços das Trincheiras está o Povoado Quandu, localizado a aproximadamente 11 km da zona urbana. O povoado se encontra à margem alagoana do Rio Ipanema, que nesse trecho é o divisor dos estados de Pernambuco e Alagoas (Figura 7).

O povoado não possui sistema de abastecimento convencional de água, e a população busca fontes alternativas para acesso à água para o desenvolvimento de suas atividades domésticas, como também para irrigação. Nesse trecho, o rio tem uma aluvião (Figuras 8 e 9), que se estende em toda margem do povoado, sendo a principal fonte de água para a população.

Figura 7 - Rede hidrográfica de Poço das Trincheiras, e localização do povoado Quandú



Fonte: Adaptado de Nascimento (2017).

Figura 8 - Localização do trecho da aluvião, Rio Ipanema - AL

Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

Para captação da água da aluvião (Figura 9), a população realiza perfuração de poços em todo o trecho próximo ao povoado. Alguns poços são escavados, dos tipos cacimba e cacimbão, para atender uma única residência, e outros compartilhados por um conjunto de residências (Figura 10).

Figura 9 - Aluvião no trecho estudado, Rio Ipanema - AL

Fonte: O Autor (2022).

Figura 10 - Poços escavados na aluvião, Rio Ipanema – AL

a) Cacimbão b) Cacimba

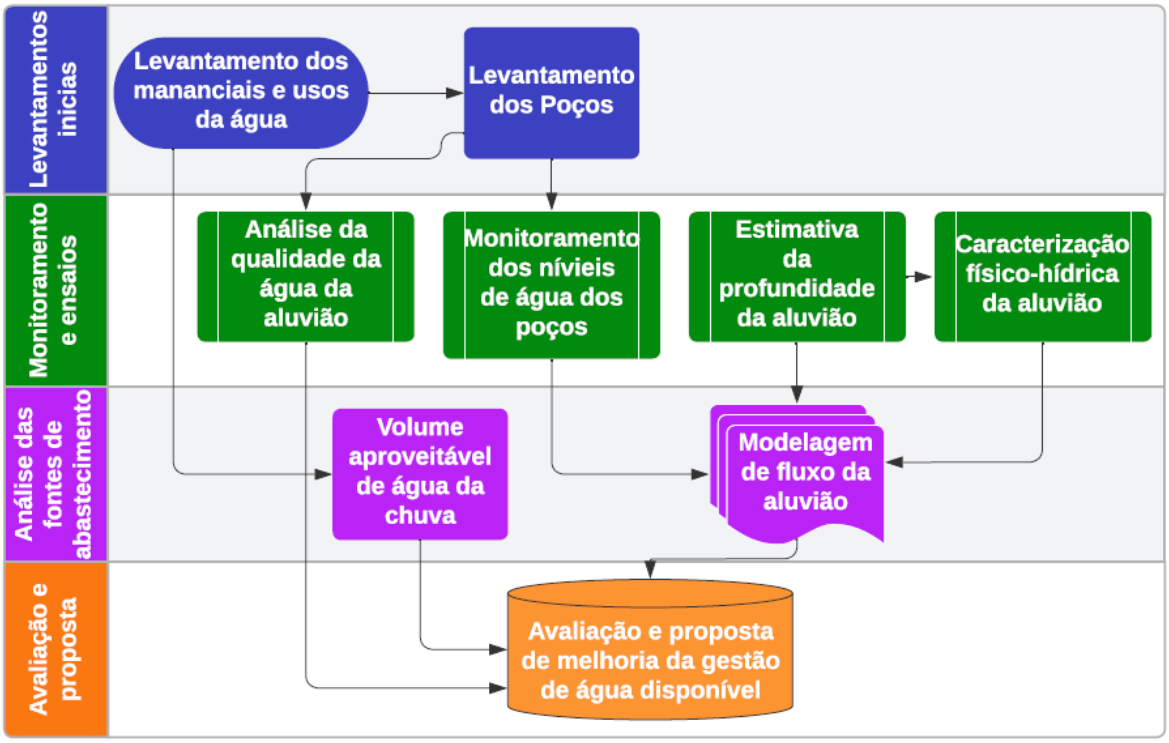
Fonte: O Autor (2022).

Por meio de uma consulta à Prefeitura de Poços das Trincheiras, foi informado que, como não existe sistema de esgotamento sanitário convencional coletivo na comunidade, o sistema de tratamento e destinação final dos esgotos das residências, são por meio de sistemas individuais. Mesmo utilizando a aluvião para atender as necessidades para abastecimento, é possível que parte das águas residuárias sejam direcionadas para a sarjeta, podendo ser lançadas na calha do rio.

Além da explotação de água da aluvião, os moradores fazem usos de sistema de aproveitamento de águas pluviais, como também de caminhões “pipas” para usos mais nobres.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas as atividades apresentadas na Figura 11, que são descritas nas seções a seguir.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada para a pesquisa



Fonte: O Autor (2024).

3.2 LEVANTAMENTO DOS MANANCIAIS E USOS DA ÁGUA

Com a finalidade de conhecer os mananciais e usos da água do trecho estudado à margem do Rio Ipanema, realizou-se a aplicação de questionários. O questionário contemplou quem são os usuários e os usos das águas superficiais e subterrâneas (forma, local e finalidade).

Para elaboração do formulário de cadastro dos mananciais e usos da água do trecho estudado, foram analisados os formulários de cadastros de usos da água do órgão gestor de recursos hídricos (ANA, 2011), além do formulário proposto por Braga *et al*. (2016) realizado no âmbito do projeto Águas de Areias, no Rio Capibaribe. Foram também utilizadas como base para elaboração do formulário, as informações solicitadas pelo Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), instituído em âmbito federal pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, através da Resolução nº 317/2003 (ANA, 2003), para registro obrigatório de pessoas físicas e jurídicas usuárias de recursos hídricos.

O formulário foi então estruturado em nove páginas, a saber: página 1, com dados gerais do usuário; páginas 2 a 5, com dados dos mananciais de captação (rio ou riacho / barragem, açude ou barreiro / águas subterrâneas / nascente ou olho

d’água); página 6, com informações sobre os usos da água; página 7, com dados de aproveitamento de água de chuva; e página 8, com informações sobre os tipos de destinação final de esgoto sanitário. O referido formulário foi submetido para análise do Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco, o qual foi aprovado pelo parecer consubstanciado n° 6.443.407 em 23 de outubro de 2023.

De acordo com a Associação de Desenvolvimento Comunitário do Quandú, o povoado tem aproximadamente 460 residências. Para definição da amostra de municípios, considerando uma amostragem aleatória, empregou-se a Equação 26 para o cálculo do número de residências da amostra quando se tem uma população finita. Adotou-se um intervalo de confiança de 90% para o cálculo de amostra.

$$n = \frac{Z^2_{\alpha/2}[p(1-p)]N}{Z^2_{\alpha/2}[p(1-p)+(N-1)I^2_c} \quad (26)$$

Onde: N é o tamanho da população; n é o tamanho da amostra; Ic é o intervalo de confiança – 90%; p é a proporção do atributo na população, quando desconhecido deve-se adotar p = 0,50; e Zα/2 é a distribuição normal para um intervalo de confiança de 90%.

Assim, dimensionou-se que uma amostra teria, no mínimo, 80 residências. Foram aplicados 120 questionários e, dessa forma, a amostra apresentou um intervalo de confiança de 92,30%. Os dados dos cadastros realizados foram previamente analisados quanto à consistência. Em casos como de insuficiência de informações ou valores incoerentes, voltou-se ao campo para checagem. Após validação, os dados foram armazenados em planilha eletrônica e analisados posteriormente, por meio da elaboração de gráficos e tabelas para melhor compreensão dos resultados.

Por meio dos dados dos questionários, foram calculados os percentuais das residências, que fazem uso de cada fonte de abastecimento de água, para as diversas finalidades. Isso possibilitou a estimativa da demanda de água da aluvião.

Para a determinação da demanda, foram obtidos os volumes dos reservatórios que se destinam ao armazenamento de água, bombeado da aluvião. A partir das frequências de bombeamento mensal, calculou-se o consumo *per capita* de cada residência, e estimar um consumo *per capita* média da comunidade, para as atividades domésticas.

O consumo de água na dessedentação em cada espécie vai depender de um conjunto de variáveis, como a raça, a idade do animal, o peso, se lactante, da temperatura, etc. Valores médios de ingestão foram adotados para diferentes grupos de animais, conforme indicado por estudos específicos (Araújo *et al*., 2011; Palhares, 2013).

3.3 LEVANTAMENTO DOS POÇOS DA ALUVIÃO

Com a finalidade de quantificar os poços existentes no trecho da aluvião, foram realizadas visitas à área de estudo, percorrendo todo a sua extensão. Com o auxílio de um GPS portátil, modelo eTrex 10, Garmin (Figura 12a), registrou-se as coordenadas de todos os poços, para possibilitar a localização dos pontos de bombeamento para o desenvolvimento do modelo computacional (Figura 12b). Identificou-se também o tipo de poço, se cacimbão ou cacimba, como foram caracterizados por Vasconcelos (2017), além de verificar as proteções sanitárias (com ou sem cobertura).

Figura 12 - Levantamento dos poços, no trecho do Rio Ipanema

a) GPS b) Registro de coordenada c) Medição de diâmetro

Fonte: O Autor (2022).

Foram determinadas, por meio de uma trena manual (Figura 12c), os diâmetros e profundidades de todos os poços, com o objetivo de analisar os valores mínimos, máximos e médios encontrados. Isso visou identificar se há necessidade ou não de grandes escavações, para captação no lençol freático.

3.4 MONITORAMENTO DOS NÍVEIS DE ÁGUAS NOS POÇOS

Para auxiliar na análise dos processos de fluxo subterrâneo foi necessário um monitoramento quantitativo. Sendo assim, foi realizado o monitoramento quinzenal, durante 12 meses, observando as possíveis variações sazonais em três poços cacimbões (Figuras 13) de captação já existentes no local. Os poços foram selecionados de acordo com a melhor distribuição espacial, de maneira que estejam aproximadamente equidistantes e levando em consideração a facilidade de acesso e a disponibilidade dos proprietários. Logo, foram enumerados começando do poço mais a montante para o mais a jusante (PM-1, PM-2 e PM-3), sabendo que o escoamento do rio é do sentido nordeste para sudoeste. Na Tabela 1 e Figura 14, pode-se observar a localização dos poços monitorados.

O monitoramento dos níveis potenciométricos foi realizado manualmente utilizando-se medidor manual de nível. Foram elaborados gráficos que permitem a visualização comparativa dos níveis estáticos durante o período de janeiro a dezembro de 2023. Os dados coletados colaboraram para construção do modelo computacional, viabilizando sua calibragem.

Figura 13 - Poços monitorados no trecho do Rio Ipanema

a) PM-1

b) PM-2

c) PM-3

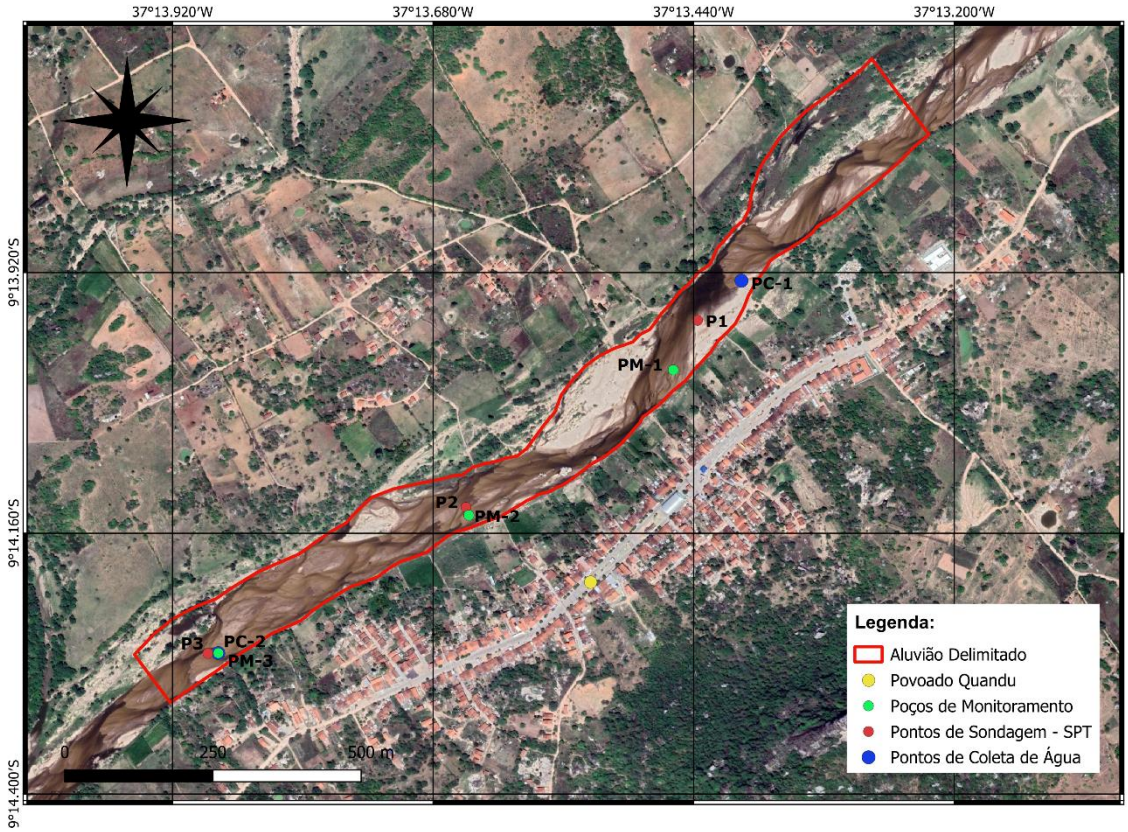
Fonte: O Autor (2022).

Tabela 1 - Coordenadas dos poços cacimbão monitorados, na aluvião do rio Ipanema - AL

Poço	**Coordenadas (UTM)**	
PM-1	9°14'0.58"S	37°13'27.52"O
PM-2	9°14'8.60"S	37°13'38.82"O
PM-3	9°14'16.22"S	37°13'52.66"O

Fonte: O Autor (2024).

Figura 14 - Localização dos poços monitorados, pontos de coleta de água e pontos de sondagens, na aluvião do rio Ipanema - AL

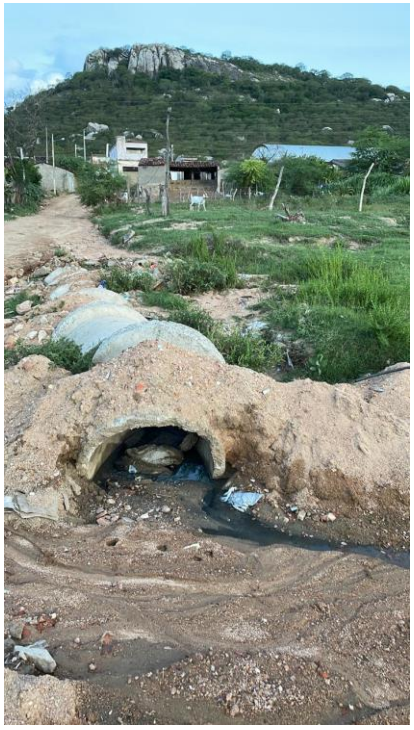


Fonte: O Autor (2024).

3.5 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DA ALUVIÃO

Sabendo-se que existe a possibilidade da aluvião receber emissários de esgoto no trecho estudado, sem um prévio tratamento, realizou-se ensaios para análise da qualidade da água da aluvião à montante e à jusante do trecho estudado. A Figura 15 apresenta uma tubulação de concreto sendo direcionadas para o rio Ipanema num ponto intermediário do trecho de interesse.

Figura 15 - Ponto de possível lançamento de esgoto na aluvião do Rio Ipanema - AL



Fonte: O Autor (2022).

No mês de fevereiro de 2024, por meio de uma única campanha, foram coletadas duas amostras, uma em um poço mais à montante (PC-1) e outra em um poço mais à jusante na aluvião (PC-2), esse último é coincide com PM-3. As amostras coletadas para análise de qualidade da água foram enviadas para o Laboratório de Análise de Água, Alimentos e Efluentes Industriais - Aqualyse, localizado em Caruaru-PE. Os ensaios objetivam a determinação dos parâmetros de potabilidade da água por meio de ensaios físico-químicos e biológicos de acordo com a Portaria GM/MS N° 888/2021 (Brasil, 2021).

3.6 ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DA ALUVIÃO

Para determinação da espessura do aquífero, realizou-se sondagens SPT com a finalidade de coleta de amostras deformadas (Figura 16), determinação da profundidade do nível d'água, e identificação preliminar das camadas de solo da aluvião até o embasamento cristalino.

Foram selecionados três pontos aproximadamente equidistantes (um mais a montante, um ponto intermediário e um mais a jusante), para se ter uma melhor representatividade da espessura do corpo aluvionar do trecho estudado. Assim, as sondagens foram localizadas nos pontos (P1, P2 e P3), que podem ser localizados na

Figura 14 já apresentada. Os furos foram feitos seguindo a recomendação da NBR 6484 (ABNT, 2020). O ensaio consistiu nas seguintes etapas:

- Realizou-se o furo até 1 metro de profundidade utilizando o trado concha e introduziu o conjunto (amostrador + haste de percussão+ cabeça de bater) no furo;
- Cravou-se o amostrador padrão 45 cm abaixo do fundo do furo, em três seguimentos de 15 cm; utilizando o martelo padrão de 65 kg caindo livremente de uma altura de 75 cm;
- Anotou-se o número de golpes necessários para cravação de cada segmento de 15cm, retirou-se o amostrador e foi recolhida a amostra retida, acondicionada em sacos plásticos adequado com respectiva etiqueta contendo os seguintes dados: local, número do furo, profundidade da amostra, número da amostra, classificação expedita, sondador, data;
- Aprofundou-se o furo, através do trado concha ou através de lavagem por circulação d'água com cravação de revestimento, até a profundidade do novo ensaio penetrométrico.

Figura 16 - Realização de sondagem SPT na aluvião, Rio Ipanema, em 27/12/2023

a) Cravação do amostrador

b) Coleta de amostra indeformada

Fonte: O Autor (2023).

Foi realizada uma análise tátil visual, por meio das amostras coletadas em cada ponto sondado, para classificação do solo e determinação do perfil litológico da camada aluvionar.

3.7 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DA ALUVIÃO

O trabalho experimental objetivou conhecer as propriedades físico–hídricas em três pontos selecionados no trecho da área de estudo, para a análise da variabilidade espacial desses solos.

Foram coletadas amostras deformadas, em dezembro de 2023, em diferentes profundidades por meio do ensaio SPT, nos três pontos (P1, P2 e P3), seguindo os procedimentos recomendados pela NBR 9604 (ABNT, 2016), e a preparação das amostras foram realizadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). Por meio dos resultados do ensaio SPT, definiu-se as profundidades para realização da análise granulométrica em cada um dos pontos conforme apresentadas na Tabela 2. A Figura 17 mostra as amostras de diferentes profundidades do Ponto P1.

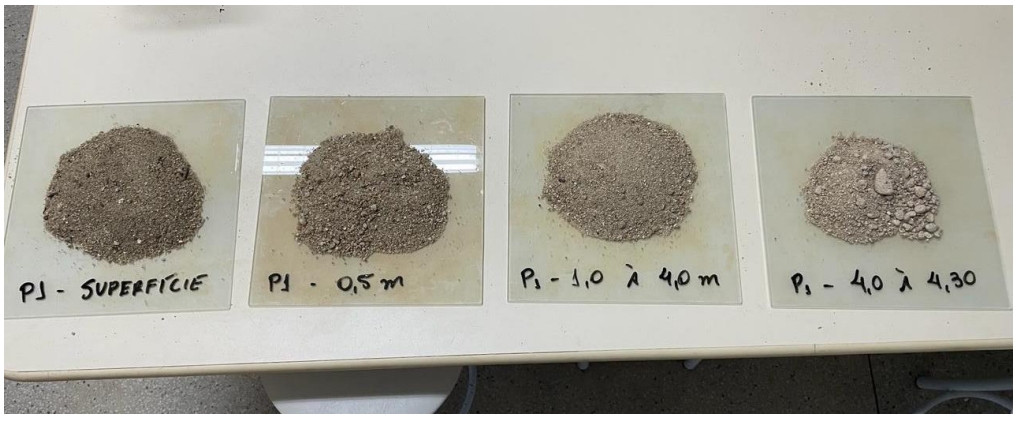
Tabela 2 - Profundidades dos pontos de realização da análise granulométrica

Poço	**Profundidades (m)**			
P1	Sup.	0,5	1,00 a 4,00	4,00 a 4,30
P2	Sup.	0,5	1,00 a 2,00	2,00 a 2,30
P3	Sup.	0,5	1,00 a 3,00	3,00 a 3,15

Sup.: Superfície do terreno.

Fonte: O Autor (2023).

Figura 17 - Amostras do Ponto P1, separadas por profundidades de coleta



Fonte: O Autor (2023).

Como é necessário a obtenção da massa específica dos grãos do solo para proceder com a análise granulométrica, essa foi realizado seguindo o procedimento da NBR 6458 (ABNT, 2016). Foram tomados aproximadamente 60 g de solo seco, realizado a dispersão para posterior transferência para o picnômetro com água destilada. As bolhas de ar da mistura foram retiradas por meio de bomba à vácuo. Após isso, foram medidas a temperatura e a massa do conjunto, para então a mistura ser transferida para capsula de alumínio e levada à estufa para determinação da massa do solo seco, para prosseguir com o cálculo da massa específica dos grãos.

A análise granulométrica foi realizada, em janeiro e fevereiro de 2024, a fim de identificar o solo a partir das partículas que os constituem, na qual consistiu em conhecer a distribuição granulométrica dos grãos do solo.

Os procedimentos para a granulometria do solo foram realizados no laboratório de Solos da UFAL/CAMPUS SERTÃO, o qual permitiu determinar os diâmetros das partículas mais grosseiras (areia) por peneiramento e as mais finas (argila e silte) por sedimentação. O ensaio foi dividido em três partes: peneiramento grosso – fração > 2,0 mm, peneiramento fino - 2,0 mm > fração > 0,075 mm, e ensaio de sedimentação para fração inferior a 0,075 mm. O ensaio de distribuição granulométrica de solos seguiu as recomendações das normas seguintes:

- NBR-6457 (ABNT, 2016) - Amostras de Solo – Preparação Para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização e,
- NBR-7181 (ABNT, 2016) - Solo – Análise Granulométrica.

Foi pesada a massa da amostra seca ao ar, tomando-se a precaução de desmanchar no almofariz todos os torrões eventualmente ainda existentes, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha, e passado este material na peneira de 2,0 mm. O material retido na peneira de 2,0 mm, foi lavado a fim de eliminar o material fino aderente e secar em estufa a 105ºC – 110ºC, até constância de massa (Figura 18). O material assim obtido é usado no peneiramento grosso.

Figura 18 - Preparação da amostra, do ponto P1, para o ensaio de análise granulométrica

a) Destorroamento da amostra b) Peneiramento da amostra c) Lavagem da amostra

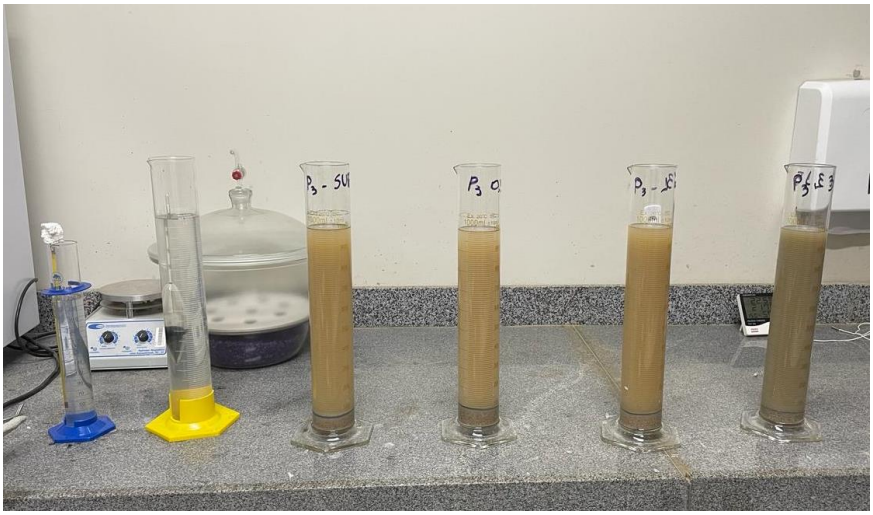
Fonte: O Autor (2023).

A metodologia por meio da sedimentação foi voltada para a granulometria da porção fina dos solos, sendo baseada na lei de Stokes, na qual: a velocidade (v) de queda das partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material constituinte (γ_s), do peso específico do fluido (γ_w), da viscosidade do fluido (μ) e do diâmetro da esfera (D), conforme a Equação 27.

$$v = \frac{(\gamma_s - \gamma_w) x D^2}{18.\mu} \quad (27)$$

Do material passado na peneira de 2,0 mm, para todas as amostras, foi tomado cerca de 120 g, no caso de solos arenosos, ou 70 g, no de solos siltosos e argilosos, para a sedimentação e o peneiramento fino. O material foi colocado em solução defloculante, e após 12 horas, foi realizado a dispersão do solo. Após isso foi transferido para a proveta, e após estabilização da temperatura, iniciou-se as leituras das densidades (Figura 19) da mistura por meio do densímetro nos tempos determinados conforma a NBR-7181 (ABNT, 2016).

Figura 19 - Ensaio de sedimentação das amostras do Ponto P3

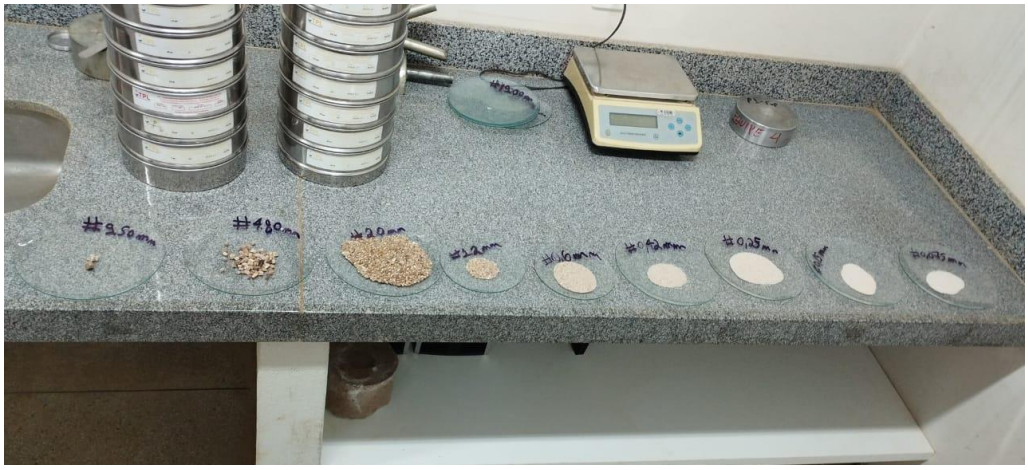


Fonte: O Autor (2023).

Após finalização da etapa de sedimentação, o material foi lavado na peneira de 0,075 mm. O material retido na peneira de 0,075 mm foi seco em estufa, à temperatura de 105ºC – 110ºC, até constância de massa, e, utilizando-se o conjunto de peneiras, foi passado nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm e foi anotado com resolução de 0,01 g as massas retidas acumuladas em cada peneira.

Para o material retido na peneira de 2,0 mm, lavado e seco em estufa, utilizou-se também o conjunto de peneiras. O material foi passando nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm, e foi anotado com resolução de 0,1 g as massas retidas acumuladas em cada peneira. A Figura 20 mostra o conjunto de peneiras e o material do Ponto P1 a 0,5 m de profundidade, peneirado.

Figura 20 - Ensaio de peneiramento, para a amostra do Ponto P1 a 0,5m



Fonte: O Autor (2023).

Após a realização do ensaio de granulometria e obtenção das curvas granulométricas do solo, as diferentes classes foram determinadas através do triângulo de texturas, proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1967) e adotado pela SBCS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo).

A partir das curvas de distribuição granulométrica, foram determinados os diâmetros das partículas de solo a 10% e 60% do peso acumulado e calculados os coeficientes de uniformidade. Os valores de porosidades totais foram estimados por meio da equação proposta por Vukovic e Soro (1992), as porosidades efetivas por meio da equação de Poulsen *et al.* (1999) e as condutividades hidráulicas foram calculadas utilizando a fórmula empírica apresentada por Carman (1937; 1956). Como o coeficiente de viscosidade cinemática da água também é necessário para a estimativa da condutividade hidráulica, um valor de $1{,}002 \times 10^{-6}$ m²/s a uma temperatura da água de 20ºC foi usado neste estudo.

A reserva permanente existente no aquífero, que não varia em decorrência das flutuações sazonais da superfície potenciométrica, calculou-se pela Equação 28, conforme Martins *et al.* (2007):

$$R_p = Ab\eta_e \tag{28}$$

Onde,

R_p é reserva permanente [L³]

b é a espessura média saturada do aquífero [L²].

η_e é porosidade efetiva.

Para a estimativa das reservas temporárias, que são os volumes armazenados ou liberados em decorrência dos aportes sazonais de águas superficiais e do escoamento subterrâneo, utilizou-se a Equação 29, apresentada por Martins *et al.* (2007):

$$R_t = A\Delta h\eta_e \tag{29}$$

Onde,

R_t é reserva temporária [L³]

Δh é a variação do nível de água no ano hidrológico [L²].

η_e é porosidade efetiva [adimensional].

Para a estimativa do potencial explorável (P_0), que é o volume de água que pode ser utilizado anualmente, incluindo uma parcela das reservas permanentes, passíveis de serem explotados, utilizou-se a Equação 30. Levou-se em consideração que para o caso das aluviões, de acordo com Martins *et al.* (2007), é estimado em 20% o montante que pode ser utilizável das reservas permanentes ao longo do ano.

$$P_o = 0{,}2R_p + R_t \quad (30)$$

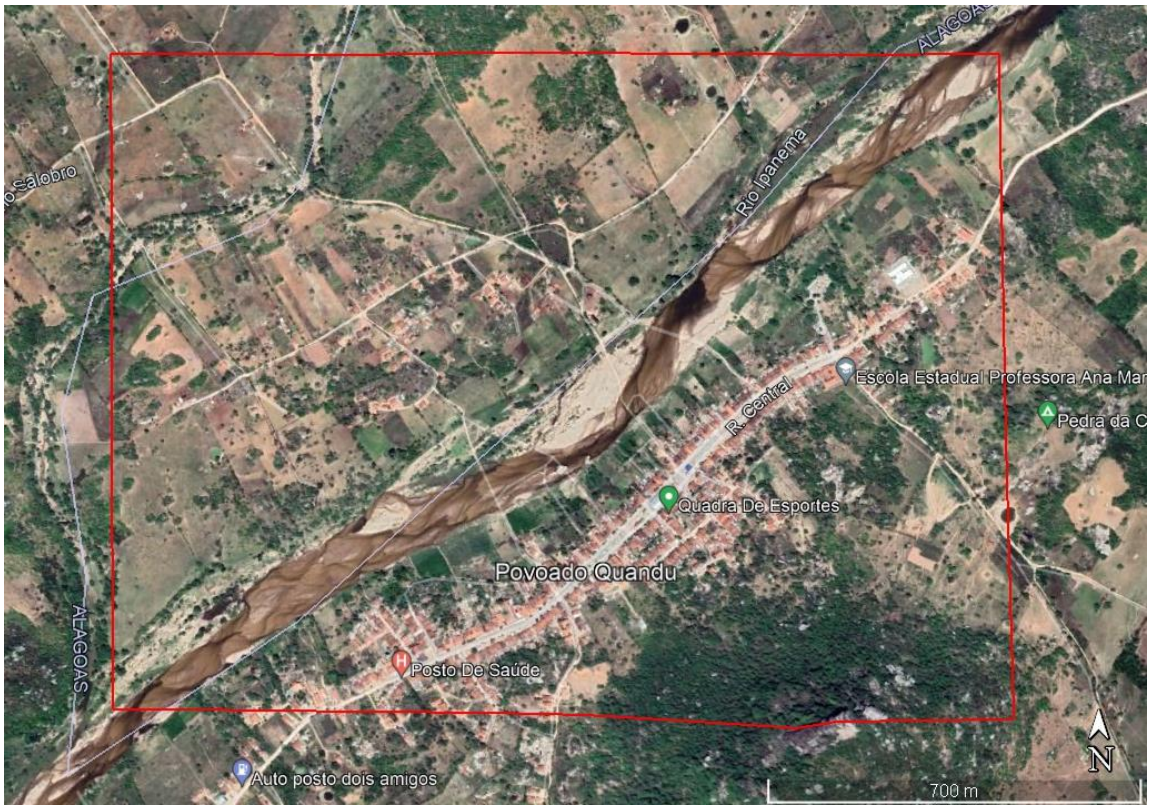
3.8 MODELAGEM DE FLUXO DA ALUVIÃO

A população residente na área de estudo utiliza a água da aluvião para o desenvolvimento de suas atividades diárias, sem o conhecimento da disponibilidade de água e demanda desta no trecho estudado. Durante o período monitorado, observou-se as variações sazonais e verificou-se se as recargas naturais da aluvião tendem a suprir a demanda explotada pelos poços. O objetivo da modelagem computacional de fluxo para água subterrânea na área de estudo é para o conhecimento das direções de fluxo, das condições de contorno, e para posteriores simulações de cenários futuros.

A área modelada está localizada no município de Poço das Trincheiras, inserida na Bacia do Rio Ipanema. É uma região plana com altitudes elevadas, entrecortada pelo rio Ipanema. Constitui um retângulo de 1,80 por 1,50 km, limitada pelas coordenadas 9º13’41,31” S a 9º14’20,61” S de latitude e 37º14’0,84” O a 37º13’6,97” O (Figura 21).

O modelo foi realizado seguindo as seguintes etapas: definição do objetivo; construção do modelo conceitual; formulação do modelo matemático e seleção do código de modelagem; discretização do modelo numérico; simulação e calibração do modelo.

Figura 21 - Área a ser modelada, trecho da aluvião do Rio Ipanema - AL

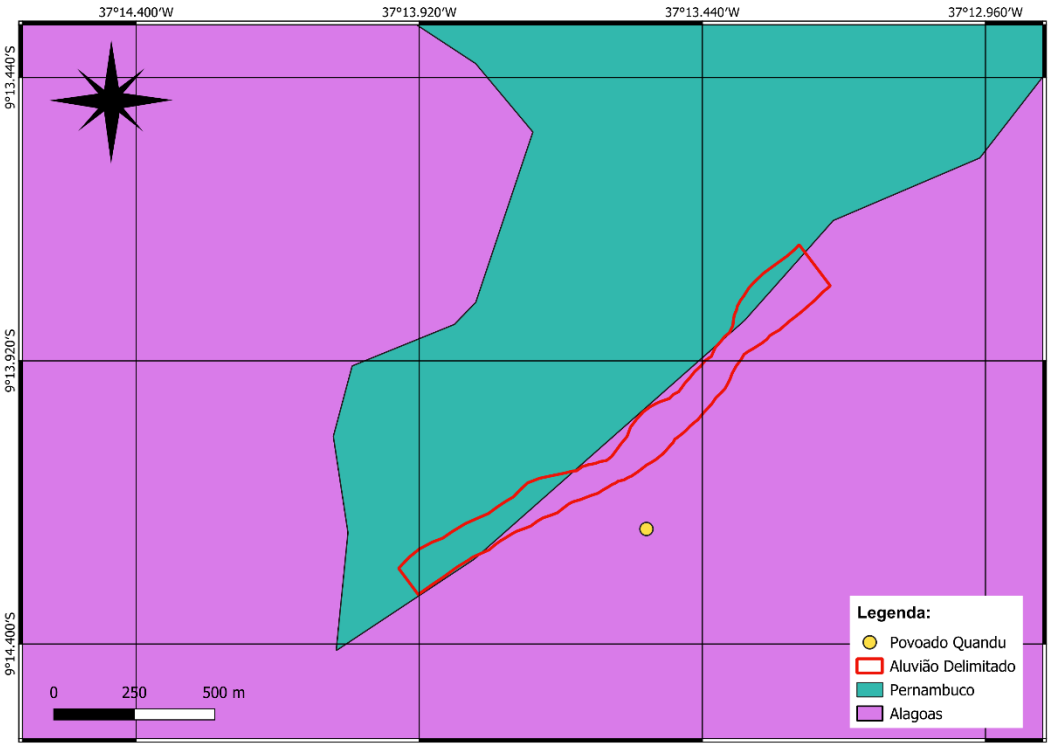


Fonte: O Autor (2024), adaptado de Google Earth (2023).

3.8.1 Caracterização do modelo conceitual

A área de estudo é composta por uma aluvião de aproximadamente 1,60 km ao longo do leito seco do rio Ipanema. Para uma melhor delimitação da área da aluvião, foram verificadas imagens do Google Earth de diferentes datas de aquisição (26/10/2018, 08/03/2021 e 09/12/2022) permitindo selecionar a imagem mais nítida (09/12/2022), evitando aquelas com problemas como nuvens, que prejudicariam a visualização da superfície. Com auxílio do o *software* QGIS v. 2.18, foi possível delimitar conforme a Figura 22.

Figura 22 - Delimitação do trecho da aluvião para a modelagem computacional, Rio Ipanema - AL



Fonte: O Autor (2024).

A espessura do depósito aluvionar foi considerada de acordo com as sondagens realizadas nos três pontos propostos. Para o modelo computacional, de acordo com a caracterização do corpo aluvionar a diferentes profundidades, foi considerado um sistema com duas camadas. A primeira sendo menos espessa, foi limitada superiormente pela superfície da aluvião até um metro de profundidade, já a segunda foi limitada superiormente pela primeira camada, e inferiormente pelo embasamento cristalino a diferentes profundidades (de acordo com os resultados de sondagens).

As cotas de superfície do terreno foram tomadas por meio do Modelo Digital do Elevação (MDE) do Programa Pernambuco Tridimensional - PE3D (Pernambuco, 2023), que realizou levantamento fotográfico e perfilamento a laser de todo o território de Pernambuco, possibilitando a geração e posterior disponibilização do MDE para o estado. Como a área de estudo está localizada na divisa do estado de Pernambuco e Alagoas, os produtos do PE3D estão disponíveis para esse trecho.

Os serviços do PE3D incluem recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser em dois níveis de precisão. Abrange todo o território de Pernambuco com um

recobrimento aerofotogramétrico e geração de ortofotos (Cirilo *et al*., 2015; Pernambuco, 2023). Utilizou-se o MDE produzido pelo perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 25 cm.

A coleta, organização e processamento dos dados do MDE foram realizadas no *software* QGIS v. 2.18. Todos os dados foram convertidos para o sistema de projeção de coordenadas planas (UTM), Fuso 24S, *datum* SIRGAS 2000.

Já as cotas para base do aquífero foram tomadas analisando as espessuras já citadas. Como estas apresentaram diferenças ao longo do trecho longitudinal, realizou-se uma interpolação dos valores de espessura entre a região mais a montante para a região intermediária, e desta para a região mais a jusante, com o auxílio do *software* de modelagem.

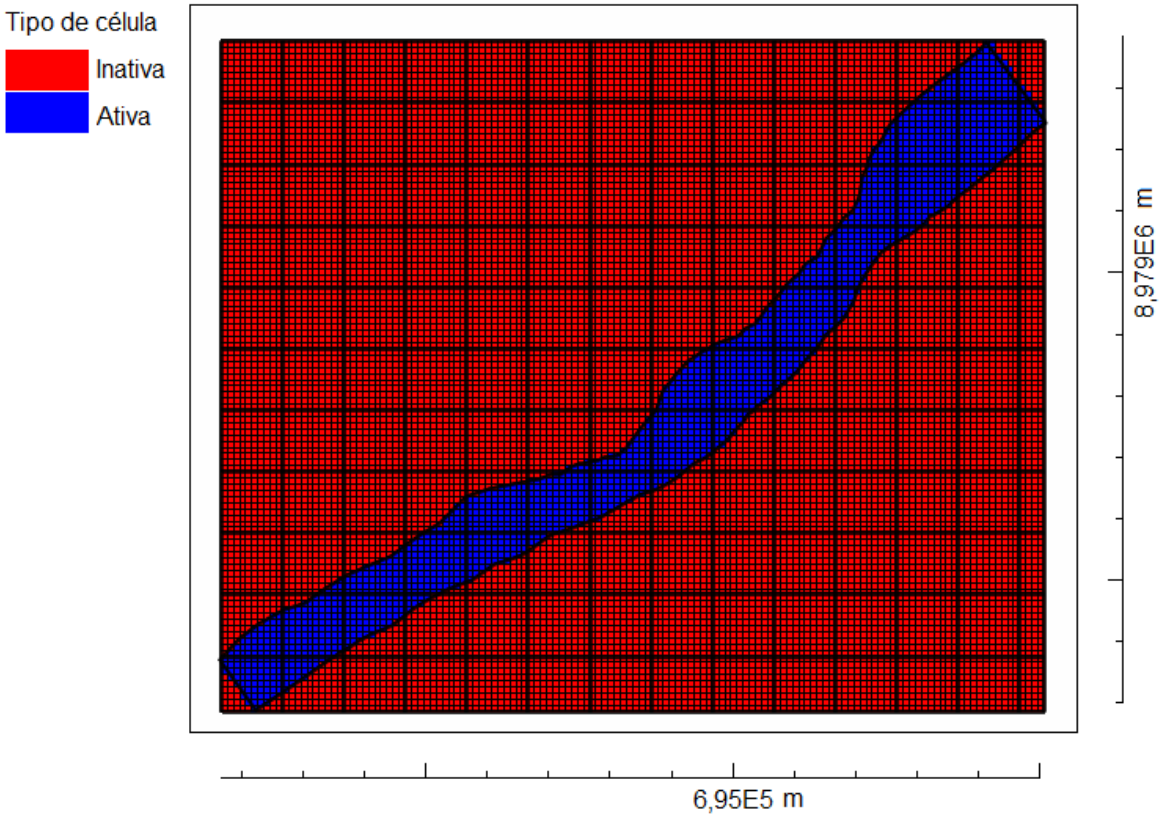
O *software* utilizado para implementação do modelo foi o *ModelMuse*, que é uma interface gráfica gratuita para executar o código MODFLOW-6 (Langevin *et al*., 2017), que utiliza o método numérico das diferenças finitas para simular fluxo em três dimensões.

3.8.2 Discretização do modelo

Para discretização do modelo conceitual, importou-se o arquivo *shapefile* com a delimitação da aluvião, para o ModelMuse. Determinou-se um tamanho de 10 m de largura por 10 m de comprimento para cada célula do modelo (levou-se em consideração a largura da aluvião), assim, o software gerou uma malha constituída de 109 linhas e 134 colunas, e considerando duas camadas obteve-se 29.212 células para todo o modelo (Figura 23).

Como as fronteiras laterais são definidas pelo contato aquífero aluvial-cristalino, as células situadas no cristalino receberam o *status* de inativas, pois não há fluxo. Já as células situadas no aquífero aluvial receberam o *status* de ativas, considerando que há fluxo.

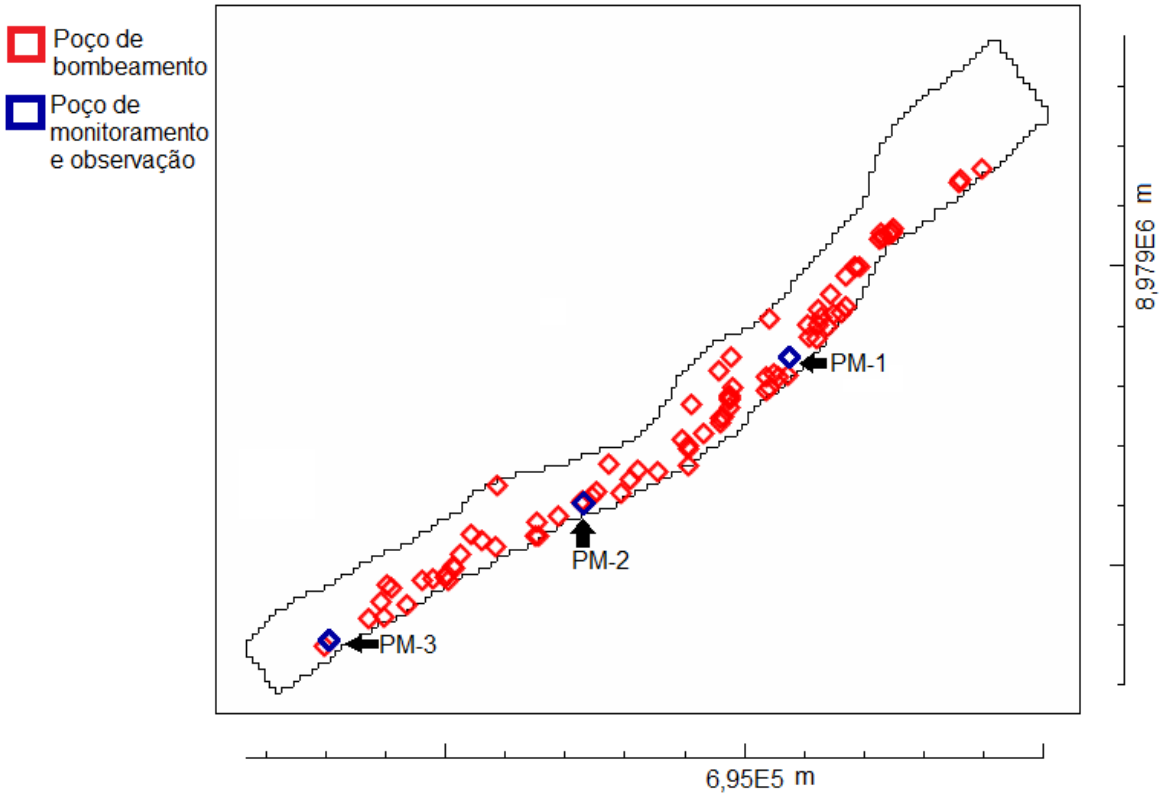
Figura 23 - Malha do modelo, com as células ativas e inativas



Fonte: O Autor (2024).

Por meio do levantamento dos poços realizados (Seção 3.3) e da aplicação do Cadastro de Mananciais e Usuários no trecho estudado (Seção 3.2), realizou-se o tratamento dos dados e análise das informações coletadas. Foram inseridos 84 poços de captação no modelo, onde foram implementados os dados de profundidade, vazão, coordenadas e tempo de bombeamento de acordo com os dados obtidos do levantamento (Figura 24). Inseriu-se também, três poços de observação, de forma a representar os poços de monitoramento (PM-1, PM-2 e PM-3), e auxiliar na calibração do modelo, por meio dos dados calculados versus observados.

Figura 24 - Poços inseridos no modelo, para a área de estudo



Fonte: O Autor (2024).

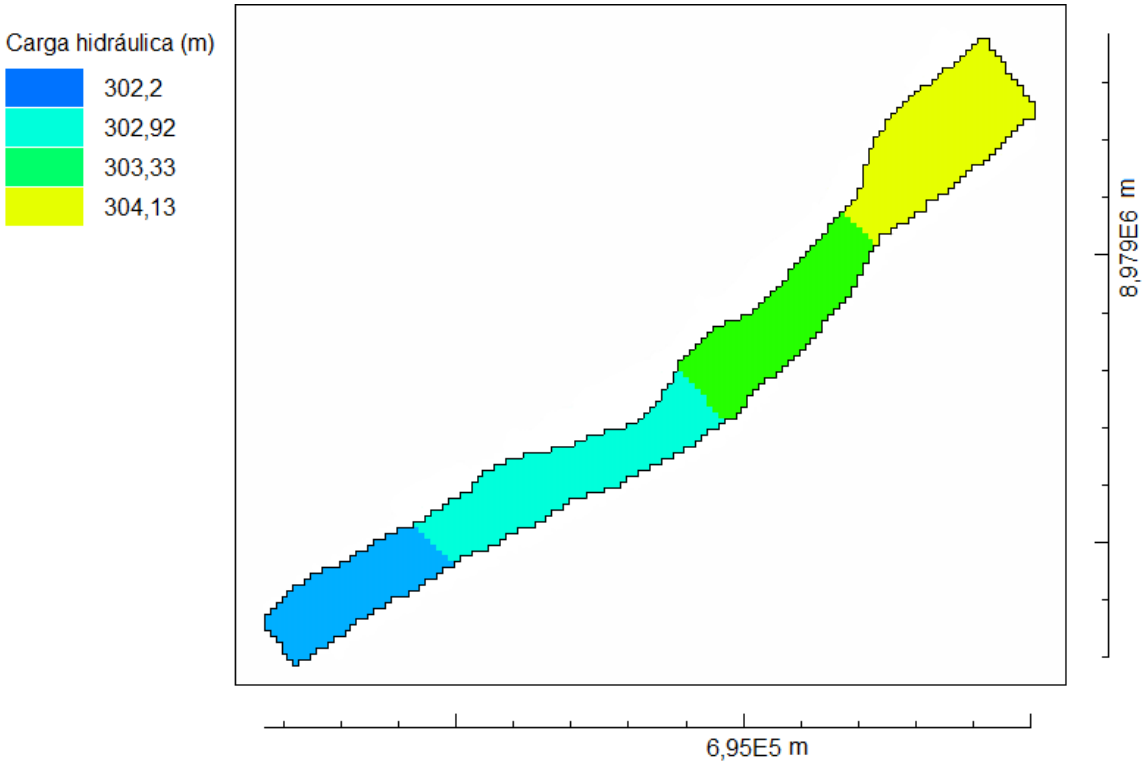
Para os valores de vazão que são extraídos de cada poço, considerou-se os valores estimados por meio das entrevistas realizadas, onde foi possível calcular a demanda total da aluvião que a comunidade faz uso (116,71 m³/dia). Como a comunidade faz uso de poços compartilhados para várias residências, não foi possível obter a vazão real de cada poço separadamente. Assim foi inicialmente, considerado a divisão da demanda total da comunidade para todos os poços, para estimar a vazão de bombeamento de cada poço. Entretanto, como existem trechos com maiores concentrações de poços, que outros, os resultados não foram satisfatórios. Dessa forma, adotou-se para melhor uniformização do bombeamento ao longo da aluvião, a divisão da demanda total por trecho. Logo, para trechos com maiores concentrações de poços, foram adotadas vazões menores, que para os trechos com menores concentração de poços. Dessa forma, distribuiu-se as vazões bombeadas em três trechos, equivalendo-se a divisão para os usuários do povoado.

Verificou-se por meio das entrevistas, que a comunidade faz uso de outras fontes de abastecimento, como a água de chuva captada e armazenada em cisternas. Considerando que no período chuvoso é provável a maior oferta da água de chuva

captada, foi considerado uma redução de bombeamento para os meses chuvosos. Essa redução de bombeamento foi estimada, calculando a redução da demanda de determinados tipos de uso (lavagens, banho, beber e cozinhar), para o percentual de domicílios que informaram captar, simultaneamente pelas duas fontes de abastecimento (aluvião e água de chuva). Para isso, foram considerados os percentuais dos tipos de usos domiciliares, apresentados pela Fundação Nacional de Saúde - FUNASA (1991). Para o período chuvoso, estimou-se uma demanda total da aluvião de 91,90 m³/dia, reduzido da demanda padrão em 24,91 m³/dia (21,26%).

As cargas hidráulicas iniciais foram obtidas com medidas de níveis estáticos dos poços de observação, e interpoladas linearmente onde não se tinham medidas (Figura 25).

Figura 25 - Cargas hidráulicas iniciais, consideradas para o modelo



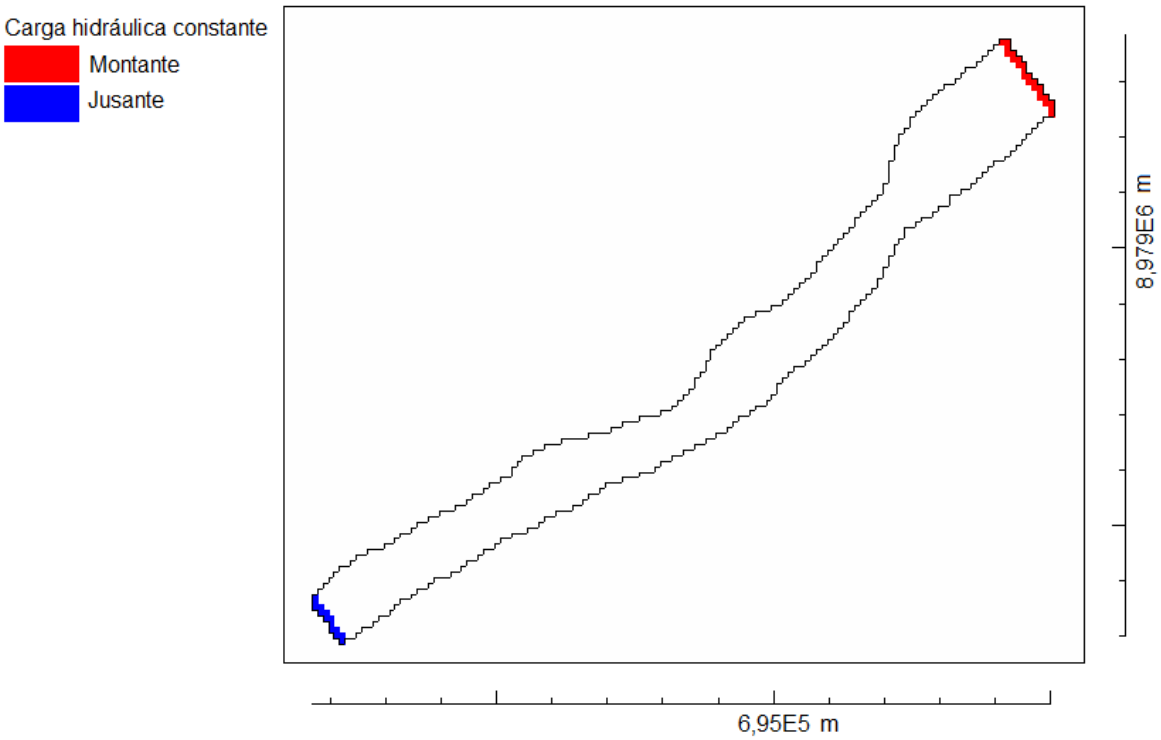
Fonte: O Autor (2024).

Quanto às condições de contorno, considerou-se o aquífero aluvial como livre, homogêneo e isotrópico.

Considerou-se fronteiras permeáveis as seções da aluvião (ao nordeste e ao sudoeste) que estão em contato com o retângulo que limita o modelo (Figura 26). A

recarga em uma das fronteiras permeáveis foi considerada, assim como a ocorrência de fluxo atravessando a outra fronteira.

Figura 26 - Fronteiras permeáveis, com cargas constantes para o modelo



Fonte: O Autor (2024).

Nas fronteiras permeáveis de montante e jusante, as células ativas foram definidas com cargas hidráulicas constantes durante um período de simulação, variando temporalmente. Antes de definir o valor de carga nessas células, foi verificado se esta era maior que a cota do embasamento cristalino. Caso contrário, essa carga não foi considerada, pois a célula estava seca (Figura 23). Os valores adotados em cada período de tempo, foi estimado levando em consideração os dados dos poços de monitoramento PM-1 e PM-3.

Quanto à recarga, foram coletados os dados de precipitação do Portal HidroWeb (ANA, 2024), que é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Coletou-se os dados do Posto Pluviométrico 00937032 para o ano de 2023, localizado no município de Santana do Ipanema – AL, que é o posto mais próximo da

área de estudo (15 km de distância) com dados disponíveis para esse ano, e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de precipitação do Posto 00937032, no ano de 2023

Mês	Precipitação (mm)
Janeiro	0,0
Fevereiro	32,9
Março	57,2
Abril	127,4
Maio	84,3
Junho	291,3
Julho	87,7
Agosto	63,1
Setembro	48,9
Outubro	0,0
Novembro	0,0
Dezembro	0,0

Fonte: ANA (2024).

O percentual adotado de recarga total anual foi de 26,65% do total precipitado na área, esse valor foi adotado considerando o valor encontrado por Santos (2009), que estudou o comportamento de uma aluvião na bacia experimental de Santana do Ipanema, no riacho gravatá, que é um afluente do rio Ipanema, sendo relativamente próximo (15 km) da área aqui estudada. Albuquerque (2013) encontrou um valor de recarga em torno de 20%, para os anos estudados, um pouco abaixo do valor aqui adotado.

A recarga adotada variou em cada um dos meses, entre 15% e 35%, sendo considerado para os meses com baixa precipitação um menor percentual e aumentando gradativamente para os meses com maiores precipitações. Salienta-se que os maiores valores foram apenas nos períodos chuvosos, considerando-se a contribuição da recarga direta pelo escoamento superficial, já que sem os dados da lâmina de água nesse período não foi possível incluir o contorno tipo ‘rio’ no modelo.

Quanto aos parâmetros hidrodinâmicos utilizados, como a condutividade hidráulica saturada e a porosidade efetiva, calculou-se de acordo com os ensaios de caracterização do solo realizados na pesquisa. Logo, adotou-se para o modelo uma condutividade hidráulica de 0,83 m/dia e 3,61 m/dia, para a primeira e segunda

camada, respectivamente. A porosidade efetiva adotada foi de 0,235 e o rendimento específico também o valor de 0,235.

O tempo de simulação foi de 12 meses, indo de zero até 360 dias, sendo considerados meses de 30 dias de duração. Para o modelo, foram adotas 12 períodos de tempo, e cada período foi dividido em 2 passos de tempo, totalizando 24.

3.8.3 Modelagem do fluxo

Após construir o modelo, realizou-se a simulação de fluxo para compreender o comportamento do fluxo de água subterrânea, e os resultados do modelo foram comparados com os dados de campo para analisar a representatividade do modelo. A calibração do modelo foi realizada manualmente pelo método da “tentativa e erro”, o qual consiste no ajuste dos parâmetros hidráulicos e ou de contorno até que os resultados do modelo melhor se adaptem as cargas hidráulicas médias observadas.

3.9 VOLUME APROVEITÁVEL DA ÁGUA DE CHUVA PARA A ÁREA ESTUDADA

Por meio do Portal Hidroweb (ANA, 2024), foram coletados dados da série histórica também do posto pluviométrico 00937032, localizado no município de Santana do Ipanema – AL (Tabela 4), que fica mais próximo da área de estudo. Foi analisada a distribuição das precipitações médias mensais (mm), ao longo do período coletado, para determinar os meses mais chuvosos e os mais secos, para avaliação do volume aproveitável da água de chuva.

Tabela 4 - Série histórica de precipitação do Posto 00937032

ANO	**Meses**											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1979	120,0	30,1	84,3	50,6	83,3	98,7	88,7	14,9	20,5	2,7	7,5	0,2
1980	92,5	158,4	82,3	6,2	6,2	81,2	43,4	17,0	22,1	75,1	0,0	41,9
1981	104,8	15,1	228,7	74,0	25,3	7,3	32,2	39,6	16,1	0,0	0,0	70,4
1982	0,0	40,8	10,2	127,4	157,1	60,7	51,5	59,1	24,2	0	0,0	11,6
1983	51,8	62,6	25,1	27,0	24,0	45,6	38,0	4,3	0,0	0,1	0,0	0,2
1984	10,6	9,6	130,7	150,1	61,3	63,6	111,9	44,5	40,9	2,3	0,7	0,0
1985	57,8	52,5	54,5	300,7	43,4	72,0	83,2	64,1	18,0	0,0	8,7	37,4
1986	3,0	29,1	43,6	6,4	51,3	50,5	74,6	23,2	36,6	28,4	3,6	10,1
1987	11,0	4,9	27,6	55,0	13,0	113,4	23,2	13,4	0,0	0,0	0,0	25,5
1988	3,0	0,0	97,4	25,6	44,1	99,0	145,4	11,4	9,2	0,0	7,6	69,0
1989	0,0	0,0	63,0	37,2	35,3	101,2	225,0	76,0	73,0	19,0	30,0	122,9
1990	4,5	80,5	0,3	98,0	42,1	45,0	58,6	39,8	33,4	9,8	11,0	9,5
1991	1,5	24,8	40,7	23,9	86,1	42,9	64,5	53,2	5,9	0,5	38,8	0,0
1992	114,0	108,4	125,3	3,2	3,2	19,1	50,7	24,3	19,4	0,0	0,0	36,5
1993	1,3	0,0	8,2	0,0	14,4	96,8	75,3	47,1	4,5	69,8	42,8	3,9
1994	17,0	13,6	174,8	26,7	116,4	269,0	102,2	49,9	71,6	2,6	0,4	21,6
1995	21,8	24,5	75,8	62,1	139,1	194,2	104,6	45,2	24,0	0,2	83,9	38,0

1996	17,1	2,7	1,1	174,7	99,2	186,0	136,1	134,4	6,7	0,0	102,6	19,0
1997	83,5	41,7	92,3	125,2	115,3	91,3	161,6	88,0	0,0	0,0	47,9	95,4
1998	26,8	4,7	13,9	6,7	28,4	87,2	62,9	57,8	10,1	1,6	0,0	9,3
1999	20,7	10,6	21,6	7,5	81,2	84,5	59,7	31,1	44,1	48,9	11,9	115,0
2000	48,3	138,1	28,5	114,0	68,2	139,1	83,8	53,9	53,3	13,7	37,1	49,1
2001	8,1	0,0	17,1	20,8	3,8	155,6	110,4	117,6	3,1	53,0	2,0	60,9
2002	227,9	213,2	92,0	17,6	128,9	120,9	78,5	69,8	8,6	6,5	0,3	50,6
2003	47,6	54,4	19,9	28,2	33,0	36,0	43,1	24,0	36,2	24,2	99,2	2,5
2004	193,8	44,5	56,7	22,2	28,9	143,1	57,2	84,0	51,6	0,1	1,1	0,0
2005	45,4	16,4	112,2	65,0	207,3	124,9	107,6	114,5	24,4	0,0	1,8	21,5
2006	0,2	1,4	165,8	44,0	182,5	199,3	187,0	29,2	73,0	12,2	10,4	0,0
2007	0,0	171,0	193,2	64,1	187,6	122,8	185,6	126,4	45,4	4,2	1,1	4,4
2008	0,0	117,4	241,2	74,5	171,5	86,1	138,2	81,9	22,2	0,0	0,0	60,1
2009	0,0	25,0	23,6	60,4	384,4	137,7	73,4	160,8	20,2	5,3	0,0	77,6
2010	86,9	109,0	54,2	201,5	-	303,5	208,0	99,2	90,4	106,8	0,0	1,7
2011	12,6	18,6	76,3	82,3	194,7	103,8	12,0	5,2	78,3	19,5	50,3	0,0
2012	10,3	41,4	67,7	10,9	56,7	17,5	78,0	57,6	5,7	22,8	0,0	0,0
2013	51,5	0,0	4,9	72,2	92,7	41,7	153,2	49,7	24,9	70,5	5,8	107,7
2014	17,0	7,7	3,5	157,9	88,6	50,4	102,0	66,5	36,7	94,2	37,9	14,7
2015	7,3	16,3	19,8	13,7	22,7	101,1	103,0	29,6	12,9	11,5	0,0	0,0
2016	96,6	23,2	23,0	30,9	64,4	49,9	49,6	19,5	14,3	3,7	6,3	0,0
2017	0,0	0,0	0,0	89,1	153,3	126,1	151,1	72,7	63,0	0,0	0,0	10,7
2018	0,0	53,0	-	53,1	44,0	26,9	32,9	3,8	18,7	0,0	4,7	73,9
2019	12,4	29,2	104,8	37,1	14,3	70,7	111,1	55,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2020	46,4	0,0	263,1	72,2	77,7	71,8	77,9	13,9	10,9	0,0	69,5	0,0
2021	0,0	71,7	6,4	47,6	154,2	89,3	89,8	34,8	13,4	0,0	45	100,9
2022	64,5	0,0	174,9	62	205,1	202,5	204,5	90,1	34,6	0,0	48,6	40,6
2023	0,0	32,9	57,2	127,4	84,3	291,3	87,7	63,1	48,9	0,0	0,0	0,0

Fonte: ANA (2024).

A Equação 28 da NBR 15.527 (ABNT, 2019) foi utilizada para determinar o volume de água de chuva aproveitável, o qual difere do volume precipitado devido às diversas perdas, tais como limpeza do telhado, evaporação, armazenamento no reservatório de autolimpeza, entre outras. Para essa finalidade, os dados de precipitação mensal foram empregados.

$$V = PxAxCx\eta \tag{31}$$

Onde: V = Volume de chuva aproveitável [L^3]; P = Precipitação média mensal [L]; A = Área de captação da cobertura [L^2]; C = coeficiente de *runoff* do telhado [adimensional]; η = eficiência do sistema de captação [adimensional], levando em conta o dispositivo de descarte de sólidos e desvio de escoamento inicial, caso este último seja utilizado.

A área de captação de chuva a ser considera foi obtida por meio das ortofotos, oriundas do PE3D. Delimitou-se a área de cada telhado e calculou-se a área total dos

telhados das residências do trecho estudado. O coeficiente de *runoff* adotado foi 0,80, como é recomendado por Tomaz (2009), visto que a maioria das residências presentes na área de estudo apresentam coberturas de telha cerâmica. A eficiência do sistema de captação considerada foi de 0,85, como é recomendado pela NBR 15.527 (ABNT, 2019), na falta de dados.

A partir do Volume de chuva aproveitável, realizou-se o dimensionamento do volume mínimo do reservatório, para o armazenamento da água de chuva, para os domicílios por meio do método de Rippl apresentado por Tomaz (2009), visando atender a demanda da comunidade.

3.10 AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA PARA A GESTÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ÁGUA PARA A COMUNIDADE

Para realizar a avaliação da gestão das fontes de abastecimento da comunidade, foram utilizados parâmetros e indicadores baseados nas características da comunidade, visando identificar os principais fatores que determinam o sucesso ou fracasso do modelo.

A metodologia de avaliação foi baseada no "Estudo de Modelos de Gestão de Serviços de Abastecimento de Água no Meio Rural do Brasil", conduzido pelo Banco Mundial (Garrido *et al*., 2016). Essa avaliação se fundamenta em um conjunto de parâmetros organizados em três tipologias relacionadas ao desempenho institucional: eficiência operacional, eficiência comercial e financeira. A metodologia apresentada pelos autores, é aplicada a modelos de gestão multicomunitárias (contempla várias comunidades) e unicomunitária (gestão isolada da comunidade). A pesquisa aqui desenvolvida, melhor se assemelha ao viés de gestão unicomunitária (por ser uma única comunidade), valendo ressaltar que não existe uma rede de distribuição de água comum aos domicílios, sob uma gestão compartilhada com uma liderança (ex.: associação). No presente estudo, existem mais de uma fonte de captação, por sistemas individualizados ou compartilhados por um pequeno conjunto de domicílios. Dessa forma, avaliou-se apenas a gestão operacional das fontes de abastecimento alternativas, e foi necessário adaptar alguns parâmetros propostos por Garrido *et al*. (2016).

A metodologia de avaliação também se baseia na observação direta do funcionamento do sistema e em entrevistas com os dirigentes e operadores

envolvidos (para a comunidade aqui estudada, as entrevistas foram realizadas com a população, sendo esses os próprios operadores). Os dados obtidos são traduzidos em parâmetros de avaliação, cada um com três classificações, variando da melhor situação (classificação A) até a pior (C), ou "não se aplica - NA" (Quadro 1).

Quadro 1 - Exemplo de classificação dos parâmetros para avaliação operacional da gestão do abastecimento de água

PARÂMETRO	**CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO**
COBERTURA DA REDE	a) Universal (total); b) Parcial; c) Sem rede (inexistente)
CONDIÇÃO DE ABASTECIMENTO	a) Contíguo (regular); b) Por manobra (intermitente); c) Racionado

Fonte: Garrido *et al.* (2016).

Foram utilizados 11 parâmetros para análise, conforme Apêndice B. Por fim, totalizaram-se os números de classificações A, B, C dos parâmetros avaliados para as fontes de abastecimento, relacionados a gestão operacional.

Para analisar as fragilidades e facilidades das fontes de abastecimento alternativos utilizados, foram analisadas as informações a seguir:

- A partir dos dados de caracterização da aluvião e dos obtidos na modelagem de fluxo de subterrâneo, foi possível avaliar a disponibilidade e as limitações de exploração do recurso subterrâneo, diante dos cenários observados. Por meio dos dados de qualidade da água monitorados, foi possível avaliar usos mais recomendados dessa água.
- Com a estimativa do volume aproveitável de água da chuva, e sua variação ao longo do ano, foi possível analisar alguns cenários de uso.
- Por meio do levantamento do questionário aplicado no apêndice A, foi possível verificar os principais usos associados a essas fontes de água.

Diante dos dados disponíveis dos recursos hídricos, foi possível apresentar considerações para melhor gestão destes, direcionando quais os usos recomendados para cada fonte de abastecimento alternativo.

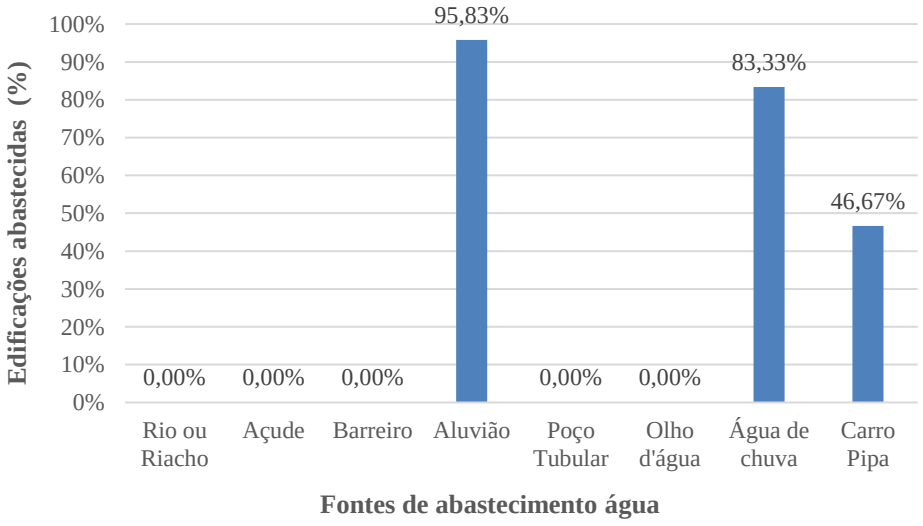
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FONTES DE ABASTECIMENTO, USO, DEMANDA E DESTINAÇÃO FINAL

4.1.1 Fontes de abastecimento alternativo

No Povoado Quandú, para o trecho do rio estudado, os dados coletados mostram que das 120 edificações, 97,5% (ou 117 edificações) são residências unifamiliares e apenas 2,5% (ou 3 edificações) são estabelecimentos comerciais. O número de pessoas por residências variou de 1 a 9 pessoas, com média de 3,65 pessoas/residência, valor acima da média nacional (3,0 pessoas/residência), da média nacional urbana (3,0 pessoas/residência) e da média nacional rural (3,2 pessoas/residência), de acordo com a pesquisa de orçamento familiar do IBGE (2019). Em relação à disponibilidade de água, apresenta-se na Figura 27 e no Apêndice C, as fontes de abastecimentos usadas na localidade, ressalta-se que quase todas as residências apresentaram mais de uma fonte de abastecimento.

Figura 27 - Fontes de abastecimento de água observados, Povoado Quandú - AL



Fonte: O Autor (2024).

Como se pode observar na Figura 27, o uso preponderante é de águas oriundas da aluvião, com percentual de 95,8%, seja, conforme descrito por Vasconcelos (2014), por poços amazonas/cacimbão ou cacimbas - poços escavados sem paredes de revestimento, as quais são armazenadas em reservatórios exclusivos para esta fonte de captação. Pelo percentual de uso de água de chuva, mostra-se que os moradores também fazem uso da água armazenada na cisterna, ou mesmo do carro pipa, abastecendo a cisterna nos períodos de maior seca. Não foram registradas captações

diretas em rios ou riachos, tendo sido esclarecido que esse procedimento ocorre apenas durante um curto período, que é imediatamente após as chuvas quando ocorre escoamento superficial no rio, constituindo uma prática esperada, dada a natureza temporária desse fenômeno. Além disso, não se observou a utilização de açudes, barreiros ou barragens, por não haver esses tipos de fontes próximas à comunidade. Caetano *et al*. (2020) identificaram as características de uso, as demandas e os tipos de mananciais hídricos mais relevantes em comunidades rurais no semiárido, para o trecho no Alto Rio Capibaribe, e encontrou situação similar. Os autores observaram que a utilização da aluvião estava presente em 97% dos casos, também não havendo captação diretas em rios e riachos, onde o trecho do rio estudado também era intermitente, e destacaram a ocorrência de outras fontes como barragens, barreiros, açudes e poços tubulares em menores proporções.

Não houve qualquer registro de fornecimento de água pela rede pública. Essa condição assemelha-se aos levantamentos de mananciais conduzidos por Mendonça *et al*. (2012) em comunidades no Sertão do Pajeú-PE e Caetano *et al*. (2020) em comunidades do semiárido pernambucano, onde também não foram identificados registros de abastecimento pela rede pública. Conforme relatado por Mendonça *et al*. (2012), todos os domicílios possuíam cisternas. Na atual pesquisa, isso ocorre em aproximadamente em 83,3% dos casos, que as cisternas são utilizadas para armazenamento de água de chuva e da água proveniente de carros pipas, muito próximo do estudo de Caetano *et al*. (2020), onde essa ocorrência representou aproximadamente 80,0%. Verificou-se ainda que, a maioria das cisternas (54%) são de 16.000 L, provenientes do Programa Um Milhão de Cisternas do Governo Federal, boa parte dos domicílios não souberam informar a capacidade da cisterna (33%), enquanto algumas são de 5.000 L (6%) e outras apresentaram tamanhos variados (7%).

Os dados do Censo 2010 para as comunidades rurais do Nordeste apresentam notáveis disparidades. Conforme dados do IBGE (2010), mais de 1/3 dos domicílios rurais na região são abastecidos por redes de distribuição, 38% são atendidos por poços, e apenas 14% utilizam cisternas (Landau; Moura; Luz, 2016). Embora os valores para Alagoas (31,2%, 37,8% e 16,6%, respectivamente) e Pernambuco (24,0%, 32,8% e 24,5%, respectivamente) se aproximem mais, ainda diferem consideravelmente dos registrados nesta pesquisa e dos apresentados por Mendonça

et al. (2012) e Caetano *et al*. (2020). Segundo esses últimos autores, duas conjecturas podem explicar essas discrepâncias, são estas: os dados do Censo abrangerem áreas rurais de todo o Nordeste, e não apenas as comunidades do semiárido; e a presença de núcleos concentrados com estruturas de abastecimento e maior densidade populacional, que pode causar distorções na média em comparação com a maioria das localidades.

O uso do aquífero aluvionar, como já citado, é realizado pela escavação de poços rasos (amazonas/cacimbão e cacimbas), e alguns desses são escavados e utilizados nas edificações por meio de um sistema individual (20%), tendo maiores ocorrências de casos em que os poços são utilizados de forma coletiva, os quais são compartilhados com familiares de outras residências ou vizinhos próximos, cuja motivação relatada é a redução do investimento da instalação/operação dos sistemas. Dos entrevistados que utilizam o sistema coletivo, a maioria respondeu sobre a quantidade das edificações que compartilham de um mesmo poço, variando de 2 a 25 edificações por poço coletivo, com média de 9,0 edificações por poço coletivo. A utilização de sistemas coletivos, pode ser explicada pelo fato dessa comunidade rural ter edificações muito próximas umas das outras, tendo uma alta densidade populacional, quando comparado a outras comunidades rurais, como é o caso da área estuda por Caetano *et al*. (2020).

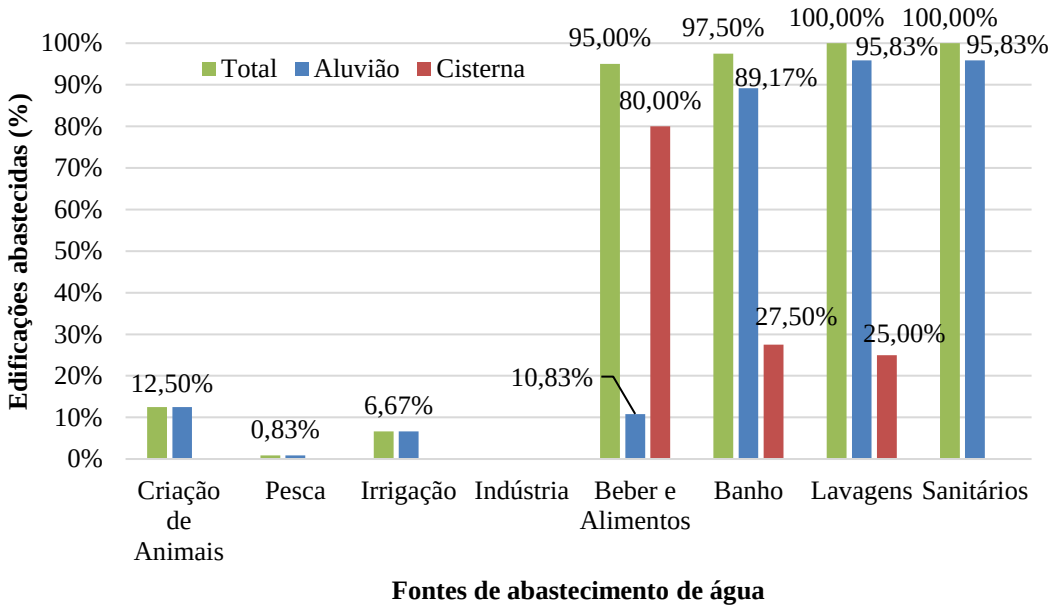
4.1.2 Finalidades de uso da água e demandas

As finalidades de utilização da água, Figura 28 e Apêndice C, podem ser categorizadas em três grupos principais: atividades domésticas essenciais (consumo e preparo de alimentos), atividades domésticas secundárias (banho, lavagens, descarga sanitária) e atividades produtivas (criação de animais e irrigação e pesca).

A água armazenada nas cisternas destina-se exclusivamente às atividades domésticas, especialmente às mais essenciais, conforme os seguintes percentuais: 80,0% das famílias usam para beber e para preparar alimentos; 27,5% usam para o banho; e 25,0% usam para lavagens de louças, roupas e pisos. Esses valores se aproximam da pesquisa de Caetano *et al*. (2020), na qual a água das cisternas é usada para beber e preparação de alimentos em mais de 70% dos casos, e para os usos domésticos secundários, em pouco mais de 20%. Nos usos domésticos secundários o que mais se usa é a água da aluvião. Observa-se que é utilizada para

as finalidades de banho (89,17%), lavagens de louças, roupas e pisos (95,83), e sanitários (95,83%). Caetano *et al*. (2020) também apresentaram na sua pesquisa valores semelhantes, encontrando um percentual maior que 80% dos casos de usos para essas finalidades, originada da aluvião.

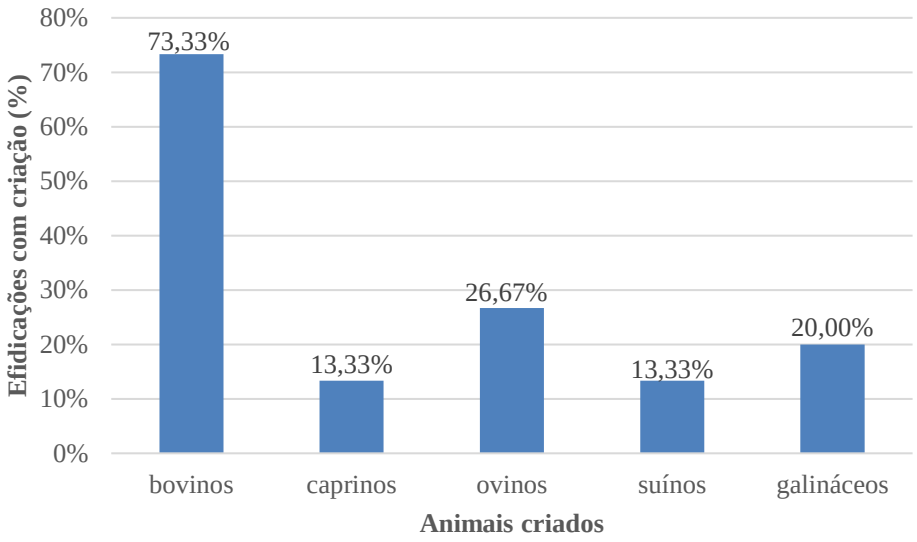
Figura 28 - Residências por finalidade de uso e origem da água, Povoado Quandú - AL



Fonte: O Autor (2024).

Nas atividades de irrigação e criação animal, a origem da água é exclusivamente da aluvião. Situação semelhante foi observada por Caetano *et al*. (2020), onde a principal origem também foi a aluvião, sendo utilizadas outras fontes (barragens e poços tubulares) em menores proporções. Mendonça *et al*. (2012) também indicaram as águas de poços como as mais usadas nas atividades produtivas, mas registraram que cerca de 1/4 das famílias usavam águas de cisternas de produção para este fim. A irrigação estava quase totalmente concentrada na produção de capim, destinada ao alimento dos animais, e em um dos casos foi registrado o cultivo de milho. Em relação à criação de animais, observa-se no cenário apresentado na Figura 29 e no Apêndice C, percentuais apenas sobre os que responderam ter criação de animais.

Figura 29 - Residências por animais criados, Povoado Quandú - AL



Fonte: O Autor (2024).

Das residências que afirmam realizar essa atividade produtiva (12,5%), observa-se que a criação de bovinos está presente na maior quantidade de casos, seguida de ovinos, galináceos, suínos e caprinos. Na pesquisa de Caetano *et al*. (2020), foi observado um maior percentual de entrevistados informando a criação de bovinos.

Determinar qual é a demanda real de água de uma comunidade é uma tarefa de difícil solução exata, e as dificuldades advêm de diferentes fatores. Como cita Caetano *et al*. (2020), em geral, não são as atividades desenvolvidas que estabelecem um determinado consumo como demanda de água, e sim a quantidade de água disponível é que estabelece as atividades, e em que intensidade. Também a quantificação do que é consumido pelas famílias nas suas atividades torna-se difícil porque, em geral, o consumo não é feito de forma regular e, menos ainda, medido.

A água da aluvião está presente em todas as finalidades de uso (Figura 22), constituindo a principal fonte de abastecimento e a mais demandada. Para fazer a estimativa de uso dessa água, coletou-se informações da quantidade de dias de bombeamento mensal para os usos domésticos, e dos volumes dos reservatórios que armazenam essa água, ressaltando que nem todos os entrevistados souberam informar. Verificou-se que quase todos os reservatórios são caixas d'água que variam de 250 à 4.000 L, com exceção de um único entrevistado que bombeia diretamente para uma cisterna de 16.000 L.

Foi possível estimar o consumo da água proveniente da aluvião por domicílio, e calcular a média *per capita* para a comunidade, considerando a média de pessoas por residência. Chegou-se a um valor médio de 264,74 L/domicílio/dia, e 72,53 L/dia/pessoa, que se encontra abaixo do consumo per capita do Nordeste (120,6 L/dia/pessoa) apresentado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020). Isso pode ser explicado, pelo fato dessa média abranger todo o Nordeste, e não apenas regiões semiáridas e/ou rurais, além de que o consumo calculado nessa pesquisa está relacionado com a água apenas da aluvião, tendo outras fontes de captação de água para os usos domésticos (mesmo que em menores proporções). Na Tabela 5 tem-se os dados dos consumos diários e mensais, sendo os consumos totais calculados considerando apenas a porcentagem de residências que fazem uso dessa fonte de abastecimento.

Tabela 5 - Demanda doméstica de água da aluvião, Povoado Quandú - AL

Consumo	**Quantitativo**
Por domicílio (L/dia)	264,74
Per capita (L/dia)	72,53
Total para comunidade (L/dia)	116.707,48
Total para comunidade (m³/mês)	3.501,22

Fonte: O Autor (2024).

A análise dos questionários revelou que, durante o período de pesquisa, há o uso da água da aluvião para a dessedentação dos animais. Com base nisso, a quantificação da demanda foi realizada para as espécies registradas. Como foi observado que 12,50% das residências têm atividade de criação de animais, isso equivale a 58 residências da comunidade. Foi então, estimado uma população de cada espécie de animal registrado, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Estimativa da população de animais criados, Povoado Quandú - AL

Espécie	**Média/ residência**	**População estimada**
Bovinos	0,73	43,00
Caprinos	0,13	8,00
Ovinos	0,27	15,00
Suínos	0,13	8,00
Galináceos	0,20	12,00

Fonte: O Autor (2024).

Por meio do consumo *per capita*, estimou-se o valor da demanda de água da aluvião, para ingestão dos animais, encontrando um valor de 1.856,00 L/dia, como é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Demanda produtiva para a criação de animais, Povoado Quandú - AL

Espécie	**Consumo *per capita* (L/dia)**	**População**	**Consumo diário (L)**
Bovinos	40	43,00	1720,00
Caprinos	3,00	8,00	24,00
Ovinos	3,00	15,00	45,00
Suínos	8,00	8,00	64,00
Galináceos	0,25	12,00	3,00
	Total para ingestão (L/dia)		1.856,00

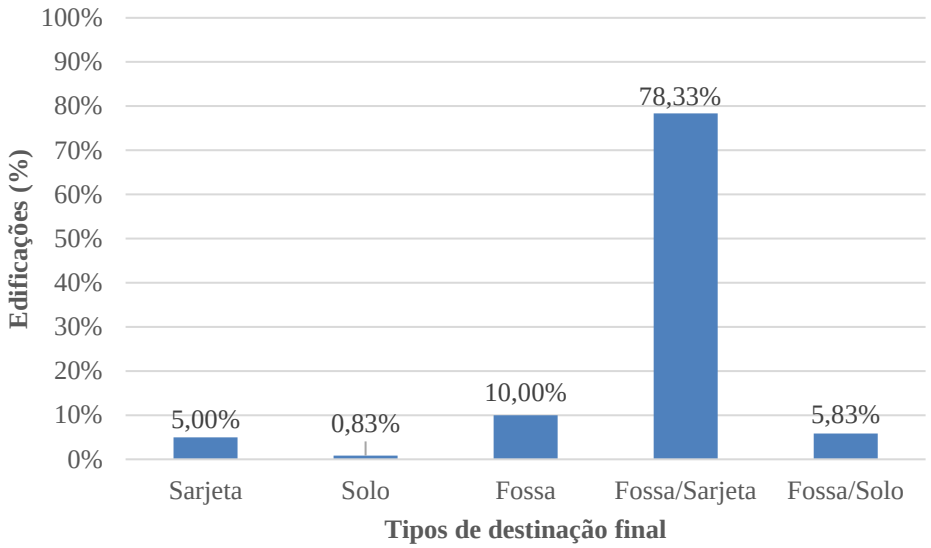
Fonte: O Autor (2024).

4.1.3 Destinação final da água residuária

Por meio do levantamento das informações relacionadas à destinação final das águas residuárias das edificações, obteve-se um panorama geral dos tipos de destinação utilizados. Todos os casos informaram não haver rede coletora de esgoto, informação que corrobora com os dados de Landau, Moura e Luz (2016), onde para as regiões rurais do Brasil esse atendimento é inferior a 3,11%.

A comunidade faz uso de sistemas individuais para coleta de esgoto, sendo os seguintes tipos de destinação final encontrados: fossa séptica; diretamente no solo; e diretamente na sarjeta. Dos casos que informaram utilizar a fossa séptica (88,33%), apenas 10,62% direcionam todo o esgoto para o sistema, enquanto a maioria (89,38%) direcionam apenas as águas negras para a fossa, sendo as águas cinzas lançadas na sarjeta ou solo. Sendo assim, foram considerados 5 principais tipos de destinação final: sarjeta, solo, fossa, fossa/sarjeta e fossa/solo. A destinação final por fossa/sarjeta apresentou uma maior frequência entre os casos (Figura 30).

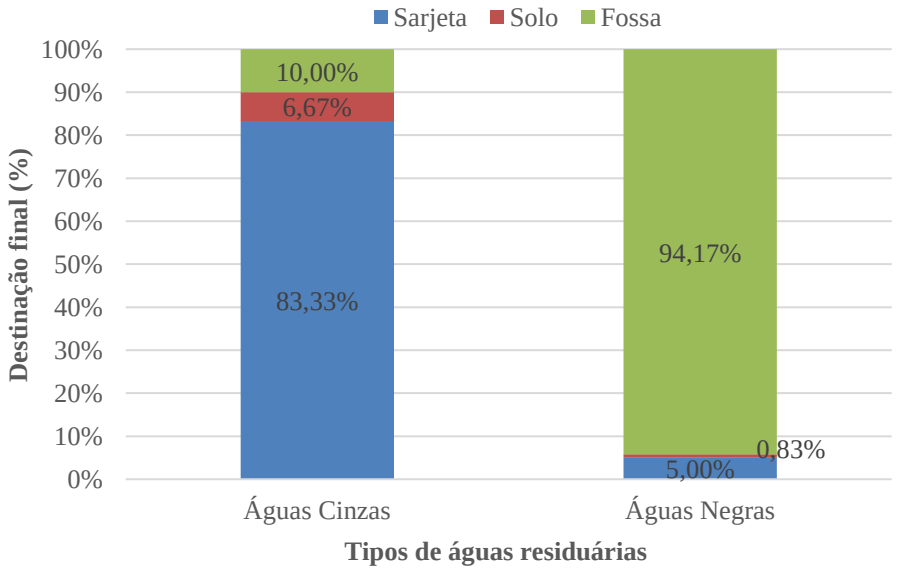
Figura 30 - Tipos de destinação final, Povoado Quandú - AL



Fonte: O Autor (2024).

Como a maior parte da comunidade, separa a destinação final das águas cinzas das águas negras, calculou-se o percentual desses dois tipos de resíduos que são direcionados diretamente para o solo, para a sarjeta e para a fossa séptica. Observou-se que a maior parte das águas negras (94,2%) são direcionadas para a fossa séptica, como também a maior parte das águas cinzas (83,3%) para a sarjeta (Figura 31 e Apêndice C).

Figura 31 - Tipos de águas residuárias por tipo de destinação final, Povoado Quandú - AL



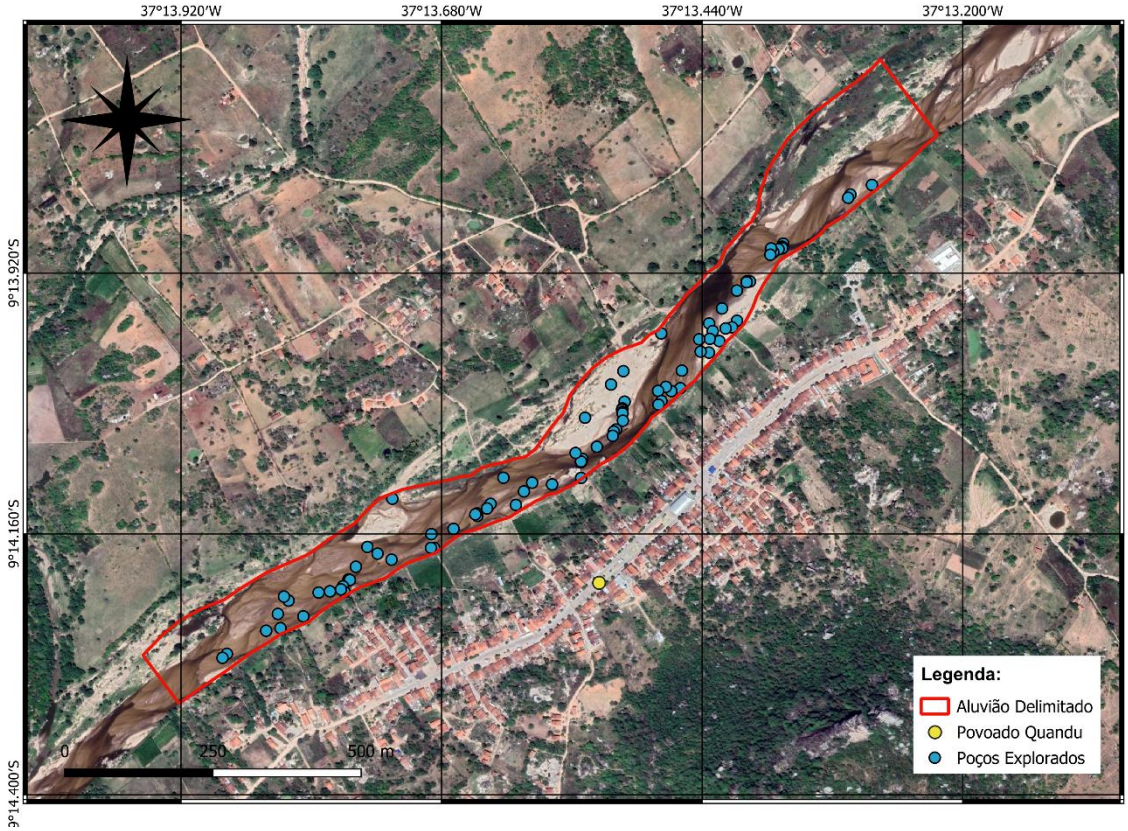
Fonte: O Autor (2024).

Sabendo que a comunidade está muito próxima desse trecho do Rio Ipanema, a rua principal que corta longitudinalmente a comunidade se encontra a uma distância desse que varia de 130 a 215 m, e que a comunidade possui altitude mais elevada que o trecho aluvionar, existe a possibilidade de parte dessas águas residuárias, chegarem a aluvião, podendo contaminá-la. Essa situação é preocupante, pois como visto, esta é a principal fonte de abastecimento de água da comunidade.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS DA ALUVIÃO

Por meio das visitas realizadas, coletou-se informações sobre os poços construídos nessa área. O levantamento registrou um total de 84 poços ao longo do trecho investigado, com extensão de 1.602,0 m. Por meio das coordenadas, foi possível observar a distribuição dos poços ao longo do trecho estudado, como apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Localização dos poços de bombeamento, na área de estudo



Fonte: O Autor (2024).

Do total de poços, 73 (representando 86,90% do total) foram identificados como do tipo amazonas (cacimbões), enquanto 11 poços (13,10% do total) foram

classificados como poços só escavados (cacimbas). Em um estudo similar para a aluvião do Alto Rio Capibaribe, Braga *et al.* (2016) também encontraram uma quantidade maior de cacimbões (84 poços) comparado as cacimbas (35), para uma extensão de 79,0 km.

As profundidades dos poços da área de estudo, variaram de 1,00 a 3,20 m (Tabela 8), com uma média de 1,89 m. Essa média é bem inferior a média encontrada por Braga *et al.* (2016), de 4,13 m, na aluvião do Alto Rio Capibaribe. Entretanto, o seu estudo foi realizado no período de janeiro a abril de 2014, período de seca na região, quando o leito do rio estava seco e o nível de água dos poços muito rebaixado. Vale ressaltar ainda que em 2014 a região estava passando por prolongado período de estiagem, isso pode justificar a necessidade de poços mais profundos, na maioria dos casos já atingindo o embasamento cristalino, diferente do observado aqui nesse estudo. Observa-se que os poços tipo cacimbão apresentaram um média de 1,94 m, superior à média das cacimbas que foi de 1,46 m.

Tabela 8 - Profundidade dos poços na aluvião, na área de estudo

Estatística	Cacimbão	Cacimba	Todos os poços
Máximo	3,20	2,00	3,20
Mínimo	1,00	1,00	1,00
Média	1,94	1,46	1,89
Desvio padrão	1,94	0,34	0,46

Fonte: O Autor (2024).

Alguns parâmetros estatísticos referentes aos diâmetros encontrados são apresentados na Tabela 9. Foi observado que os poços só escavados têm diâmetros maiores em comparação aos poços cacimbões. Apesar de ser conhecido que as cacimbas têm uma geometria irregular tanto na superfície quanto em profundidade, considerou-se um diâmetro representativo da área superficial da cacimba para efeitos de comparação entre eles com os cacimbões. Essa geometria irregular mostra que o processo construtivo não tem um padrão específico para a abertura da escavação. Uma abertura maior pode sugerir uma maior disponibilidade de água, pois há uma área superficial maior. No entanto, Braga *et al.* (2016) apontam que isso também aumenta os riscos relacionados à qualidade da água e à sua evaporação, devido à maior exposição da fonte hídrica.

Tabela 9 - Diâmetros dos poços na aluvião, na área de estudo

Estatística	Cacimbão	Cacimba	Todos os poços
Máximo	4,00	6,30	6,30
Mínimo	0,80	2,50	0,80
Média	1,24	4,39	1,66
Desvio padrão	1,24	1,18	1,22

Fonte: O Autor (2024).

Para os poços cacimbões, quase todos foram construídos por meio de alvenaria de blocos de cimento, totalizando 71 poços (97,26%), com exceção de dois poços, 1 construído de tijolo maciço (1,37%) e 1 de pedra argamassada (1,37%). As Figuras 33 e 34 apresentam exemplos dos diferentes tipos de poços encontrados na área. Braga *et al.* (2016), na sua área de estudo, indicaram que a maioria dos poços foram de alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, encontrando uma maior variação de materiais utilizados na construção dos poços: alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, alvenaria de tijolos cerâmicos de furos, anéis de concreto, alvenaria de pedras assentadas, cano de ferro, alvenaria de blocos de cimentos, composição de mais de um material.

Figura 33 - Exemplos de poços cacimbões construídos com blocos de cimento

a) Cacimbão aberto

b) Cacimbão fechado

Fonte: O Autor (2024).

Figura 34 - Exemplos de poços cacimbões construídos com outros materiais

a) Cacimbão de tijolo maciço

b) Cacimbão de pedra argamassada

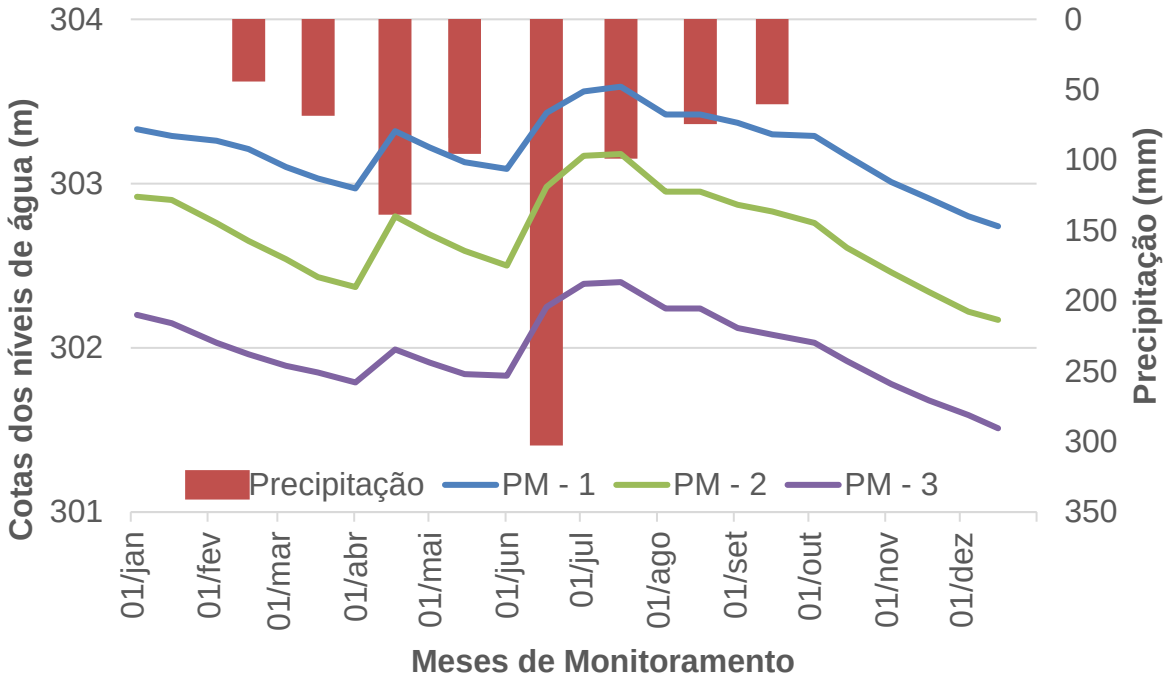
Fonte: O Autor (2024).

No que diz respeito à proteção sanitária, observou-se que 58,90% dos poços cacimbões estão desprovidos de qualquer tampa, tornando-os vulneráveis a várias fontes de contaminação, especialmente durante os períodos de cheias. Essa situação está profundamente enraizada na cultura local, uma vez que os habitantes da região tendem a negligenciar os problemas associados à ausência de tampa nos poços. Além disso, os largos diâmetros de alguns poços dificultam a instalação de uma tampa de proteção. Esse percentual é menor do que o observado por Braga *et al.* (2016), que na aluvião do Alto Rio Capibaribe, encontraram 81% dos poços cacimbões sem tampas, onde muitos acreditam erroneamente que a qualidade da água seria comprometida com a presença de uma tampa.

4.3 MONITORAMENTO DOS NÍVEIS DE ÁGUAS DOS POÇOS

Obteve-se a variação dos níveis de água, ao longo de um ano hidrológico, pelo monitoramento dos 3 poços de observação pré-selecionados. A Figura 35 apresenta as flutuações temporais do lençol ao longo do ano de 2023 para aluvião e a precipitação total em cada mês. Na ocorrência de precipitação, observa-se que o nível d’água dos poços sofre acréscimo, através da recarga do lençol subterrâneo.

Figura 35 - Variação temporal dos níveis de água e da precipitação, ao longo do ano de 2023, na área de estudo



Fonte: O Autor (2024).

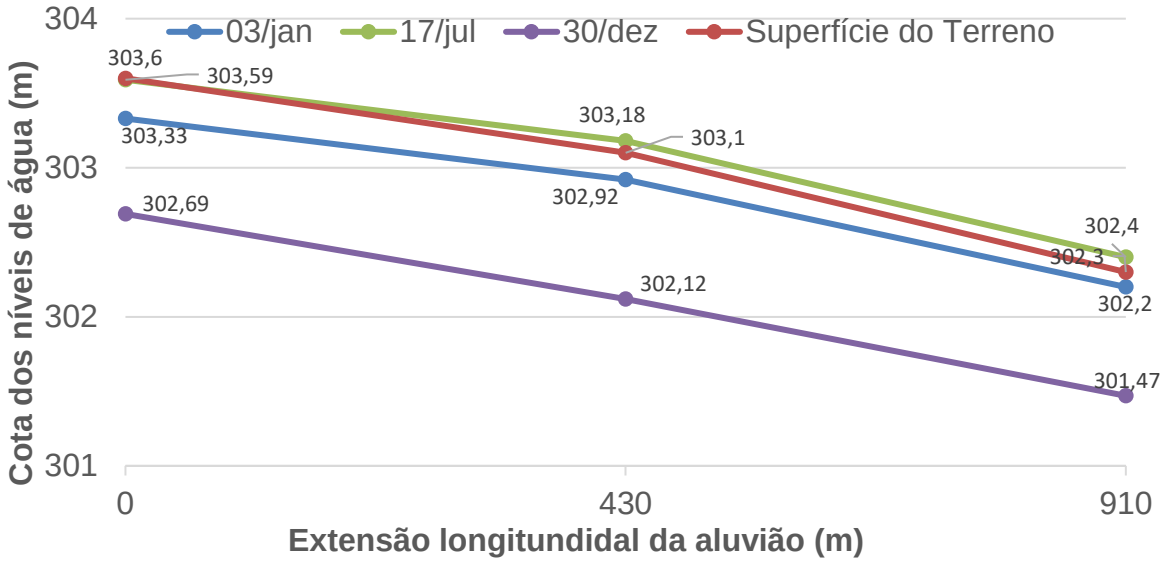
Nos meses que não houve precipitações, ou essas foram muito baixas, devido à constante extração de água pelos ribeirinhos, observa-se uma redução nos níveis dos três poços monitorados. O Poço PM-1, mais à montante, apresenta cotas dos níveis mais elevadas, comparadas aos demais poços, de acordo com a topografia e fluxo subterrâneo na aluvião. O Poço PM-3 é o que apresenta menores cotas dos níveis de água, estando mais à jusante do trecho. Ratificando, que a superfície potenciométrica segue o escoamento do fluxo de água subterrânea, de montante para jusante, como esperado.

Calculou-se a média mensal de rebaixamento, desconsiderando os meses que houve acréscimo dos níveis de água. Os dados revelam um rebaixamento médio mensal de 15,85 cm. Santos (2017), em um estudo similar em um trecho da aluvião no Rio Capibaribe, encontrou um rebaixamento médio de 11,50 cm, inferior ao aqui calculado. Sendo que o trecho da aluvião é de 9 km e a população ribeirinha, é menor e mais dispersa que no trecho aqui estudado, possuindo uma quantidade de poços de bombeamento bem inferior.

Para uma melhor visualização das cotas dos níveis de água ao longo do eixo longitudinal da aluvião, foram selecionados três dias de monitoramento (dia de início,

dias com maiores e menores registros de níveis de água) e apresentados na Figura 36. O Poço PM-1, se encontra na posição 0,00 da extensão longitudinal, seguido pelo Poço PM-2 na posição 430,00, e logo após está o Poço PM-3 na posição 910,00 m.

Figura 36 - Variação temporal dos níveis de água, ao longo do eixo longitudinal, na área de estudo



Fonte: O Autor (2024).

Os níveis de água são mais elevados à montante que à jusante, que como já mencionado, seguem o fluxo do rio. Verificou-se que no mês de julho, houveram maiores valores dos níveis de água, e a aluvião ficou totalmente saturada. Já no mês de dezembro, foram registrados os menores níveis nos poços monitorados, chegando a uma profundidade média de 0,87 m em relação ao nível do terreno.

4.4 QUALIDADE DA ÁGUA DA ALUVIÃO

Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas das amostras coletadas nos dois pontos C1 (à montante) e C2 (à jusante) estão apresentados na Tabela 10 e foram confrontados com os limites máximos estabelecidos pela Portaria GM/MS n° 888, de 4 de maio de 2021 (Brasil, 2021).

Os valores medidos de pH para as amostras de água coletadas estavam dentro da faixa permitida pela legislação. Para o parâmetro turbidez, nenhuma das amostras de água coletadas apresentou níveis elevados.

A temperatura é um parâmetro que a Portaria n. 888/2021 não estabelece limites para consumo humano, e os valores de temperatura para as duas amostras foram próximos, 17,1ºC para o Ponto C1 e 17,8ºC para o Ponto C2. O parâmetro de cor deve ser inferior a 15 (quinze) unidades, conforme estabelecido pela mesma Portaria. Logo, a análise revelou que o Ponto C1 está fora da faixa recomendada, enquanto o Ponto C2 está dentro da faixa recomendada. Vale ressaltar, que o Ponto C1 de coleta é de um poço sem cobertura, enquanto o Ponto C2 é um poço coberto, isso vai de encontro ao observado por Braga *et al.* (2016), que analisou a qualidade da água para a aluvião do Alto Rio Capibaribe, e observaram que os poços cobertos apresentaram menores valores de cor, que os sem coberturas.

Em relação à alcalinidade, os resultados indicam que os pontos estão dentro da faixa considerada normal, com valores variando de 140,00 a 170,00 mg/L de $CaCO_3$. Em geral, a maioria das águas naturais apresentam valores de alcalinidade na faixa de 30 a 500 mg/L de $CaCO_3$ (Brasil, 2014).

A amostras dos pontos C1e C2, apresentaram respectivamente 1287,00 e 1616,00 µS/cm para condutividade elétrica (CE). Esses valores superiores a 750 µS/cm) representam um alto risco de salinização para o uso em irrigação (classificadas como C3), conforme estabelecido pelo nomograma de classificação de águas para irrigação do *United States Salinity Laboratory* - USSL (Feitosa *et al*., 2008). De acordo com este mesmo nomograma, essas águas só podem ser utilizadas em solos bem drenados e com culturas altamente tolerantes à salinidade, como algodão, cevada, entre outras.

No que se refere à dureza, o Ponto C1 (à montante) ficou dentro da faixa permitida, apesar de muito próximo do limite de 300 mg $CaCO_3$ /L, enquanto o Ponto C2 (à jusante) apresentou valor superior ao permitido pela Portaria n. 888/2021 (ANVISA, 2021). Verifica-se que, com base nos valores encontrados, estas podem ser classificadas como águas muito duras, por apresentarem valores acima de 200 mg/L. De acordo com Custódio e Llamas (1983), em relação aos critérios de dureza, a água pode ser categorizada da seguinte forma: branda (concentração de $CaCO_3$ menor ou igual a 50 mg/L), pouco dura (concentração de CaCO3 entre 50 e 100 mg/L), dura (concentração de $CaCO_3$ entre 100 e 200 mg/L) e muito dura (concentração de $CaCO_3$ maior que 200 mg/L). Braga *et al.* (2016), encontraram valores que variaram de 572

a 1.776 mg $CaCO_3$/L, acima do limite permitido e dos valores aqui encontrados para as amostras aqui analisadas.

Tabela 10 - Qualidade da água na aluvião estudada, para os pontos analisados, em 28/02/2023

Parâmetros	**Amostras**		**Portaria n° 888/21**
	Ponto C1	Ponto C2	
Alcalinidade total (mg $CaCO_3$/L)	140,00	170,00	N.A
Alumínio (mg Al/L)	0,00	0,00	< 0,20
Amônia (mg NH_3/L)	0,05	0,05	< 1,20
Cálcio (mg Ca/L)	60,00	72,00	N.A
Cloretos (mg Cl/L)	180,00	200,00	< 250,00
Cloro residual livre (mg/L)	0,11	0,09	0,50 - 5,00
Condutividade elétrica (µS/cm)	1287,00	1616,00	N.A
Cor aparente (uH)	20,3	13,3	< 15,0
Dureza total (mg $CaCO_3$/L)	280,00	350,00	< 300,00
Ferro total (mg Fe/L)	0,24	0,29	< 0,30
Magnésio (mg Mg/L)	31,20	40,80	N.A
Manganês (mg Mn/L)	0,19	0,09	< 0,10
Nitrato (mg NO_3/L)	0,64	0,30	< 10,00
Nitrito (mg NO_2/L)	0,00	0,03	< 1,00
pH	8,16	8,05	6,00 a 9,00
Potássio (mg K/L)	7,78	2,80	N.A
Sódio (mg Na/L)	240,00	300,00	< 200,00
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	644,00	808,00	< 500,00
Sulfato (mg SO4/L)	17,78	26,29	< 250,00
Sulfeto de hidrogênio (mg H_2S/L)	0,00	0,00	< 0,05
Temperatura °C	17,3	17,8	N.A
Turbidez NTU	0,0	0,0	< 5,0
Zinco (mg Zn/L)	0,00	0,00	< 5,00
Escherichia coli (NMP/100 mL)	>8,00	>8,00	AUS./100ML
Coliformes totais (NMP/100 mL)	>8,00	>8,00	AUS./100ML

Fonte: O Autor (2024).

Quanto aos cloretos, a legislação estipula um limite máximo de 250,0 mg/L como aceitável para água potável. Com base nos resultados obtidos, as duas

amostras avaliadas apresentaram valores inferiores, mas relativamente próximo do limite. Segundo Martins *et al.* (2007), as altas concentrações de sais nas águas dos aquíferos aluvionares da região do Ceará, assim como em grande parte da área de predominância do embasamento cristalino, é o fato de que as aluviões geralmente atuam como zonas naturais de descarga do aquífero fraturado do embasamento.

Os poços amostrados fornecem água bruta à comunidade e, portanto, possuem teores de cloro livre na água, baixos para os dois pontos coletados. De acordo com a recomendação da Portaria de Potabilidade, é sugerido que haja um teor de cloro livre na faixa de 0,5 a 5,0 mg/L como medida para inibir a presença de bactérias.

Para o teor de ferro total, observou-se que as duas amostras coletadas estão dentro do limite máximo permitido pela Portaria (0,3 mg/L). Apesar dos valores amostrados serem relativamente baixos, segundo Rodrigues *et al.* (2019), nos vales aluviais é comum a presença de ferro na forma de bicarbonato ferroso dissolvido na água. Em seu estudo, Braga *et al.* (2016) encontraram valores que variaram de 0,10 a 1,61 mg/L, predominando, entretanto, valores superiores ao permitido para água potável.

Em relação aos parâmetros de alumínio, amônia, sulfato, sulfeto de hidrogênio e zinco, todos estão abaixo dos limites permitidos pela portaria de potabilidade, para as duas amostras. Os parâmetros de nitrato, nitrito também estiveram abaixo do que é recomendado para água potável, como foi observado também por Braga *et al.* (2016), na análise desses parâmetros para a aluvião da sua área de estudo.

Os níveis de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) das duas amostras ultrapassam os 500 mg/L, indicando a ausência de água doce disponível na aluvião. As duas amostras indicam que a água disponível é salobra, conforme a faixa de valores (entre 500 e 1500 mg/L) citada por Martins *et al.* (2007). Esses autores apontam que nos vales aluviais na região do Ceará, por eles estudados, a maioria das amostram também se classificam como salobras.

Quanto aos parâmetros bacteriológicos, ao examinar os dados apresentados na Tabela 8, observa-se que, em comparação com os padrões de potabilidade que regulam a qualidade da água para consumo humano, foi constatada a presença bacteriológica na água nos pontos de coletas analisados. Verificou-se nos dois pontos amostrados, valores > 8 NMP para *Escherichia coli* e coliformes totais, indicando uma ocorrência leve de contaminação. Embora tenha sido encontrado em pequenas

quantidades, é importante destacar que, segundo Silva (2019) quando detectado isoladamente, o indicador de coliformes totais tem um valor sanitário limitado, no entanto, quando detectado em conjunto com a presença de *Escherichia coli*, isso sugere a necessidade imediata de tomar medidas de controle para garantir a qualidade da água destinada ao consumo humano. Braga *et al.* (2016) encontraram valores elevados de coliformes totais (≥ 2419,2 NMP/100 mL) em todos as amostras analisadas e concentrações de coliformes termotolerantes (*Escherichia coli*) variando de 1 a 4.000 NMP/100 mL.

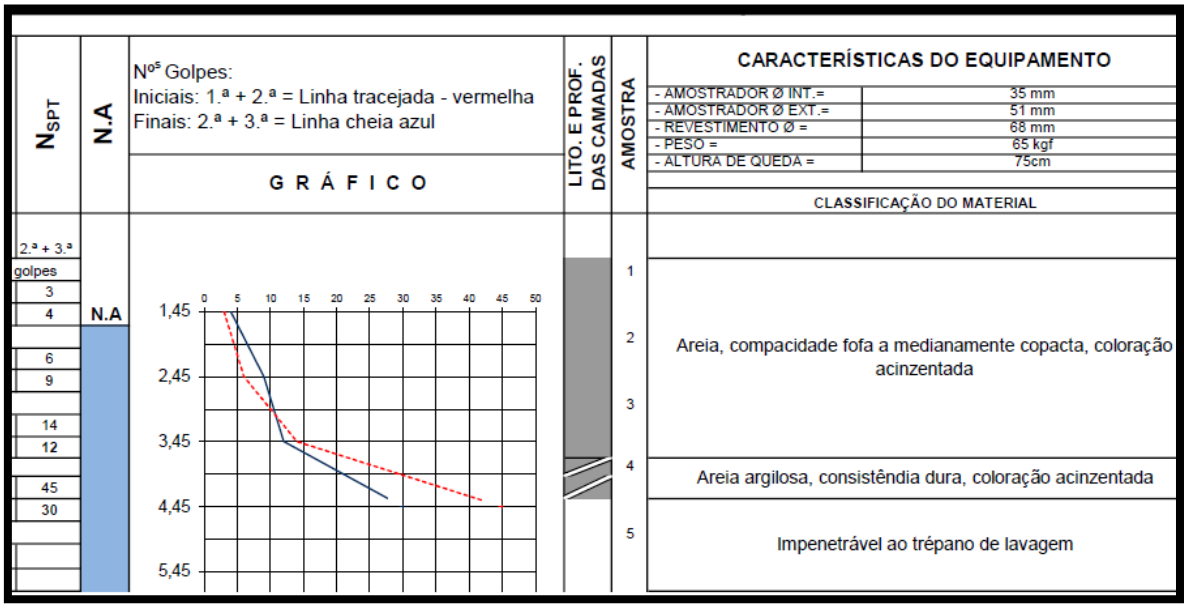
A detecção dos indicadores pode sugerir deficiências ou inadequações no processo de tratamento, o que reflete a situação dessa fonte de abastecimento. Isso ocorre devido à ausência de tratamento com agentes desinfetantes na água proveniente dos poços.

Como os dados analisados, foram referentes à uma única campanha de coleta, tendo apenas duas amostras, os resultados mostram a qualidade da água de um determinado dia, e dão um indicativo da qualidade da água da aluvião. Entretanto, para uma melhor análise da variação dos parâmetros ao longo do ano, seria necessário um monitoramento sazonal, pois é provável que ocorra variação dos parâmetros do período chuvoso para o período de estiagem, como mostram os trabalhos de Martins *et al.* (2007), Albuquerque *et al.* (2008), Braga *et al.* (2016) em suas diferentes áreas de estudos, em vales aluviais.

4.5 PROFUNDIDADE E PERFIL LOTOLÓGICO DA ALUVIÃO

A partir dos furos de sondagem realizados em campo, foi possível construir os perfis de sondagens para os três pontos. O Ponto P1 (mais a montante) é representado pela Figura 37, na qual pode-se observar uma camada de areia fofa à medianamente compacta, acinzentada, de 1,00 a 4,00 metros de profundidade. Após essa camada, visualiza-se uma camada de menos espessa de areia argilosa, com presença de pedregulhos, dura, acinzentada, de 4,00 a 4,30 de profundidade, onde não foi possível mais a penetração do equipamento de sondagem. Vale ressaltar que a sondagem SPT, desconsidera o primeiro metro de profundidade, a partir da superfície do terreno, sendo o equipamento posicionado à partir de 1,00 de profundidade.

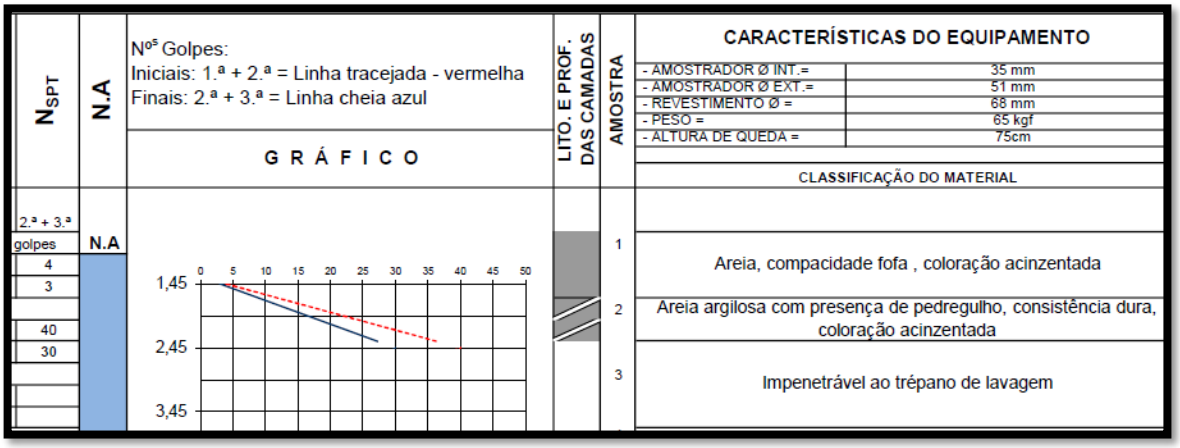
Figura 37 - Perfil de sondagem do furo P1, na aluvião estudada, Rio Ipanema - AL



Fonte: O Autor (2024).

O Ponto P2 (intermediário) é representado pela Figura 38, na qual pode-se observar uma camada de areia fofa, acinzentada, de 1,00 a 2,00 metros de profundidade. Após essa camada, visualiza-se uma camada de menos espessa de areia argilosa, dura, acinzentada, de 2,00 a 2,30 de profundidade, onde não foi possível mais a penetração do equipamento de sondagem.

Figura 38 - Perfil de sondagem do furo P2, na aluvião estudada, Rio Ipanema - AL

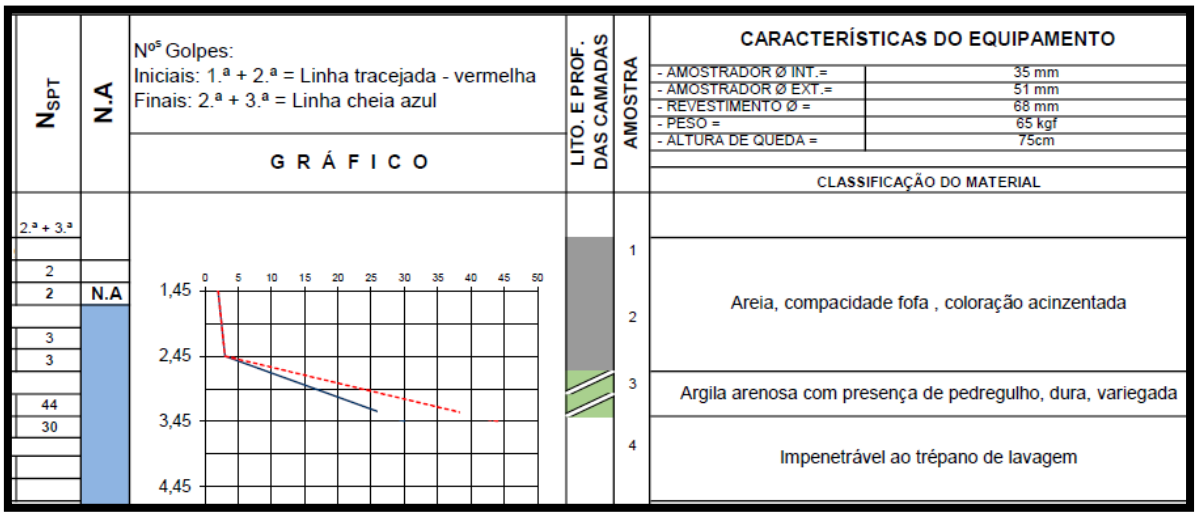


Fonte: O Autor (2024).

O Ponto P3 (mais à jusante) é representado pela Figura 39, na qual pode-se observar uma camada de areia fofa, acinzentada, de 1,00 a 3,00 metros de

profundidade. Após essa camada, visualiza-se uma camada de menos espessa de argila arenosa, com presença de pedregulho, dura, variegada, de 3,00 a 3,15 de profundidade, onde a penetração do equipamento de sondagem atingiu maior profundidade.

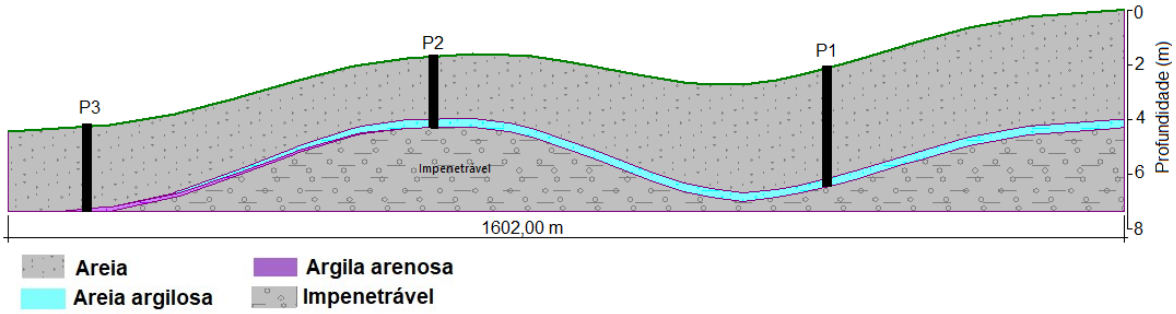
Figura 39 - Perfil de sondagem do furo P3, na aluvião estudada, Rio Ipanema - AL



Fonte: O Autor (2024).

A partir dos furos de sondagem realizados em campo, foi possível construir uma seção longitudinal da aluvião, com o intuito de compreender a distribuição dos estratos e a geometria do aquífero (Figuras 40).

Figura 40 - Seção longitundinal da aluvião, no trecho estudado



Fonte: O Autor (2024).

Apesar de aluvião apresentar pouca heterogeneidade ao longo da profundidade, os sedimentos foram agrupados em camadas. No perfil se podem visualizar as relações verticais e horizontais entre elas. A Camada 1, descrita como

areia fofa de coloração acinzentada, é o sedimento mais frequente e aparece em todos os pontos desde o topo do depósito de forma contínua até próximo do embasamento cristalino, apresentando uma camada mais espessa, que predomina no pacote aluvionar. Já a Camada 2, descrita como areia argilosa, acinzentada, dura, encontra-se na porção basal e de forma descontínua, sendo observada em duas sondagens (P1 e P2). Possivelmente estes sedimentos mais finos estão dispostos na forma de lente. Já no furo de sondagem P3, há a Camada 3, uma argila arenosa, com presença de pedregulhos, dura. Sendo essas duas últimas fácies, uma camada menos espessa e menos representativa do pacote aluvionar, estando sobre o embasamento cristalino.

A profundidade média da aluvião foi de 3,25 metros de profundidade, sendo menor que a profundidade média, encontrada por Caetano *et al.* (2020), que caracterizaram a camada aluvial, para um trecho no Alto Rio Capibaribe, e encontrando uma média de 3,61 m. A profundidade média aqui encontrada, ficou mais próximo da profundidade média encontrada por Martins *et al.* (2007), que teve como área de estudo a região abrangida pela Folha SB.24-X-A-IV/Itapiúna – Ceará, no qual as aluviões da área do projeto encontram-se ao longo de, aproximadamente 3.060 km de rios e riachos, e por meio de 68 furos de sondagens obteve-se uma média geral de 2,91 m de profundidade, com variações de 1,10 a 7,00 m de profundidade.

4.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DA ALUVIÃO

4.6.1 Análise granulométrica

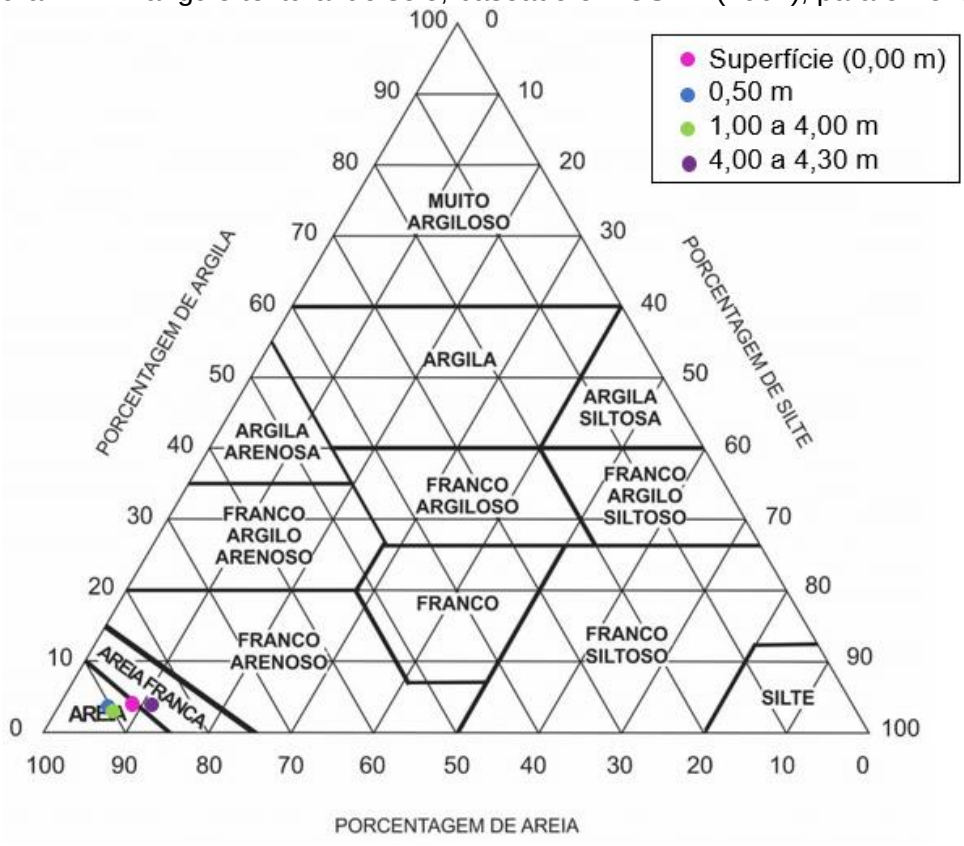
Por meio das amostras coletadas nos três pontos, construiu-se as curvas granulométricas em diferentes profundidades, e foram classificadas de acordo com o diagrama triangular proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA (1967), que é adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência dos Solos (SBCS). Os resultados dos ensaios de granulometria do conjunto de amostras do Ponto P1, estão representados na Tabela 11, com as suas respectivas porcentagens de areia, silte e argila. Pode-se observar as quatro amostras na Figura 41, distribuídas entre as classes texturais de areia e areia franca.

Tabela 11 - Percentuais de areia, silte e argila no Ponto 1, aluvião do Rio Ipanema - AL

Profundidade (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação
Superior (0,00)	4,66	8,18	87,16	Areia
0,50	3,93	5,71	90,33	Areia
1,00 a 4,00	3,80	5,99	90,21	Areia
4,00 a 4,30	4,35	10,38	85,27	Areia Franca

Fonte: O Autor (2024).

Figura 41 - Triângulo textural do solo, baseado em USDA (1967), para o Ponto 1

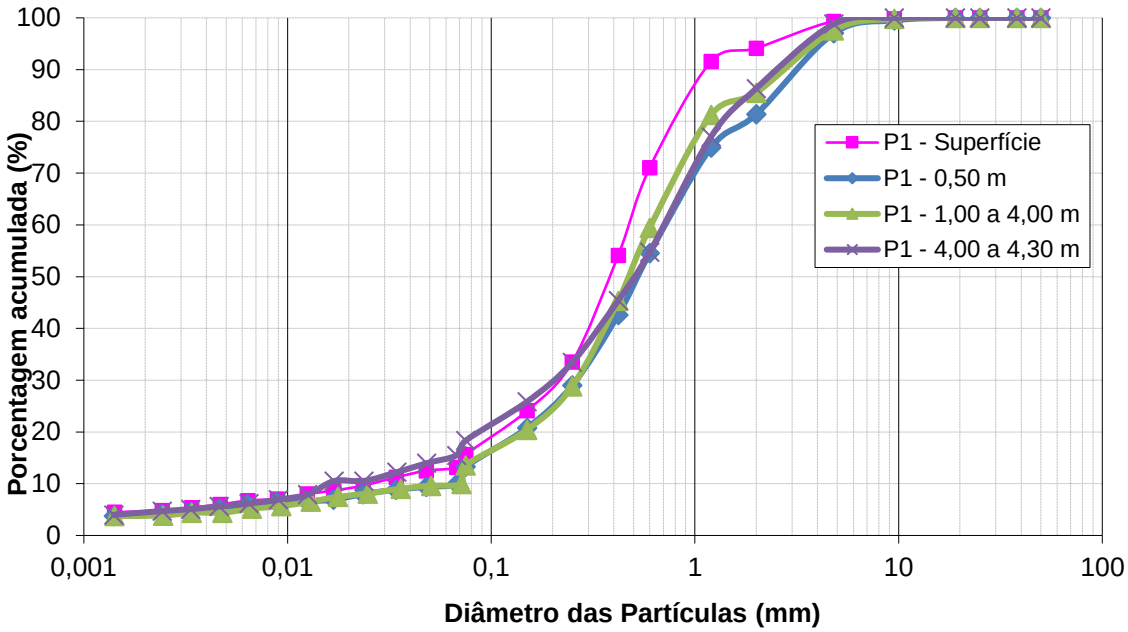


Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 42, observam-se as curvas granulométricas do Ponto P1, ensaiado. Verifica-se que as classificações texturais são semelhantes, uma vez que as frações granulométricas de areia, silte e argila apresentam pouca variabilidade entre as amostras. Nas quatro amostras analisadas para esse ponto, verificou-se que as porcentagens de areia apresentam um valor maior que 85%. Além disso, nota-se que as curvas granulométricas para as profundidades apresentam formatos similares. Esta condição da curva indica que as amostras apresentam características semelhantes,

indicando que quase não existe heterogeneidade textural da aluvião ao longo da profundidade. Esta é uma característica das aluviões.

Figura 42 - Curvas granulométricas, para as amostras do Ponto P1



Fonte: O Autor (2024).

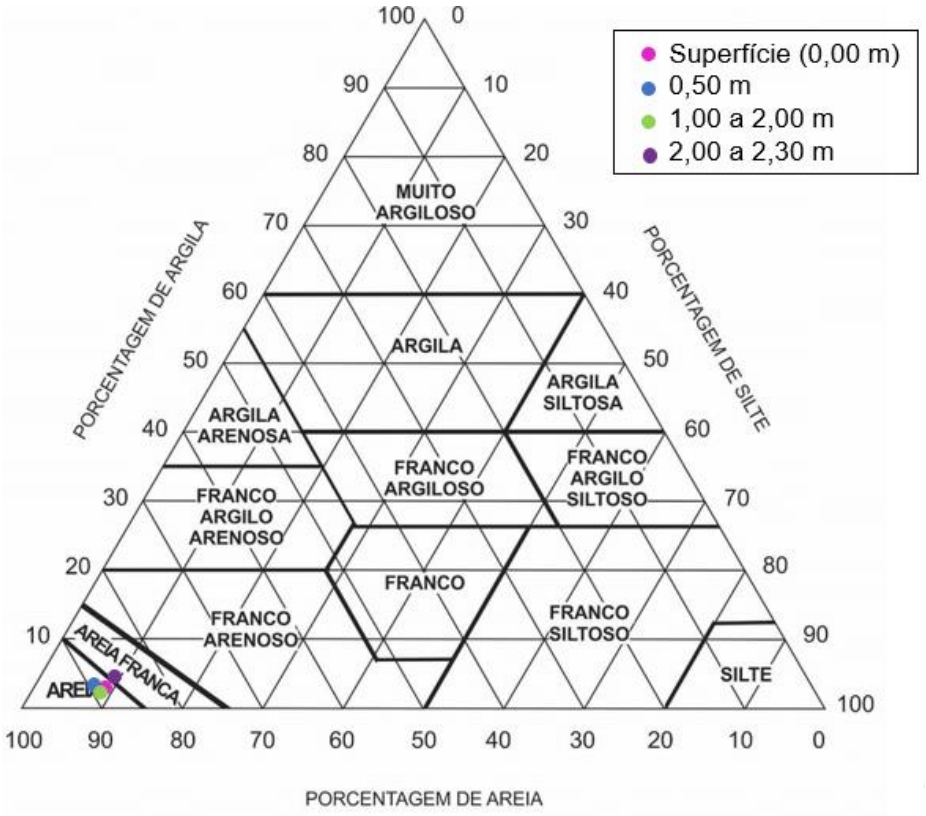
O conjunto de amostras do Ponto P2 estão representados na Tabela 12, com as suas respectivas proporções de areia, silte e argila. A classificação textural, foi semelhante à do Ponto P1. Na Figura 43, observam-se as quatro amostras plotadas de acordo com sua classe textural, também distribuídas entre areia e areia franca, sendo essa última mais próxima do embasamento cristalino.

Tabela 12 - Percentuais de areia, silte e argila no Ponto 2, aluvião do Rio Ipanema - AL

Profundidade (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação
Superior (0,00)	3,63	8,16	88,21	Areia
0,50	3,21	7,24	89,55	Areia
1,00 a 2,00	2,98	8,09	88,94	Areia
2,00 a 2,30	4,68	8,36	86,95	Areia Franca

Fonte: O Autor (2024).

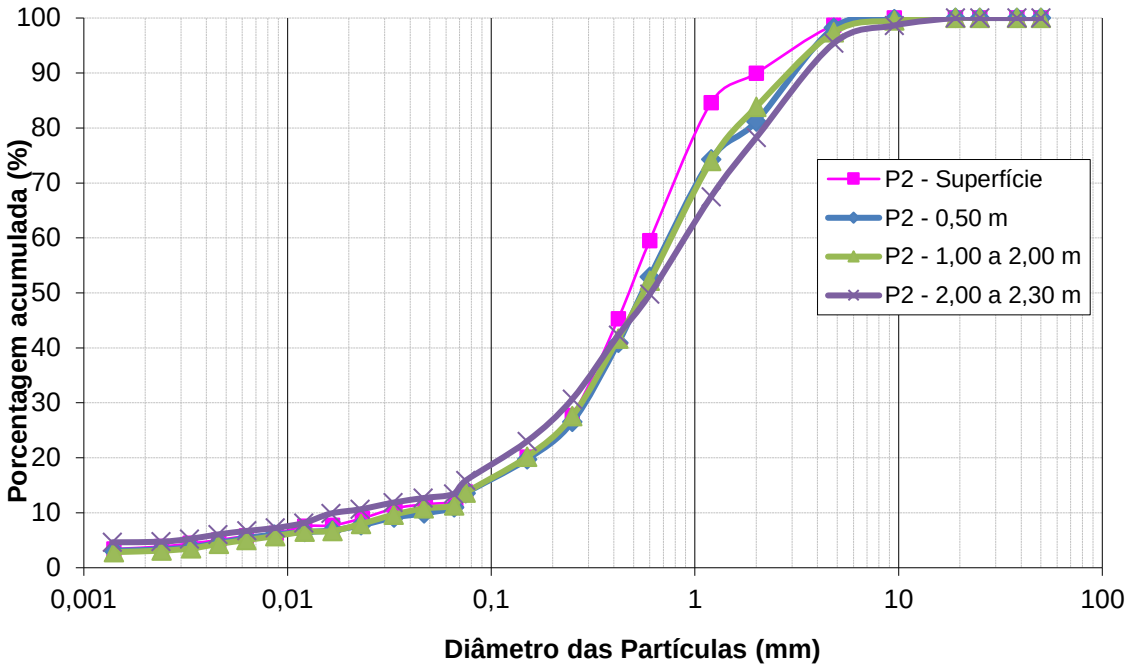
Figura 43 - Triângulo textural do solo, baseado em USDA (1967), para o Ponto 2



Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 44 estão exibidas as curvas granulométricas no Ponto P2 para as diferentes profundidades ensaiadas. Verifica-se que as classificações texturais, das amostras, também são semelhantes, pois as frações granulométricas de areia, silte e argila apresentam pouca variabilidade. Nas quatro amostras obtidas, para esse ponto, constatou-se que as porcentagens de areia apresentam um percentual maior que 86%. Nota-se também, que as curvas granulométricas para as profundidades apresentam formatos semelhantes, indicando que quase não existe heterogeneidade textural da aluvião ao longo da profundidade. A amostra mais próxima do embasamento cristalino, apresenta um percentual ligeiramente maior para os diâmetros das frações mais finas (silte e argila), que é observado também no ponto P1.

Figura 44 - Curvas granulométricas, para as amostras do Ponto P2



Fonte: O Autor (2024).

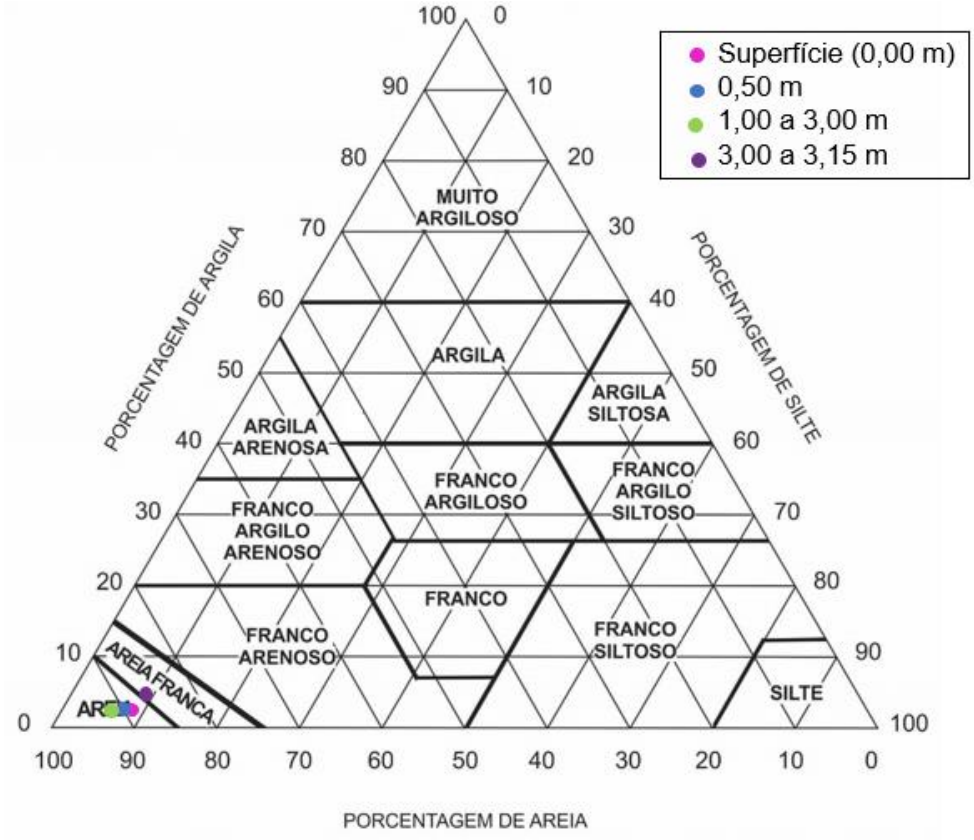
Os resultados observados para o conjunto de amostras do Ponto P3, estão expostos na Tabela 13. As porcentagens de areia, silte e argila encontradas nas quatro amostras classificam o solo em classes texturais similares às dos pontos P1 e P2. Na Figura 45, as quatro amostras estão representadas de acordo com sua classe textural, também evidenciando uma distribuição entre areia e areia franca. Em estudos similares, em trechos do Alto Rio Capibaribe, Santos *et al.* (2020) e Brito *et al. (2018)* encontraram para diferentes profundidades da aluvião, classes texturais para as amostras, variando entre areia, areia franca e franco arenosa.

Tabela 13 - Percentuais de areia, silte e argila no Ponto 3, aluvião do Rio Ipanema - AL

Profundidade (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação
Superior (0,00)	3,08	8,03	88,89	Areia
0,50	3,26	7,31	89,43	Areia
1,00 a 3,00	3,00	5,15	91,85	Areia
3,00 a 3,15	5,42	7,69	86,90	Areia Franca

Fonte: O Autor (2024).

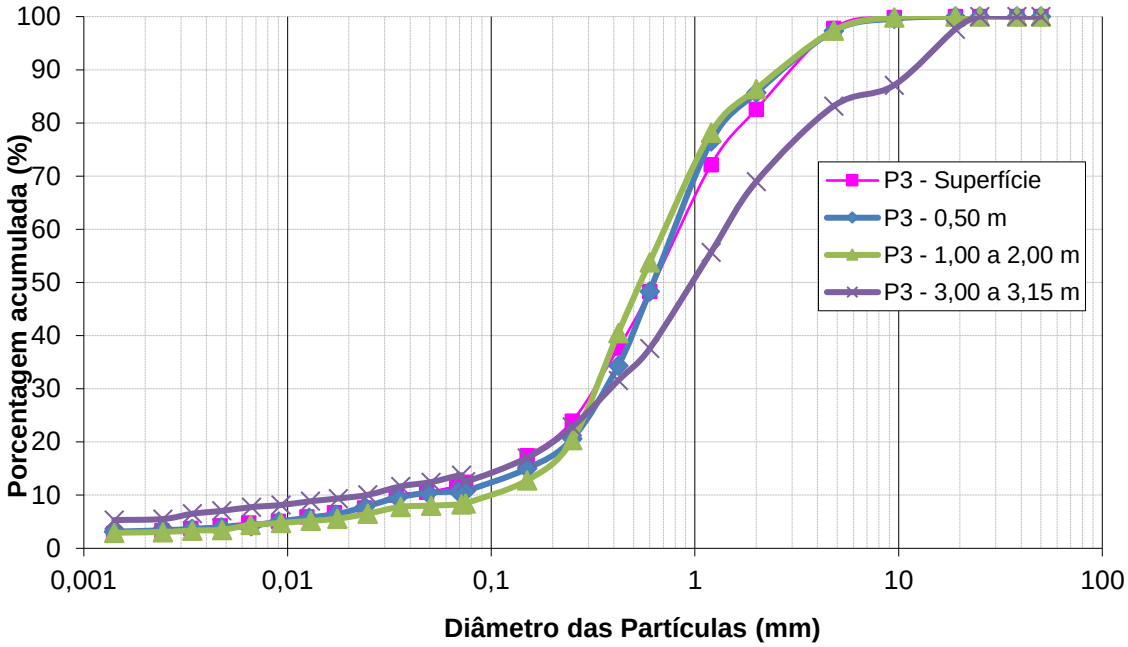
Figura 45 - Triângulo textural do solo, baseado em USDA (1967), para o Ponto 3



Fonte: O Autor (2024).

A curva granulométrica no Ponto P3 foi obtida, conforme Figura 46. Nas quatro amostras ensaiadas, para esse ponto, foi verificado que as porcentagens de areia apresentam um valor maior que 86%. É possível verificar também, que as curvas granulométricas para as profundidades apresentam formatos similares, indicando que quase não existe heterogeneidade textural da aluvião ao longo da profundidade, como observado para os pontos P1 e P2. A amostra mais próxima do embasamento cristalino, apresenta comportamento similar aos pontos P1 e P2, apresentando um percentual ligeiramente maior para os diâmetros das frações mais finas (silte e argila).

Figura 46 - Curvas granulométricas, para as amostras do Ponto P3



Fonte: O Autor (2024).

Os três pontos ensaiados, mostram que não existe heterogeneidade significativa, longitudinalmente, ao longo da aluvião para esse trecho estudado. Observa-se também que ao longo da profundida para os três pontos, existe pouca variação dos percentuais de argila, silte e areia, ao longo da profundidade, o que também foi evidenciado por Santos *et al.* (2020) e Brito *et al. (2018)* nos seus estudos, para a aluvião do Rio Capibaribe. Além disso, uma camada de espessura reduzida próxima ao embasamento cristalino revela um percentual ligeiramente maior de partículas finas, o que está em consonância com os resultados dos ensaios de sondagem SPT realizados nos três pontos ensaiados.

4.6.2 Parâmetros hidrodinâmicos

Por meio das curvas granulométricas, determinou-se os diâmetros das partículas de solo a 10% e 60% do peso acumulado e foram calculados os coeficientes de uniformidade, para os três pontos ensaiados, para as diferentes profundidades. Os respectivos valores de porosidade total, porosidade efetiva e condutividade hidráulica foram estimados, baseado em Vukovic e Soro (1992), Poulsen *et al.* (1999) e Carman (1937; 1956), respectivamente. As Tabelas 14, 15, 16 apresentam esses parâmetros para o ponto P1, P2 e P3, respectivamente.

Tabela 14 - Parâmetros para o cálculo da condutividade hidráulica para o Ponto 1

Prof. (m)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	n	n_e	K (cm/h)	K (cm/s)
Superior	0,026	0,483	18,62	0,26	0,08	0,66	$1,83x10^{-4}$
0,50	0,068	0,760	11,21	0,29	0,17	6,23	$1,73x10^{-3}$
1,00 a 4,00	0,072	0,615	8,60	0,31	0,20	8,96	$2,49x10^{-3}$
4,00 a 4,30	0,016	0,741	46,14	0,26	0,05	0,23	$6,27x10^{-5}$

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: Prof. - Profundidade, D_{10} - diâmetros das partículas de solo correspondente a 10% do peso acumulado, D_{60} - diâmetros das partículas de solo correspondente a 60% do peso acumulado, Cu – Coeficiente de uniformidade, n – porosidade total, n_e – porosidade efetiva, K – Condutividade hidráulica.

Tabela 15 - Parâmetros para o cálculo da condutividade hidráulica para o Ponto 2

Prof. (m)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	n	n_e	K (cm/h)	K (cm/s)
Superior	0,029	0,612	21,10	0,26	0,08	0,79	$2,20x10^{-4}$
0,50	0,049	0,799	16,48	0,27	0,12	2,43	$6,76x10^{-4}$
1,00 a 2,00	0,037	0,815	21,84	0,26	0,10	1,30	$3,60x10^{-4}$
2,00 a 2,30	0,017	0,947	54,25	0,26	0,06	0,27	$7,40x10^{-5}$

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: Prof. - Profundidade, D_{10} - diâmetros das partículas de solo correspondente a 10% do peso acumulado, D_{60} - diâmetros das partículas de solo correspondente a 60% do peso acumulado, Cu – Coeficiente de uniformidade, n – porosidade total, n_e – porosidade efetiva, K – Condutividade hidráulica.

Tabela 16 - Parâmetros para o cálculo da condutividade hidráulica para o Ponto 3

Prof. (m)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	n	n_e	K (cm/h)	K (cm/s)
Superior	0,034	0,895	26,21	0,26	0,09	1,05	$2,91x10^{-4}$
0,50	0,042	0,848	20,28	0,26	0,11	1,66	$4,62x10^{-4}$
1,00 a 3,00	0,101	0,752	7,41	0,32	0,27	21,11	$5,87x10^{-3}$
3,00 a 3,15	0,024	1,460	60,40	0,26	0,07	0,51	$1,42x10^{-4}$

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: Prof. - Profundidade, D_{10} - diâmetros das partículas de solo correspondente a 10% do peso acumulado, D_{60} - diâmetros das partículas de solo correspondente a 60% do peso acumulado, Cu – Coeficiente de uniformidade, n – porosidade total, n_e – porosidade efetiva, K – Condutividade hidráulica.

Todos os pontos amostrados, foram classificados como desuniforme para todas as amostras superficiais, já para as amostras de profundidades intermediárias, a uniformidade variou de medianamente uniforme à desuniforme, que vai de encontro a classificação encontrada por Caetano *et al.* (2020) para algumas amostras da aluvião do Rio Capibaribe em Pernambuco. As amostras mais profundas, próximas ao embasamento cristalino, apresentam maior desuniformidade, estando bem distante do limite de classificação como medianamente uniforme (15) da ABNT (1995), indicando que não há uma boa graduação dos grãos, podendo ser devido à presença de um percentual maior de finos (silte e argila) e pedregulhos, comparado à outras amostras.

Os valores de condutividade hidráulica (Tabela 14, 15 e 16) variaram de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s, com exceção das duas amostras mais próximas do embasamento cristalino para os pontos P1 e P2, que foram da ordem de 10^{-5}. Esses valores podem ser considerados coerentes, estando próximo da faixa de valores estimados por Leite *et al.* (2000), que foram de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s, para um trecho aluvionar do rio Palhano. Carvalho Junior *et al.* (2002), também encontraram valores de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s em rios do semiárido. Vasconcelos (2015), utilizando a metodologia de Beerkan, caracterizou as camadas de aluvião com condutividade hidráulica variando na faixa entre 10^{-4} a 10^{-1} cm/s nas duas áreas por ela amostradas em uma aluvião no rio Capibaribe. Os valores aqui estimados em cm/h, também estão próximos dos valores encontrados por Martins *et al*. (2007), que realizaram testes de bombeamentos em 68 amostras dos vales aluviais no Ceará, e estimaram valores de condutividade hidráulica entre 0,72 à 18,8 cm/h.

Para todos os pontos amostrados em suas diferentes profundidades, em que a porosidade total foi determinada pela equação de Vukovic e Soro (1992), é possível observar (Tabelas 14, 15 e 16) que os valores variaram de 0,26 a 0,32. Considerando os valores das amostras dos pontos P1 e P3 da camada mais representativa para o corpo aluvionar, que se inicia a um metro de profundidade, chegou-se a uma média calculada de 0,315 (31,5%). O valor médio encontrado demonstra uma camada aluvial com uma porosidade muito propicia para a acumulação de água.

As estimativas das porosidades efetivas, para os três pontos, variaram de acordo com a profundidade (Tabelas 14, 15 e 16), apresentando menores valores para à superfície e para as amostras próximas do embasamento cristalino, que

apresentaram um maior percentual de partículas finas (siltes e argilas). Desta forma, foi calculado a porosidade efetiva média considerando os valores das amostras (dos pontos P1 e P3) da camada intermediária, que melhor representa o corpo aluvionar, encontrando um valor de 0,235 (23,5%) O que é aceitável para o tipo de sedimento em questão e está dentro do previsto por Johnson (1967 *apud* Custódio; Llammas, 1983), que estabelece a porosidade efetiva das areias finas entre 10 e 28%, com média de 21%, e das areias médias entre 15 e 32% e média de 26%. Rodrigues (2012), usando a equação de Poulsen *et al.* (1999) para uma aluvião do semiárido pernambucano, encontrou o valor médio de 15,5%, um pouco abaixo do valor aqui determinado. Entretanto, Caetano *et al*. (2020), no seu estudo na aluvião do Alto Rio Capibaribe, encontrou uma média de 34%, acima do valor aqui estimado.

4.6.3 Reservas e potencialidade do aquífero aluvionar

Para determinação da reserva permanente, foi preciso estimar a área da superfície da aluvião. Para melhor delimitação, foram utilizadas imagens de diferentes datas de aquisição, permitindo selecionar a imagem mais nítida para cada trecho, evitando aquelas com problemas como nuvens, que prejudicariam a visualização da superfície. O total obtido foi de 183.644 metros quadrados. Considerando o comprimento longitudinal do trecho, que é aproximadamente 1.602 metros, obtemos uma largura média da aluvião de 114,63 metros. A espessura da aluvião foi determinada com base na profundidade dos ensaios SPT, resultando em uma média de 3,25 metros.

Obteve-se um volume total de aluvião estimado em 596.843 m³, e considerando a porosidade total média de 30%, o volume total passível de ser armazenado (saturação total da aluvião) é de 188.005,5 m³, correspondendo à 117,36 m³/m para cada metro de extensão longitudinal do trecho.

Como já foi mencionado, realizou-se um monitoramento e uma avaliação dos níveis freáticos ao longo de um ano. Obteve-se a posição mínima do nível de oscilação sazonal no aquífero (reservas de saturação), estimada em 0,87 m abaixo do nível do terreno, alcançando-se uma espessura saturada de 2,38 m. Considerando a porosidade efetiva de 23,5%, a reserva permanente para o trecho estudado da aluvião foi de 102.712,1 m³. Correspondendo à 64,12 m³/m para cada metro de extensão longitudinal do trecho. Esse valor foi superior ao volume de 19,37 m³/m, encontrado por Martins *et al.* (2007) em estudo similar, utilizando uma porosidade efetiva de

17,5%. No seu estudo, Martins *et al.* (2007), que por não ter dados de monitoramento, consideraram uma média saturada de 1,45 m (50% da espessura média total das aluviões), que é menor que a espessura saturada aqui considerada.

Obteve-se as reservas temporárias, que equivalem aos volumes de água periodicamente renovadas, que são variáveis de ano para ano, em decorrência dos aportes sazonais. Considerou-se a medição do nível mais elevado e do nível mais baixo de água, por meio do monitoramento realizado, sabendo que nos mês de julho a aluvião ficou totalmente saturada, e que o nível mínimo ocorreu em dezembro, como já citado, foi 0,87 m de profundidade, considerado como a variação do nível de água anual. A reserva temporária para esse trecho da aluvião foi de 37.546,02 m³, correspondendo à 23,44 m³/m para cada metro de extensão longitudinal do trecho. Esse valor foi superior ao volume de 19,11 m³/m, encontrado por Martins *et al.* (2007), que por não ter dados de monitoramento, estimou uma variação do nível de água de 2,07 m, porém com uma porosidade efetiva de 17,5%.

O potencial explorável da aluvião foi obtido na sequência. Como já mencionado, no caso das aluviões, é estimado em 20% o montante que pode ser utilizável das reservas de saturação (permanentes), encontrando um volume potencial explorável de 58.088,44 m³ anualmente. Esse valor é maior que a demanda estimada para comunidade, que que foi de 3.501,22 m³/mês, totalizando 42.014, 64 m³/ano. Considerando toda a reserva do aquífero (temporária e permanente), que totaliza 140.258,12 m³, baseado nessa demanda estimada, poderia suprir a necessidade da comunidade ao longo de 40 meses.

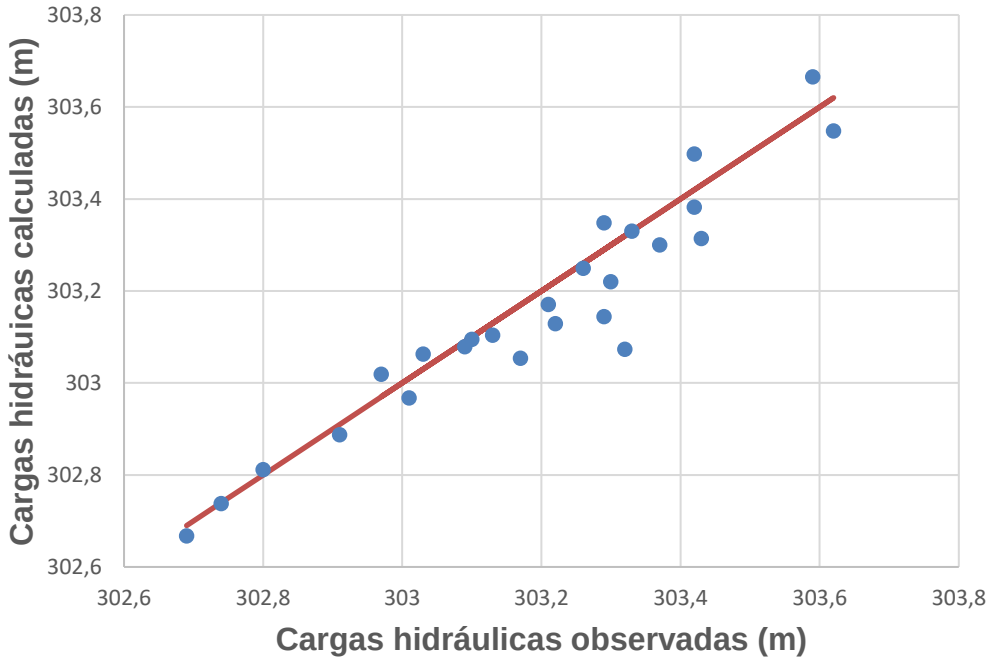
4.7 MODELO DE FLUXO SUBTERRÂNEO DA ALUVIÃO, PARA O TRECHO ESTUDADO

A calibração do modelo foi realizada por meio da comparação entre os valores de carga hidráulica simulados e os valores obtidos em levantamentos de campo. Os parâmetros hidrogeológicos e valores dar recarga (condição de contorno) que compõem o modelo foram alterados em algumas tentativas de ajustes, e sucessivas simulações foram geradas para analisar o balanço hídrico e a distribuição da carga hidráulica. Após alguns ajustes no modelo da área de estudo, alcançou-se um modelo satisfatório.

A informação dos valores bombeados precisou ser melhorada, pois inicialmente foram considerados valores de bombeamento constantes ao longo de todos os meses, e posteriormente ajustou-se, considerando a redução no período chuvoso, como também foram melhoradas as condições de contorno, à montante e à jusante, as cargas constantes. Estas são informações estimadas no modelo, com base nas leituras do monitoramento potenciométrico. Os resultados das cargas hidráulicas calculadas pelo modelo se aproximaram dos observados em campo, visualizado na sequência, nas Figuras 47 a 49 e nas Tabelas 19 a 21.

No gráfico da Figura 47, observa-se os resultados da calibração após os últimos ajustes para o PM-1, mais à montante do trecho estudado.

Figura 47 - Valores simulados e observados para o Poço de Monitoramento 1 (PM-1)



Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 17, é possível visualizar os resultados encontrados após a análise estatística dos resíduos, para o PM-3. Os coeficientes de determinação (R^2) e de Nash entre os valores observados e simulados de carga hidráulica foram de 0,91, e 0,89, respectivamente, representando uma boa calibração do modelo, ao passo que o resíduo médio foi de 0,061 m.

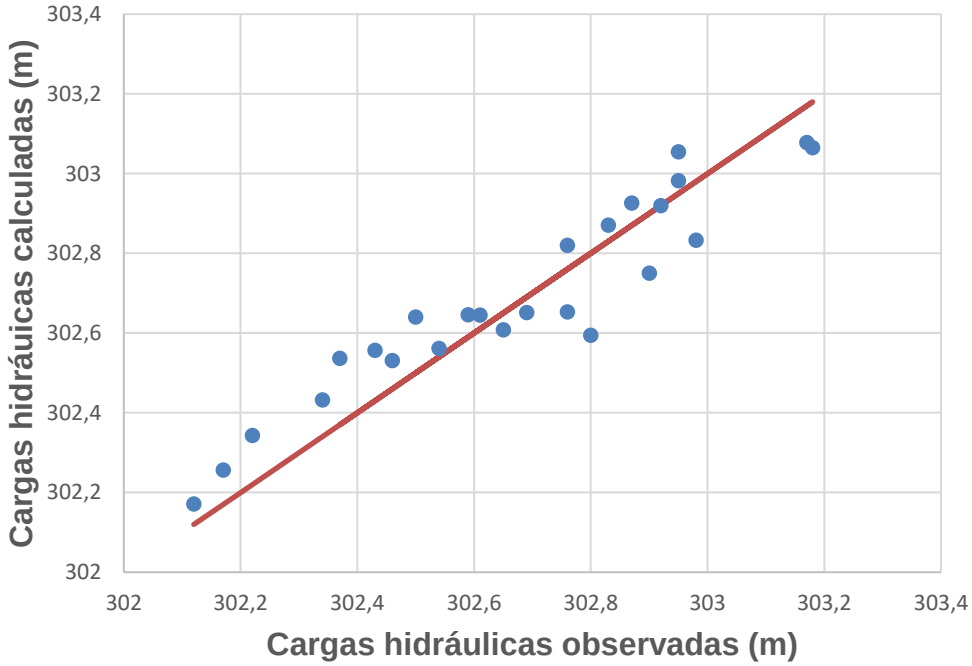
No gráfico da Figura 48 são apresentados os resultados da calibração após os últimos ajustes para o PM-2, no trecho intermediário da área estudada.

Tabela 17 - Resultados da calibração do modelo de fluxo subterrâneo, para o PM-1

Estatística dos resíduos	Valores
Máximo	0,246 m
Mínimo	0,002 m
Média	0,061 m
Desvio padrão	0,054 m
R^2	0,91
Nash	0,89

Fonte: O Autor.

Figura 48 - Valores simulados e observados para o Poço de Monitoramento 2 (PM-2)



Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 18, visualiza-se os resultados encontrados após a análise estatística dos resíduos, para o PM-2. Os coeficientes de determinação (R^2) e de Nash, entre os valores observados e simulados de carga hidráulica foram de 0,90 e 0,83, respectivamente, representando uma boa calibração do modelo, ao passo que o resíduo médio foi de 0,090 m. Esse foi o poço que apresentou maiores valores de resíduos, podendo ser justificado, por ser também o mais distante das condições de contorno, das fronteiras permeáveis (com cargas constantes).

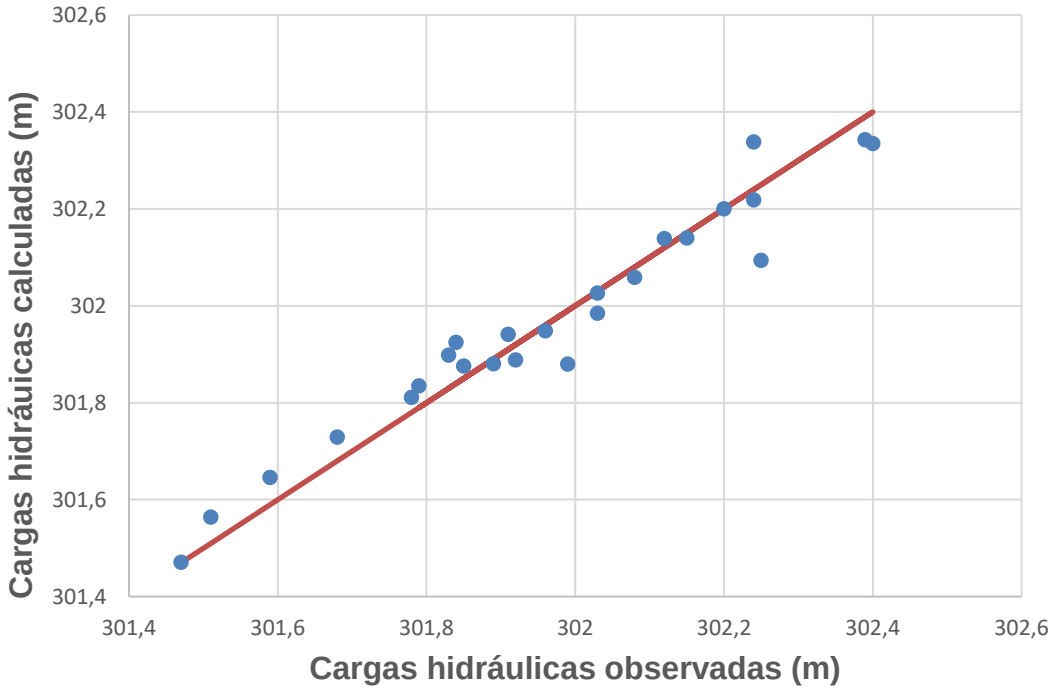
Tabela 18 - Resultados da calibração do modelo de fluxo subterrâneo, para o PM-2

Estatística dos resíduos	Valores
Máximo	0,205 m
Mínimo	0,022 m
Média	0,090 m
Desvio padrão	0,048 m
R^2	0,90
Nash	0,83

Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 49, observa-se o gráfico com os resultados da calibração após os últimos ajustes, para o PM-3, no trecho mais à jusante da área estudada.

Figura 49 - Valores simulados e observados para o Poço de Monitoramento 3 (PM-3)



Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 19, é possível visualizar os resultados encontrados após a análise estatística dos resíduos, para o PM-3. Os coeficientes de determinação (R^2) e de Nash, entre os valores observados e simulados de carga hidráulica foram de 0,95 e 0,94, respectivamente, representando uma boa calibração do modelo, ao passo que o resíduo médio foi de 0,046m. Observa-se que o PM-3, se ajustou melhor aos dados observados. Isso pode ser explicado, por ser o poço de monitoramento mais próximo

da condição de contorno da fronteira permeável (com carga hidráulica constante), sofrendo uma maior influência.

Tabela 19 - Resultados da calibração do modelo de fluxo subterrâneo, para o PM-3

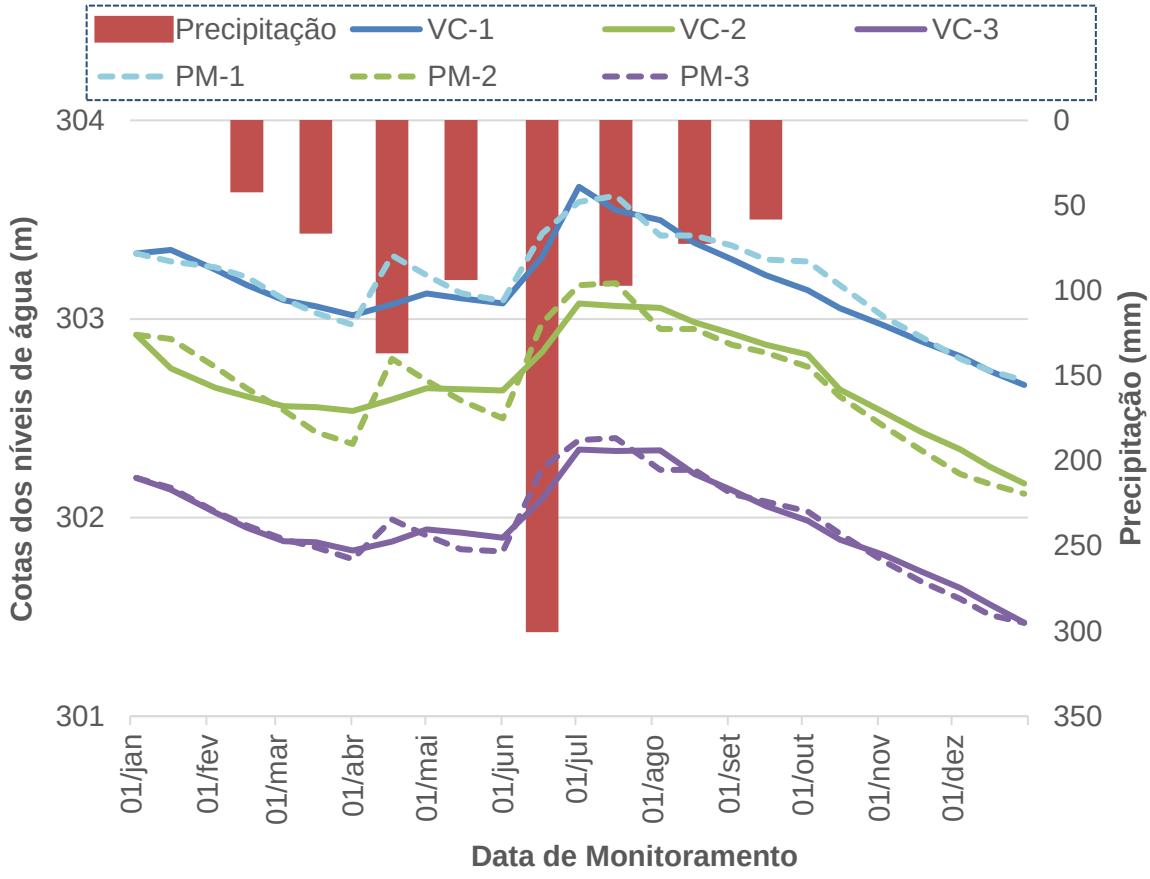
Estatística dos resíduos	valores
Máximo	0,156 m
Mínimo	0,001 m
Média	0,046 m
Desvio padrão	0,037 m
R^2	0,95
Nash	0,94

Fonte: O Autor (2024).

Santos (2009), ao simular um pequeno aquífero aluvial do Riacho Gravatá, afluente do Rio Ipanema, usando o Código Modflow, chegou a um modelo satisfatório com coeficiente de determinação de 0,83, abaixo dos coeficientes de determinação aqui encontrados. Perdikaki, Makropoulos e Kallioras (2022) no seu estudo de fluxo subterrâneo, que utilizaram o mesmo código computacional chegaram em um coeficiente de determinação de 0,67. Safre (2018), também utilizando Modflow, chegou a um modelo de águas subterrâneas com coeficiente de determinação de 0,98, acima do aqui calculados.

Na Figura 50 tem-se as flutuações temporais do lençol subterrâneo ao longo do ano de 2023 para aluvião, nos três poços monitorados (curvas tracejadas) e os valores simulados para o modelo (curvas contínuas). Na ocorrência de precipitação, observa-se que o nível d'água dos poços sofre acréscimo, através da recarga do lençol subterrâneo. Os valores calculados para o PM-1 (VC-1) e os valores calculados para o PM-3 (VC-3), se ajustaram melhor aos valores medidos em campo, quando comparado aos valores calculados para o PM-2 (VC-2). Como já ressaltado, pode ser devido à maior distância desse das condições de contorno.

Figura 50 - Variação temporal dos níveis de água e da precipitação, ao longo do ano de 2023, para os dados monitorados (linhas tracejadas) e calculados pelo modelo

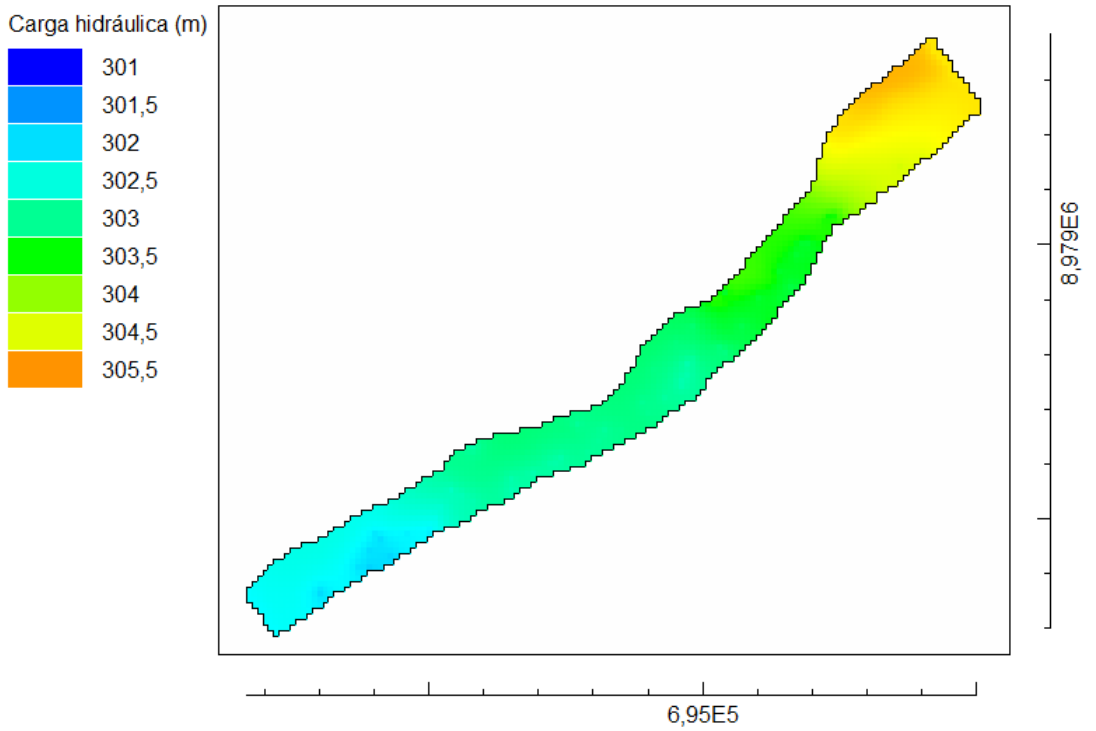


Fonte: O Autor (2024).

O movimento da água dentro do meio poroso segue o curso natural do rio conforme previsto. As cargas hidráulicas na área aluvial são mais altas na parte superior do trecho (à direita) e diminuem ao longo do trecho simulado, atingindo níveis mais baixos na parte inferior (à esquerda). Esse padrão pode ser observado nos mapas potenciométricos de cargas hidráulicas fornecidos na Figura 51 após 180 dias e na Figura 52 após 360 dias.

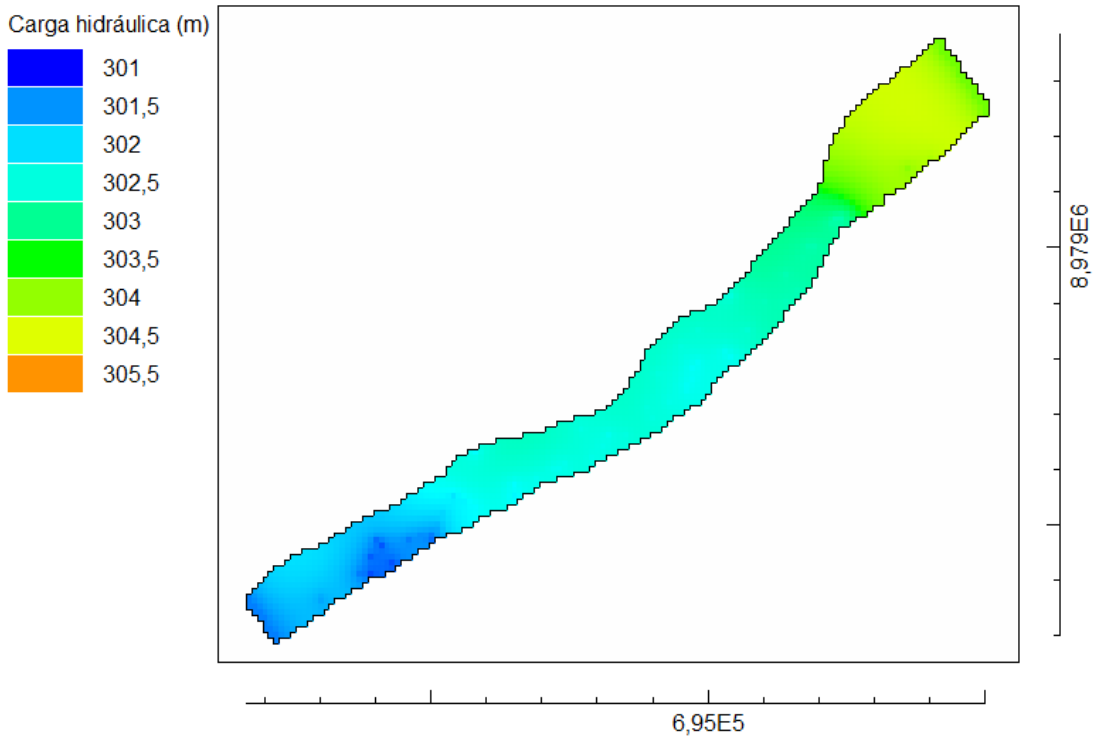
Nas Tabelas 20 e 21 tem-se o balanço hídrico final para ao final dos dias 160 e 360 dias, respectivamente. Observou-se que as vazões bombeadas diminuíram ao final dos 180 dias (período chuvoso), como esperado, considerando que há uma redução do uso de água da aluvião. Já para o final dos 360 dias de simulação, o bombeamento é mais intenso, estando no período de estiagem. É observado também, um valor de recarga significativo referente à precipitação de 618,53 m³/dia, no mês de junho, enquanto no mês de dezembro não houve recarga referente às chuvas.

Figura 51 - Mapa potenciométrico, cargas hidráulicas simuladas, período de 180 dias



Fonte: O Autor (2024).

Figura 52 - Mapa potenciométrico, cargas hidráulicas simuladas, período de 360 dias



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 20 - Balanço hídrico do modelo ao final dos 180 dias de simulação

	Entrada (m³/dia)	Saída (m³/dia)
Armazenamento	0,00	492,14
Poços	0,00	119,99
Recarga	618,53	0,00
Contorno dependente da carga	3,78	10,06
Total	622,30	622,31

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 21 - Balanço hídrico do modelo ao final dos 360 dias de simulação

	Entrada (m³/dia)	Saída (m³/dia)
Armazenamento	169,62	0,00
Poços	0,00	145,95
Recarga	0,00	0,00
Contorno dependente da carga	0,00	23,69
Total	169,64	169,64

Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 22 observa-se o balanço hídrico ao final dos 360 dias, com os volumes acumulados. Salienta-se que as vazões bombeadas foram de 50.506,50 m³ no ano simulado. Por estes resultados, observa-se que o volume anual explorado pelos poços da aluvião é superior ao recarregado pela precipitação, havendo um déficit da ordem de 12.000 m³. E que a priori está havendo uma saída pelo escoamento do fluxo subterrâneo superior ao que entra na área do modelo. O que poderia ser melhor avaliado com medições mais próximas a estes pontos extemos dos limites do modelo.

Tabela 22 - Balanço hídrico total do modelo após um ano de simulação

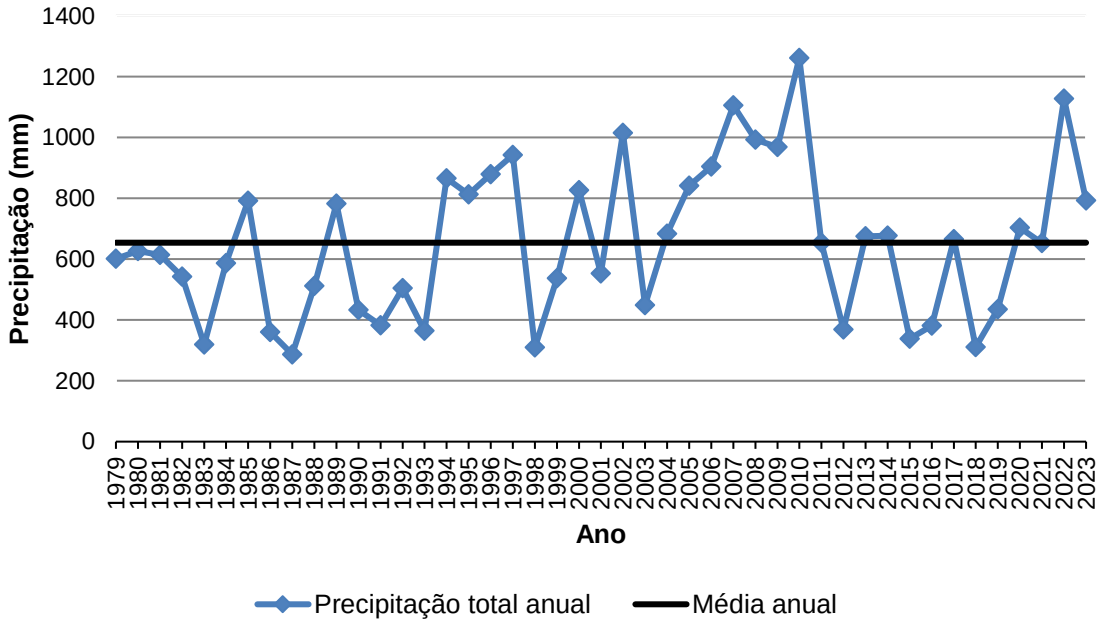
	Entrada (m³)	Saída (m³)
Armazenamento	39.531,15	22.715,72
Poços	0,00	50.506,50
Recarga	38.450,74	0,00
Contorno dependente da carga	2.676,99	7.438,35
Total	80.665,34	80.664,79

Fonte: O Autor (2024).

4.8 VOLUME APROVEITÁVEL DA ÁGUA DE CHUVA PARA A ÁREA ESTUDADA

Por meio da série histórica de precipitação, obteve-se a distribuição total anual das precipitações ocorridas no município de Santana do Ipanema (próximo da área de estudo), no período de 1979 a 2023 (Figura 53). A precipitação anual média desse período é de 654,1 mm. De acordo com a Figura 53, observa-se que o ano de 1987 apresentou a menor ocorrência de chuva, 287,0 mm, e o ano que mais choveu foi 2010, 1261,2 mm. Pode-se observar também, que nos últimos 30 anos do histórico analisado os totais anuais das precipitações apresentaram grandes amplitudes. Pode-se observar também, que a precipitação anual é inferior à média em mais da metade do histórico, o que indica a ocorrência de mais anos secos, que chuvosos. A partir do ano 1993, tem-se um aumento na amplitude da precipitação anual, o que evidencia alguns anos muito chuvosos e outros muito secos, situação comum em regiões semiáridas, onde ocorrem secas cíclicas.

Figura 53 - Série temporal da precipitação total anual do Posto 00937032 (1979-2023)

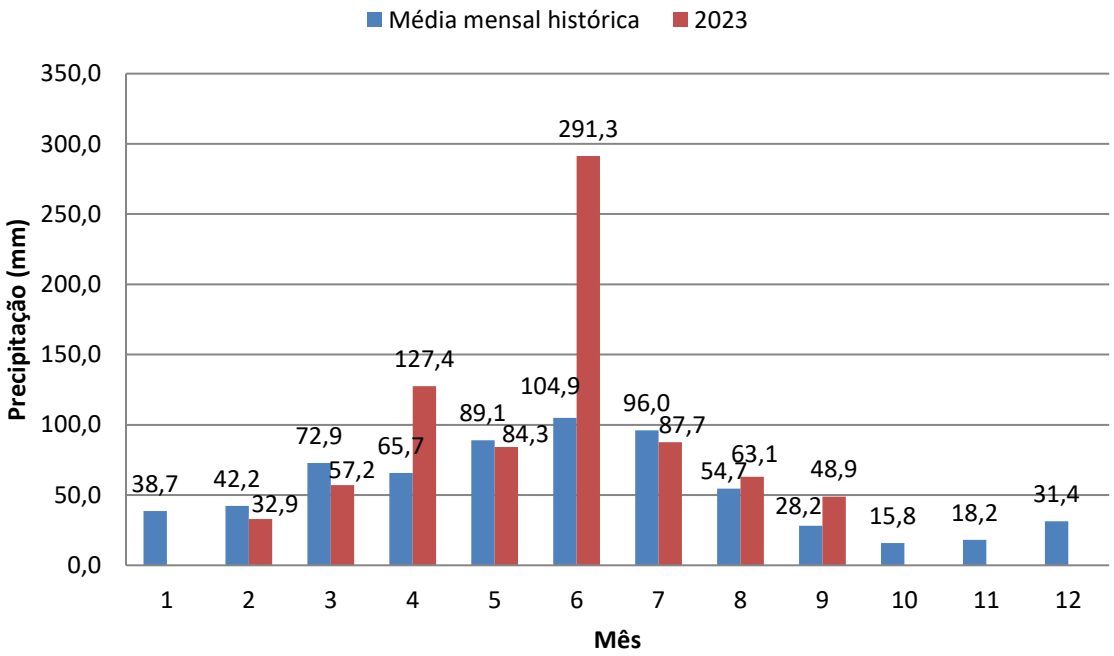


Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 54 tem-se as médias mensais da precipitação para o posto pluviométrico analisado. Observa-se que junho é o mês mais chuvoso de todo o histórico, com uma média de 104,9 mm, e outubro é o mês menos chuvoso, apresentando um valor médio mensal de 15,8 mm. Observa-se que para o ano de 2023, alguns meses do período chuvoso apresentaram valores bem acima da média

mensal, enquanto é evidenciado que em alguns meses do período seco, os valores foram nulos, abaixo da média mensal.

Figura 54 - Precipitação mensal média do Posto 00937032 (1979-2023), e precipitação do ano de 2023.



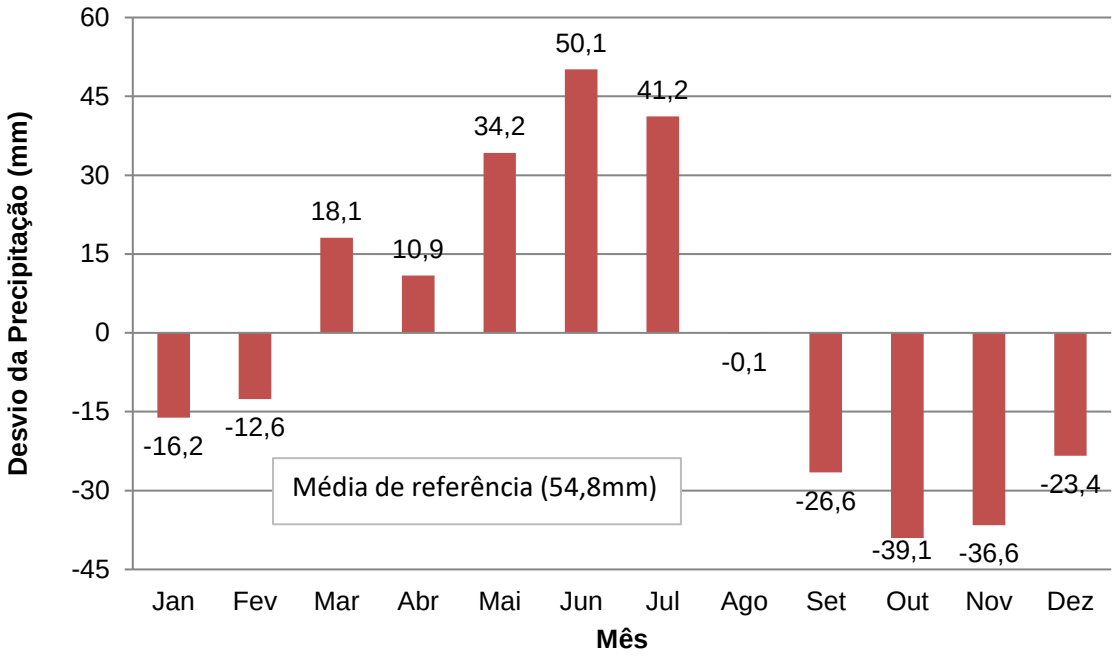
Fonte: O Autor (2024).

Com o objetivo de determinar o período seco e o período chuvoso, trabalhou-se com o valor mensal médio obtido da precipitação anual média acumulada no período de 1979 a 2023, obtendo-se 54,8 mm como valor de referência mensal média. Considerando esse valor como o limite entre os dois períodos, seco e chuvoso, fez-se a diferença do valor médio de cada mês por este e construiu-se o gráfico da Figura 55. Observa-se que o período chuvoso do município está compreendido entre os meses de março e julho, evidenciando poucos meses chuvosos, e um maior período seco (estiagem), característico de clima semiárido.

Por meio das imagens da área de estudo e auxílio do Qgis, delimitou-se as coberturas das residências, e extraiu-se as áreas estimadas de cada uma delas, chegando a uma área total de aproximadamente 61.915,89 m². O potencial de captação de chuva foi calculado por meio da Equação 31, para as precipitações médias da série histórica em estudo, aplicando-se o coeficiente de Runoff no valor de

0,80, e fator de captação de 0,85, de acordo com os dados apresentados na Tabela 23.

Figura 55 - Desvio de precipitação mensal média, Posto 00937032, período 1979-2023



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 23 - Potencial de captação de água de chuva mensal do Povoado Quandú, dados do Posto 00937032, série histórica 1979-2023

Mês	Precipitação Média (mm)	Área de captação (m²)	Fator de captação	Coeficiente Runoff	Volume captado (m³)
Janeiro	38,66	61915,89	0,8	0,85	1.627,69
Fevereiro	42,2	61915,89	0,8	0,85	1.776,74
Março	72,9	61915,89	0,8	0,85	3.069,29
Abril	65,71	61915,89	0,8	0,85	2.766,58
Maio	89,06	61915,89	0,8	0,85	3.749,68
Junho	104,92	61915,89	0,8	0,85	4.417,43
Julho	95,98	61915,89	0,8	0,85	4.041,03
Agosto	54,7	61915,89	0,8	0,85	2.303,02
Setembro	28,24	61915,89	0,8	0,85	1.188,98
Outubro	15,76	61915,89	0,8	0,85	663,54
Novembro	18,19	61915,89	0,8	0,85	765,85
Dezembro	31,43	61915,89	0,8	0,85	1.323,29
				Total anual (m³)	**27.693,12**

Fonte: O Autor (2024).

Como já mencionado, identificou-se por meio das entrevistas realizadas, que percentuais distintos dos domicílios da comunidade fazem uso das cisternas para as finalidades de lavagens em geral (25%), banho (27,5%), beber e cozinhar (80%). A fonte de água das cisternas é proveniente da captação de água de chuvas, e também parte delas recebe água de caminhões pipas. Considerando o Cenário 1, no qual toda a comunidade faz uso da água de chuva, para atender as finalidades citadas, estimou-se com base nos consumos domiciliares citados pela Funasa (1991), um valor de 3.374,79 m³/mês. Ao considerar apenas os percentuais de domicílios que fazem uso da água de chuva, para essas finalidades, chegou-se no valor de 1.103,10 m³/mês (Tabela 24).

Tabela 24 - Demanda de água de chuva para os usos de lavagens, banho, beber e cozinhar

Usos Domiciliares	Consumo (L/pessoa/dia)	Consumo Domiciliar (L/dia)	Comunidade (Cenário 1) (m³/mês)	Consumo real da comunidade (m³/mês)
Água e alimentos	8	29,20	402,96	322,37
Lavagens	29	105,85	1.460,73	365,18
Banho	30	109,50	1.511,10	415,55
Total	**67**	**244,55**	**3.374,79**	**1.103,10**

Fonte: O Autor (2024).

Observando as Tabelas 23 e 24, percebe-se que o volume de captação de água de chuva proporciona o abastecimento integral para essas finalidades no período de maio, junho e julho, onde a oferta é superior a demanda total da comunidade. Porém, nos demais meses do ano, há um déficit na oferta, devida a baixa precipitação da região.

Sabendo que todos os domicílios que fazem uso de água de chuva para essas finalidades, também utilizam água da aluvião para suprir essas demandas. Calculou-se, uma demanda total da comunidade (Cenário 2), considerando que 100% do uso mais nobre, beber e cozinhar alimentos (402,96 m³), seria proveniente da água de chuva, e que apenas 50% do consumo para banho (730,37 m³) e para lavagens (755,55 m³), seria proveniente dessa fonte de captação, chegou-se a uma demanda de 1.888,88 m³/mês. Dessa forma, calculou-se a diferença entre a demanda e o volume de captação mensal, para a série histórica (Tabela 25).

Tabela 25 - Volume captado *versus* demanda de água de chuva, para o Cenário 2

Mês	Volume Captado (m³)	Demanda mensal (m³)	Diferença (Demanda - Vol. Cap.) (m³)
Janeiro	1627,69	1888,88	261,19
Fevereiro	1776,74	1888,88	112,14
Março	3069,29	1888,88	-1180,41
Abril	2766,58	1888,88	-877,70
Maio	3749,68	1888,88	-1860,80
Junho	4417,43	1888,88	-2528,55
Julho	4041,03	1888,88	-2152,15
Agosto	2303,02	1888,88	-414,14
Setembro	1188,98	1888,88	699,90
Outubro	663,54	1888,88	1225,34
Novembro	765,85	1888,88	1123,03
Dezembro	1323,29	1888,88	565,59
Total anual	**27.693,12**	**22.666,56**	

Fonte: O Autor (2024).

Observando a Tabela 27, percebe-se que o volume de captação de água de chuva proporciona o abastecimento integral para o Cenário 2, no período de março a agosto (para todo os meses do período chuvoso, além do mês de agosto), onde a oferta é superior a demanda total da comunidade, porém, nos demais meses do período seco, há um déficit na oferta, devida à baixa precipitação da região. Estes meses podendo ser suprido pelo armazenamento dos excedentes do período chuvoso.

O método de Rippl serviu adequadamente para calcular o volume de reservação de água, para atender aos meses de estiagem, nos quais houveram o déficit, para o uso da água de chuva. Encontrou-se um volume a ser armazenado para toda a comunidade de 3.987,18m³, que dividido para os 460 domicílios chegou-se em um volume estimado para a cisterna de 8,67 m³, esse valor é inferior ao volume de reservação da maioria das cisternas presentes nos domicílios, que é de 16 m³. Bastaria para tanto que cada residência tivesse sua cisterna. Pode-se concluir que a cisterna do tipo P1MC, no molde original, atende às necessidades da população local.

4.9 AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE MELHORIA PARA A GESTÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ÁGUA PARA A COMUNIDADE

O método de avaliação fundamentou-se na análise subjetiva do Autor, com base nas informações fornecidas pela associação, pela comunidade por meio das entrevistas, e pelos resultados obtidos nas seções anteriores. Apesar de subjetiva, essa classificação foi parametrizada, atribuindo a cada item avaliado três classificações distintas, representando situações que variam da melhor (ideal) para a pior, com uma classificação mediana.

Devido às três opções de classificação, as pontuações foram identificadas por letras: A - para a melhor situação; B - para uma situação intermediária; e C - para a pior situação. Para o resumo da avaliação do modelo, adotou-se uma ponderação uniforme de todos os parâmetros avaliados em cada tipologia de fonte de abastecimento alternativo, buscando simplificar a análise dos dados. Durante as visitas de campo, uma série de informações foi coletada para viabilizar a avaliação das fontes de abastecimento alternativas. A seguir, estão listados todos os parâmetros de eficiência operacional (Quadro 2).

Quadro 2 - Avaliação operacional da gestão compartilhada das fontes alternativas de abastecimento de água para a área de estudo

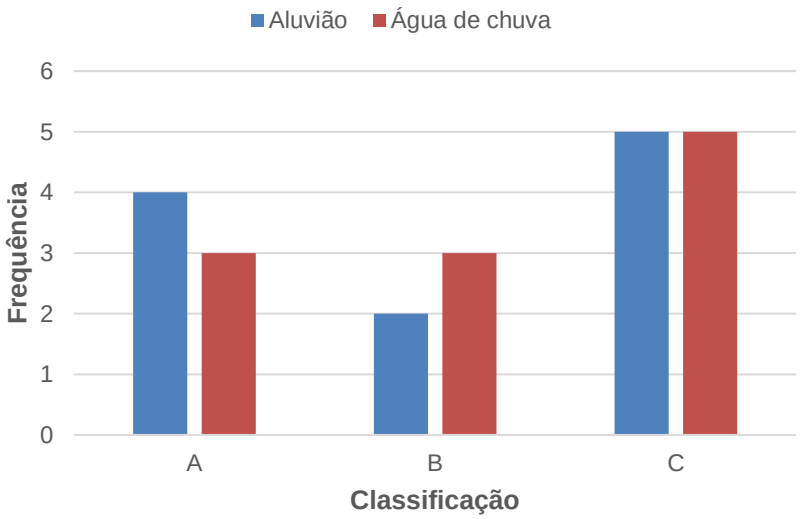
Nº	Parâmetro de avaliação	Aluvião	Água da chuva
1	**Cobertura da fonte de captação de água:** Se o atendimento da comunidade pela fonte de captação cobertura: Critérios: a) universal (total); b) parcial; c) sem rede (inexistente)	B	B
2	**Condição do abastecimento:** Se a continuidade e a regularidade do abastecimento se dão de forma: Critérios: a) contínua/regular; b) por manobra (intermitente); c) racionada	A	B
3	**Adequação do tratamento da água:** Pela condição do manancial, se a tecnologia e a eficiência do tratamento são: Critérios: a) adequadas; b) pouco adequadas; c) não há tratamento (inexistente)	C	C
4	**Controle da qualidade da água:** Existindo tratamento, se o controle de qualidade é: Critérios: a) satisfatório; b) parcial; c) não há controle (inexistente)	C	C
5	**Acesso a novas conexões:** As novas ligações nas fontes de captação existente são acessadas de forma: Parâmetros: a) facilitada (ágil e parcelado); b) razoável; c) custosa	C	C

6	**Domínio da tecnologia do sistema:** Se a operação local domina a tecnologia do sistema de forma: Critérios: a) suficiente; b) parcial; c) inexistente	A	A
7	**Uso da micromedição:** Os hidrômetros instalados estão na condição seguinte: Critérios: a) em uso; b) sem uso; c) não há hidrômetro (inexistente)	C	C
8	**Uso da macromedição:** Os macromedidores instalados estão na condição seguinte: Critérios: a) em uso com calibragem; b) sem calibragem; c) não há (inexistente)	C	C
9	**Controle de nível do reservatório:** A captação para o reservatório tem o controle: Critérios: a) automático; b) manual com eficiência; c) precário	B	A
10	**Agilidade no reparo da captação/bomba:** O reparo da captação/ bombas se dá de forma: Critérios: a) ágil; b) mediana; c) demorada	A	A
11	**Segurança hídrica do manancial:** A segurança do volume/vazão do manancial para atender à demanda é: Critérios: a) elevada; b) mediana; c) baixa	A	B

Fonte: O Autor (2024).

Posteriormente, somou-se os números de classificações A, B, C dos parâmetros avaliados para as fontes alternativas de abastecimento, abrangendo os aspectos eficiência operacional, conforme apresentado na Figura 56.

Figura 56 - Avaliação da eficiência operacional das fontes de abastecimento (número de parâmetros por classificação)



Fonte: O Autor (2024).

No que diz respeito à eficiência operacional, entre os 11 parâmetros avaliados, apenas 4 receberam a classificação A, para a fonte de abastecimento do tipo aluvião e 3 para fonte de água de chuva. Destacando-se o domínio da tecnologia do sistema e a agilidade no reparo da captação. Como o uso de ambas as fontes é de longa data (variando de anos a décadas), de acordo com os entrevistados, é esperado que estejam familiarizados com instalação e reparo das tecnologias de captação.

Os parâmetros classificados como medianos ("B") apontam a necessidade de melhorias em aspectos relacionados à cobertura da fonte de abastecimento. Apesar das duas fontes de abastecimento, não terem cobertura integrais para toda a comunidade, os percentuais são altos, apresentando 95,83% dos domicílios consultados em relação ao uso da aluvião, e 83,33% desses domicílios informaram usar água da chuva (por meio de cisternas).

Por fim, entre os 11 parâmetros avaliados, totalizaram 5 aqueles classificados como "C", para ambas as fontes, que incluem: a adequação do tratamento da água, que é inexistente; controle da qualidade da água, não havendo realização de ensaios laboratoriais; o acesso a novas conexões, que é custoso, pois é preciso realizar a construção de um novo poço e sistema de bombeamento para a fonte do tipo aluvião, e a construção de cisterna para armazenamento da fonte por captação de água de chuva. De acordo com os entrevistados, quase todos os domicílios, que não possuem cisternas, apontaram o interesse na construção. Entre os parâmetros classificados com “C”, estão ainda o uso da micromedição e macromedição, que é ausente em ambas as fontes de captação, podendo ser justificado, por não utilizarem sistema convencional de rede de abastecimento, sendo as fontes de abastecimento, sistemas individuais ou compartilhados com poucas residências.

Sobre o parâmetro 2, condição do abastecimento, a fonte de abastecimento por aluvião, foi classificada como A, tendo abastecimento contínuo. Todos os entrevistados, informaram que o manancial atende bem durante todo o ano, bombeando sempre que é necessário. Alguns relataram que em alguns anos isolados, onde houve secas extremas, a oferta foi reduzida. Vale ressaltar que, no ano de 2023, no qual foi realizado as entrevistas, a precipitação foi acima da média anual, que influencia na recarga do manancial. A fonte de abastecimento por água de chuva, foi classificada como “B”, para esse parâmetro, tendo em vista que a oferta é diretamente influenciada pelo regime pluviométrico da região, tendo cinco meses chuvosos e sete

meses de estiagem, demandando um bom gerenciamento das reservas das cisternas para se poder ter uma continuidade na oferta dessa fonte. Segundo as entrevistas, muitos informaram não atender a demanda em todo o período do ano.

Lafayette (2021) avaliou o modelo de gestão compartilhada de sistema de abastecimento de água de um projeto piloto na comunidade rural de Santo Antônio II, no município de Afogados da Ingazeira no Semiárido do Estado de Pernambuco, por meio da metodologia proposta por Garrido (2016). No que concerne à eficiência operacional, dentre os 11 parâmetros avaliados pela autora, 6 receberam a classificação “A”, destacando-se a cobertura da rede de água, a adequação do tratamento da água, o domínio da tecnologia do sistema, o uso da micromedição e macromedição e a segurança hídrica do manancial. Os parâmetros classificados por ela como medianos (“B”) evidenciaram a necessidade de melhorias em aspectos relacionados à condição do abastecimento, a frequência de controle da qualidade da água, e a desburocratização de acesso a novas conexões. Por fim, os classificados como “C” incluíram o controle de nível do reservatório, e a agilidade na substituição de bomba, que precisa ser aprimorada. A maioria dos parâmetros avaliados pelo estudo de Lafayette (2021) apresentaram classificações melhores que o da comunidade aqui estudada, como esperado. Isso, é justificável, pois a comunidade avaliada pela autora dispõe de um projeto piloto onde existe uma rede de abastecimento de água comunitária, inspirado no modelo SISAR do Ceará, que é diferente do sistema aqui estudado (sistemas de captações individuais ou compartilhados por um pequeno conjunto de domicílios).

Com o objetivo de propor melhorias para a gestão das fontes e as finalidades de uso a que se destinam, levantou-se as facilidades e as fragilidades da gestão do abastecimento, conforme recomendado por Garrido *et al*. (2016), aplicadas aqui a cada fonte de abastecimento. No Quadro 3, observa-se a descrição das facilidades encontradas para as fontes da comunidade. Quadro 4, tem-se a descrição das fragilidades encontradas para as fontes da comunidade.

Quadro 3 - Facilidades observadas para as fontes de abastecimentos para Povoado Quandú - AL

Facilidades		
	Descrição	**Observação**
1)	Boa disponibilidade de água da aluvião	Por meio da estimativa do potencial explorável da aluvião, e do modelo computacional, foi verificado que a aluvião, atende bem a demanda atual para o trecho estudado.
2)	Facilidade na operação da captação de água da aluvião	O bombeamento de água dos poços do tipo cacimbas e cacimbões, são tecnologias de operação dominadas pela população local, que os utilizam há muitos anos.
3)	Continuidade na oferta de água da aluvião	Por meio das entrevistas, foi verificado a continuidade na oferta de água da aluvião, ao longo de todo o ano.
4)	Qualidade adequada da água de chuva é adequada para fins não potáveis	Apesar de não ter sido realizada análise de qualidade da água proveniente da captação das chuvas, a NBR 15.527 (ABNT, 2019), recomenda o uso dessa fonte, para fins não potáveis.
5)	Facilidade na operação da captação de água de chuva	Por ser relativamente simples, o sistema de captação e armazenamento de água de chuva também são de operação dominadas pela população local, que os utilizam há muitos anos.

Fonte: O Autor (2024).

Quadro 4 - Fragilidades observadas para as fontes de abastecimentos para Povoado Quandú - AL

Fragilidades			
	Descrição	**Observação**	**Proposta de melhoria**
1)	Qualidade da água da aluvião, fora dos padrões de potabilidade.	A análise da qualidade da água, para as amostras ensaiadas, aponta a não potabilidade. Assim, foi identificado o uso dessa fonte, para finalidades não recomendadas, como é o caso dos 12,5% dos domicílios que usam para beber e cozinhar.	Sugere-se a não utilização dessa fonte para usos mais nobres (beber e cozinhar), utilizado apenas para os usos menos nobres (lavagens e banho), como já é utilizado pela grande maioria dos domicílios. Entretanto, recomenda-se o tratamento necessário, para atender a essas finalidades.
2)	Oferta limitada da água da chuva no período de estiagem	A análise do potencial de captação da água da chuva, mostrou que apresenta baixa disponibilidade no período seco. Dessa forma, não atende integralmente toda a comunidade em todos os meses para o cenário 1 (apresentado na seção 4.8)	Sugere-se que essa fonte seja utilizada integralmente pela comunidade para as finalidades de beber e cozinhar (passando por um tratamento adequado, para torna-la potável). E utilizada para as finalidades menos nobres nas porcentagens do cenário 2 (apresentado na seção 4.8).
3)	Ausência de tratamento da água de ambas as fontes de captação	Foi verificado, que não existem sistemas de tratamentos das fontes de captação de água. É provável que seja devido aos sistemas de captação de água de chuvas serem individuais, e as captações da aluvião também individualizadas ou compartilhadas com um	Sobre os sistemas de captação de água de chuvas, sugere-se um tratamento adequado, ou no mínimo a instalação de dispositivos de desvio dos primeiros milímetros de chuvas (a exemplo o DesviUFPE, avaliado por Araújo (2017), que melhora a qualidade da água). Uma alternativa para o tratamento da água da aluvião, seria buscar uma gestão comunitária do tratamento, para

		pequeno conjunto de residências.	viabilizar economicamente, como é o caso dos modelos de gestão avaliados por Garrido *et al.* (2016).
4)	Ausência de proteção Sanitária nos poços de captação.	O levantamento dos poços no trecho da aluvião, mostrou que existem uma quantidade expressiva de poços sem tampas. Isso pode facilitar a entrada de animais e/ou outras fontes de contaminação, tendo em vista que foi identificado pequenas criações de animais na margem da aluvião.	Sugere-se, que a população providencie a proteção sanitária, visando preservar a qualidade da água protegida pela camada de areia. Vale ressaltar que a análise da qualidade da água para as amostras ensaiadas apresentaram a presença de coliformes totais, mesmo que em pequenas quantidades.
5)	Ausência de rede coletora de esgoto.	Por meio das entrevistas, foi verificado, que a maioria dos domicílios direcionam as águas negras para fossas sépticas e águas cinzas para a sarjeta. Podendo essas escoarem para a aluvião.	Sugere-se, que a população busque alternativas para tratar as águas cinzas, como é o caso da Filtração em Margem Inversa, avaliada por Bello *et al.* (2022), no qual a água tratada poderia ser direcionada para a aluvião recarregando-a.
6)	Retirada de areia, da aluvião.	Por meio das visitas de campo, durante o monitoramento dos poços, foi observado a retirada de areia da aluvião, por meio de caçambas.	Sugere-se, que a população fiscalize essa prática, e busque meios legais de limitar a retirada de areia, tendo em vista que essa protege o manancial hídrico subterrâneo utilizado.

Fonte: O Autor (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa identificou os tipos de mananciais hídricos mais relevantes, para a comunidade. Identificou-se que a aluvião é o manancial utilizado pela quase totalidade da população local, sendo também considerado pela grande maioria como a fonte que oferece a maior e mais regular oferta de água. Enfatizando que devido ao seu volume considerável, fácil acesso e proteção natural contra a evaporação, a água armazenada na aluvião representa um dos principais mananciais de abastecimento para os povoados rurais próximos a rios intermitentes no semiárido brasileiro. O uso significativo da água da chuva, por meio do armazenamento em cisternas pela comunidade, associado ao uso de caminhão-pipa nos períodos mais secos, mostram a importância das cisternas para as comunidades rurais em regiões semiáridas. A população demonstrou uma predisposição para utilizar água de diferentes fontes de forma combinada, reforçando a convicção de que lidar com a escassez de água no semiárido requer uma abordagem diversificada.

Verificou-se as características de uso e finalidades da água para população local, concluindo que o uso de água da chuva (cisternas), é utilizado quase exclusivamente para consumo humano, como para beber e cozinhar, sendo essa a fonte mais comum (80,00%) para esses fins. Por outro lado, a água da aluvião é principalmente destinada a atividades domésticas menos essenciais, como banhos (89,17%), limpeza da casa (95,83) e sanitários (95,83%), além de ser utilizada para pequenas atividades agrícolas (6,67%) e pecuárias (12,50%).

Estimou-se as ofertas e demandas dos mananciais utilizados pela comunidade. Obteve-se as reservas temporária, permanente e o potencial explorável da aluvião que foi de 58.088,44 m³/ano, para o trecho estudado. Identificou-se reservas consideráveis, concluindo que atendem as demandas de utilização atual da população (42.014, 64 m³/ano). Entretanto recomenda-se, o monitoramento dos níveis de água, para não comprometer a reserva permanente, em anos de escassez hídrica. Verificou-se também uma boa disponibilidade de água da chuva no período chuvoso, e um considerável potencial de captação dessa água para a comunidade (27.693,12 m³/ano). Objetivando fortalecer a segurança hídrica dessas fontes de captação, propõe-se o uso dessa última fonte em percentuais controlados, para garantir uma disponibilidade ao longo de todo o ano (inclusive no período seco), ao passo que reduz

o uso da água da aluvião. O que para o momento, precisa-se que o percentual das residências que possuem cisternas, seja ampliado para 100%.

Estimou-se os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero aluvionar, e verificou-se que é constituída basicamente por unidades arenosas, sendo do tipo areia e areia franca, como verifica-se nas aluviões pelo semiárido. Os três pontos ensaiados, mostram que não existe heterogeneidade significativa, longitudinalmente, ao longo da aluvião para esse trecho estudado. Determinou-se para os pontos amostrados em suas diferentes profundidades, a condutividade hidráulica média (que variaram de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s), que demonstra que o corpo aluvionar, tem boa predisposição ao escoamento. A porosidade total foi determinada, e o valor médio encontrado (31,5%) demonstra uma camada aluvial com uma porosidade muito propicia para a acumulação de água, enfatizando que os mananciais aluvionares representam reservas estratégicas, passíveis de utilização para as comunidades próximas desses rios temporários.

Construiu-se um modelo computacional satisfatório com o ModelMuse, onde os dados calculados pelo modelo se aproximaram dos observados em campo, alcançando uma calibração satisfatória. Notou-se o rebaixamento do lençol freático na aluvião no período de estiagem e o aumento nos períodos chuvosos. Com base nesses resultados, observou-se que o volume anual explorado da aluvião excede o volume recarregado, resultando em um déficit de cerca de 12.000 m^3, apontando a necessidade de uma gestão do uso consciente. Evidenciando que o modelo computacional é uma ferramenta bastante útil para os gestores fazerem previsões que auxiliem nas tomadas de decisões.

As fontes de abastecimento de água foram avaliadas, pela metodologia aplicada, que se mostrou adaptável para a realidade local. Buscando trazer uma abordagem minimamente quantitativa, observa-se que, dos 11 parâmetros avaliados nesse trabalho, 5 apresentaram uma classificação ruim, apresentando a necessidade de melhorar em aspectos relacionados ao monitoramento quantitativo e qualitativo das fontes utilizadas. Identificou-se as facilidades e fragilidades das fontes de abastecimento, destacando-se de maneira geral, boa disponibilidade das fontes de captação, desde que sejam utilizadas para as finalidades mais adequadas e em quantidades controladas, necessitando de atenção para a necessidade de tratamento dessas fontes, com um contínuo controle de qualidade da água.

Os resultados confirmam que por meio de uma gestão adequada, a aluvião atende as necessidades de água da comunidade Quandú. No entanto, o déficit entre o volume explorado e recarregado da aluvião destaca desafios na gestão dos recursos hídricos, e a utilização de modelos computacionais se revelou útil nesse contexto. O uso diversificado das fontes de água auxilia nessa gestão, demonstrando uma estratégia eficaz para lidar com a escassez hídrica. A metodologia aplicada na pesquisa foi adaptável para a realidade local e permitiu uma avaliação abrangente das fontes de abastecimento de água, no entanto há áreas que demandam melhorias, especialmente no monitoramento das fontes. Observou-se, entre outras necessidades, que o tratamento da água seja uma prioridade, e que o atual modelo de gestão do sistema de abastecimento alternativo de água, na maioria individualizada, seja repensado. Há necessidade da comunidade tomar conhecimento destas questões para melhorar a gestão sustentável dos recursos hídricos, visando garantir o abastecimento adequado de água e promover um uso consciente e eficiente dos recursos disponíveis.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Sobre o modelo computacional, é necessário aprimorar a análise das condições de contorno das cargas de montante e jusante no sistema, a fim de melhor ajustar essas recargas e perdas nessas fronteiras, o que poderia ser feito com piezômetros instalados nestas seções da aluvião. Recomenda-se continuar o monitoramento dos níveis de água do manancial estudado, expandindo a quantidade de poços monitorados e obtendo dados sobre os poços cadastrados que atualmente carecem de informações, visando um ajuste mais preciso do modelo. É necessário também a utilização de dados de evaporação, para avaliar as perdas devido a essa. Além disso, é crucial examinar o comportamento do sistema durante períodos de chuvas consideráveis.

Recomenda-se como propostas de trabalhos futuros, a realização de análise de sensibilidade para o modelo e a simulação de cenários hipotéticos, com acréscimo da explotação e para analisar situações críticas de estiagem, com redução da recarga.

Sabendo que a aluvião é a principal fonte de captação de água, e necessita de uma gestão quantitativa e qualitativa adequada, recomenda-se a utilização de ferramentas para proteção da água armazenada e um tratamento da água a ser

utilizada. Para isso, recomenda-se de forma geral, medidas legais que limitem a remoção de areia, garantindo a preservação da água armazenada. Como é possível que em períodos de extremas seca, o rebaixamento seja excessivo, visando garantir o atendimento da água, é sugerido uma avaliação da viabilidade da construção de uma barragem subterrânea no trecho estudado. Para a operação do tratamento da água desse manancial, uma alternativa recomendada é adotar uma gestão comunitária da captação e tratamento, visando a viabilidade econômica, conforme modelos de gestão do Sistema Integrado de Saneamento Rural (SISAR) no Ceará (SISAR/CE) e no Piauí (SISAR/PI) e o do Serviços de Saneamento Integrado do Norte e Nordeste de Minas Gerais S.A (COPANOR) que demostram ser eficazes.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. DA C.; DELGROSSI, M.E.; OLIVEIRA, L. G. DE.; ÁVILA, M. L. DE. As políticas públicas no semiárido brasileiro: uma revisão de literatura. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 50, n. 2, p. 9-22, 2019. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/download/968/763/3070. Acesso em: 6 mar. 2023.

ALBUQUERQUE, C. G. DE; PONCIANO, I. DE M.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Dinâmica de potenciometria e salinidade de aluvião no semi-árido pernambucano. **Águas Subterrâneas**. 2008. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23673. Acesso em: 30 jan. 2024

ALYAMANI, Mahmoud S.; ŞEN, Zekâi. Determination of Hydraulic Conductivity from Complete Grain-Size Distribution Curves. **Groundwater**, v. 31, n. 4, p. 551-555, dez./2005. Disponível em: https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j. 1745- 6584.1993.tb00587.x. Acesso em: 6 mar. 2023.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: 2013. Brasília. 2013.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Mapa Monitor de Secas**. Disponível em: http://msne.funceme.br/map/mapa-monitor/comparacao. Consulta em 06 mar. 2023.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução ANA nº 126/2011, de 29 de junho de 2011**. Estabelece diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução ANA nº 317/2003, de 26 de agosto de 2003**. Institui o Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos – CNARH.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. 2024. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Consulta em 06 mar. 2024.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied Groundwater Modeling:** Simulation of Flow and Advective Transport. London: Academic Press, 1992. 381p.

ARAÚJO, G. G. L.; VOLTOLINI, T. V.; TURCO, S. H. N.; PEREIRA, L. G. R. **A água nos sistemas de produção de caprinos e ovinos.** In T. V. Voltolini (Org.), Produção de caprinos e ovinos no Semiárido (pp. 69-94). Petrolina: Embrapa Semiárido. 2011.

ARAÚJO, L. F. DE. **Desviufpe como barreira sanitária para melhoria da qualidade de água de chuva em zona rural: determinação de deposição seca e**

melhoria de desempenho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

ARNAUD, L.; GUTIERREZ, A.; ZEGOULLI, I.; GONOMY, N. Modelling groundwater flow in the Plaine du Nord–Massacre shallow aquifer. **Hydrogeology Journal**, Haiti, v. 30, n. 5, p. 1399-1415, abr./2022. Disponível em: https://brgm.hal.science/hal-03771205/document. Acesso em: 24 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292** - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545** - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527 -** Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Solo - Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:** Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484:** Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT — - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** Solo - Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181** - Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro,2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185** - Solo - Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro,2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9603** - Sondagem a trado - Procedimento. Rio de Janeiro,2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.

BAGUMA, D.; LOISKANDL, W. Rainwater harvesting technologies and practises in rural Uganda: a case study. **Mitig Adapt Strateg Glob Change**. v. 15, p. 355–369, 2010.

BEAR, **Dynamics of Fluids in Porous Media.** New York, American Elsevier Publishing Company,1972. 746p.

BELLÓ, S. L.; SENS, M. L.; NONATO, T. C. M.; NETO, A. O. Filtração Inversa em Margem aplicada para o tratamento de água de ambientes aquáticos lênticos: avaliação da distância de filtração no desempenho de tratamento. **Revista AIDS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo e práctica**, 15.1:55–66. 2022.

BEYER, W. Hydrogeological investigations in the deposition of water pollutants. **Journal of Applied Geology**, 12.1:599–606, 1966.

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

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: Funasa. 2014. Disponível em: https://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS+2014.pdf/85bbdcbc-8cd2-4157-940b-90b5c5bcfc87. Acesso em: 30 de jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.** Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde- anexo XX. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html. Acesso em: 06 de mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 888, de 04 de maio de 2021.** Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 06 de mar. 2023.

BRITO, G. L. M. B.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS NETO, S. M.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A.; BRAGA, R. A. P.; SILVA FILHO, S. L. Characterization of the Capibaribe River Dry Bed with Ground Penetrating Radar (GPR). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, *23*, e1. 2018.

CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; ARAÚJO FILHO, P. F.; VASCONCELOS, G. L. M. B.; SILVA, D. J.; COUTINHO, A. P. **Acumulação de sedimentos e água no leito seco dos Rios no Semiárido**. In: R. A. P. Braga (Org.), **Águas de Areias** (pp. 39-70). Recife: Clã. 2016.

CAETANO, T. O.; PAIVA, A. L. R. DE.; SILVA, S. R. DA.; COUTINHO, A. O. P.; CIRILO, J. A.; CABRAL, J. J. DA S. P. Abastecimento rural de água: uso e demanda em comunidades do Semiárido e a disponibilidade hídrica das aluviões. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, n. 8, p. 1-16, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.21168/rega.v17e8.

CARMAN, P.C. **Flow of Gases through Porous Media**. Butterworths Scientific Publications, London. 1956.

CARMAN, P.C. Fluid Flow through Granular Beds. **Trans.Inst.Chem. Eng.**, 15,150. 1937.

CARRIER, W.D. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 1054. 2003.

CARVALHO JR. et al. Avaliação das perdas de água em trânsito em rios perenizados do semi-árido. FUNCEME. Fortaleza/CE. 2002.

CARVALHO, A. M.; FREITAS, L. G.; BARBOSA, A. M.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. A.; MONDELLI, G. Determinação da condutividade hidráulica de uma área contaminada no município de Santo André utilizando-se método slug test. **Revista de Águas Subterrâneas**. São Paulo. v. 27. n. 3. p. 71-87. 2013.

CHENG, C.; CHEN, X. Evaluation of methods for determination of hydraulic properties in an aquifer- aquitard system hydrologically connected to river. **Hydrogeology Journal***.* 15: 669-678. 2007.

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

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. DE M.; CAMPOS, P. H. DE A. L. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. **12 SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa.** Brasília. 2015.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M.G.L.; CAMPOS, J. N.B. **A questão da água no semiárido brasileiro.** Águas no Brasil: Análises Estratégicas (p.79-91). Cap. 5. Editora: Academia Brasileira de Ciências. 2010.

CONSEMA. Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado de Pernambuco. Resolução 01/2013 - **Estabelece normas e procedimentos para o licenciamento ambiental para a exploração de areia e argila em leitos secos de rios intermitentes no Estado de Pernambuco**.

COSTA, M. R.; CIRILO, J.A. Análise do potencial de uso das águas subterrâneas na semi-árida do estado de Pernambuco. II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo, SP. **Anais [...]** 2011.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología Subterránea**. 2 ed. Barcelona: Omega S/A, v. 2, 1983.

D'ORIA, M.; ZANINI, A. Characterization of hydraulic heterogeneity of alluvial aquifer using natural stimuli: a field experience of Northern Italy. **Water**, v. 11, n. 1, p. 176, 2019.

DEMÉTRIO *et al*. Características hidrogeológicas das aluviões do rio Beberibe na área da bateria de poços no bairro de caixa d`água, Olinda-PE. **Águas Subterrâneas**. v. 27, n. 3, p. 111 – 126, 2013.

DEMÉTRIO, J. G. A.; PAIVA, A. L. R. de; FREITAS, D. A. de; BATISTA, A. G. dos S.; PEREIRA CABRAL, J. J. da S. Características hidrogeológicas das aluviões do rio Beberibe na área da bateria de poços no bairro de caixa d`água, Olinda-PE. **Águas Subterrâneas**, *[S. l.]*, v. 27, n. 3, 2013. DOI: 10.14295/ras.v27i3.27411. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27411. Acesso em: 02 mar. 2023.

DINIZ, João. **Potencial hídrico dos rios intermitentes no semiárido nordestino**. Palestra proferida no Encontro Nacional sobre Governança de Águas dos Rios Intermitentes - ENGARI. Promoção: Associação Águas do Nordeste, Recife, 18 a 20 de novembro de 2015.

DOMÈNECH, L.; HEIJNEN, H; SAURÍ, D. Rainwater harvesting for human consumption and livelihood improvement in rural Nepal: benefits and risks. **Water and Environment Journal**. v. 26, n. 4, p. 465 – 472, 2012.

EHTIAT, M.; MOUSAVI, S. J.; SRINIVASAN, R. Groundwater Modeling Under Variable Operating Conditions Using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: a Catchment Scale Approach to Water Resources Management. **Water Resource Management**, v. 32, p. 1631-1649, 2018.

FANG, K.; JI, X.; SHEN, C.; LUDWIG, N.; GODFREY, P.; MAHJABIN, T.; DOUGHTY, C. Combining a land surface model with groundwater model calibration to assess the impacts of groundwater pumping in a mountainous desert basin. **Advances in Water Resources**, v. 130, p. 18-28, 2019

FEITOSA, F. A. C.; COSTA FILHO, W. D. **Execução de testes de bombeamento em poços tubulares.** CPRM. 1998. 24p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM . 2008. 812 p.

FERNANDES, M. A. **Condutividade hidráulica não saturada de um solo arenoso: aplicação do infiltrômetro de disco**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.

FIORI. J. P. O. **Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Brasília. 2010.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Águas Subterrâneas**. 1° ed. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2017.

GARRIDO, J.; ROCHA, W.; GAMBRILL, M.; COLLET, H. **Estudo de modelos de gestão de serviços de abastecimento de água no meio rural no Brasil, 1a Edição – Parte I. Banco Mundial.** Garrido, J ed. 2016.

GOMES, U. A. F. **Água em situação de escassez: Água de chuva para quem?** Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

GOOGLE EARTH. Imagem de satélite. Disponível em: http://earth.google.com. Acesso em: Janeiro de 2023.

GROPIUS, M.; DAHABIYEH, M.; AL HYARI, M.; BRÜCKNER, F. ; LINDENMAIER, F.; VASSOLO, S. Estimation of unrecorded groundwater abstractions in Jordan through regional groundwater modelling. **Hydrogeology Journal**, v. 30, p. 1769-1787, ago./2022. Disponível em: https://doi.org/10.21168/rega.v17e8. Acesso em: 13 jan. 2023.

HARBAUGH, A.W. BANTA, E. R.; HILL, M. C.; MCDONALD, M. G. **Modflow-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground- Water Flow Process**. Open File Rept. OFR00-92, U. S. Geol. Survey. Denver, CO.121p. 2000.

HARBAUGH, A.W. **MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process.** U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 2005.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: Sposito, G. (ed.). **Scale dependence and scale invariance in hydrology**. Cambridge: Cambridge University Press, p.190–223. 1998.

HAZEN, A. **Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration**. 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, Pub.Doc. No.34, 539-556. 1892.

HENIG, E.V. Breves reflexões sobre os resultados do Programa 1 Milhão de Cisternas. **Revista Serviço Social em Revista**, v. 26, 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de orçamentos familiares 2017-2018: primeiros resultados. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Coordenação de Trabalho e Rendimento**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE - instituto brasileiro de geografia e estatística. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE - instituto brasileiro de geografia e estatística. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

IICA - Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. **Plano de Integração das Bacias Hidrográficas de Alagoas**. Aproveitamento das infraestruturas existentes, irrigação e abastecimento da zona semiárida estadual. 2007.

KLAAS, D. K. S. Y.; IMTEAZ, M. A.; SUDIAYEM, I.; KLAAS, E. M. E.; KLAAS, E. C. M. Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on

groundwater resource sustainability and management strategies. **Journal of Hydrology**, v. 582, 2020.

KOZENY, J. Uber Kapillare Leitung Des Wassers in Boden. **Sitzungsber Akad. Wiss. Wien Math.Naturwiss.Kl.**, Abt.2a, 136, 271-306. German. 1927.

KRESIC, N. **Quantative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling**. Boca Raton: Lewis Publishers,1997. 445 p.

KRESIC, N.; PANDAY, S. Modeling of groundwater flow and transport in coastal karst aquifers. **Hydrogeology Journal**, v. 29, n. 1, p. 249–258, 2021.

LAFAYETTE, F. B. **Proposta e avaliação de modelo de gestão de abastecimento de água no meio rural no estado de Pernambuco**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2021.

LANDAU, E. C.; MOURA, L.; LUZ, W. V. **Variação geográfica do saneamento básico no Brasil em 2010: domicílios urbanos e rurais** (Vol. 1). Brasília, DF: Embrapa. 2016.

LANGEVIN, C.D.; HUGHES, J.D.; BANTA, E.R.; PROVOST, A.M.; NISWONGER, R.G.; PANDAY, S. **Modelo Hidrológico Modular MODFLOW 6: US Geological Survey Software**. 2017.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R.. Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters through infiltration experiments – BEST. **Soil Science Society of American Journal, Madison**, v.70, pp. 521-532. 2006.

LEITE, C. E. S.; ANDRADE, F. C. M.; MÖBUS, G. e SOUZA, N. P. R. Modelagem geométrica de um trecho aluvionar do Rio Palhano na comunidade do Chile, no limite dos municípios de Morada Nova e Ibicuitinga – CE. Fortaleza. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. 2000.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 1 ago. 2017.

MARTINS, E. S. P. R. *et al*. A multimethod attribution analysis of the prolonged northeast Brazil hydrometeorological drought (2012–16). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 1, p. S65–S69, 1 jan. 2018.

MARTINS, E. S. P. R. *et al*. **Mapeamento e avaliação do potencial hídrico subterrâneo dos aluviões em zonas semiáridas utilizando técnicas de sensoriamento remoto e SIG**. Fortaleza, 2007.

McDONALD, M.G.; HARBAUGH, A.W. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. **Technical Report**. Denver: U.S. Geological Survey (USGS). 1988.

MENDONÇA, Z. C. L.; CANDEIAS, A. L. B.; SELVA, V. F.; SILVA, M. M.; RODRIGUES, G. G.; SANTOS, S. M. Aspectos sanitários e de uso da água em

pequenas comunidades rurais do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 5, 1191-1202. 2012.

MENKE, A. B.; GUIMARÃES, R. F.; OLIVEIRA, S. N. DE.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. DE. Compartimentação geomorfológica preliminar do rio Ipanema (AL/PE) utilizando análise multivariada em bacias hidrográficas de 1ª ordem. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), Salvador. **Anais...** Cariri:2018.

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.

MOOERS, E. W.; JAMIESON, R. C.; HAYWARD, J. L.; DRAGE, J.; LAKE, C. B. Low-impact development effects on aquifer recharge using coupled surface and groundwater models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 9, p. 1-11, 2018.

MOURA, M. S. B. de; GAMA, G. F. B. (Ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007.

NASCIMENTO, P. G. do N. **Semiárido alagoano: dinâmica socioambiental de nascentes em poço das trincheiras – AL**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

OCHOA, C. G.; SIERRA, A. M.; VIVES, L.; ZIMMERMANN, E.; BAILEY, R. Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 6, p. 1371-1392, 2020.

ODONG, J. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain size analysis. **Journal of American Science**, 2008.

PAIVA, A.L.R. **O processo de filtração em margem e um estudo de caso no rio Beberibe**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2009.

PALHARES, J. C. P. **Consumo de água na produção animal** (Comunicado Técnico, No. 102). São Carlos: EMBRAPA. 2013.

PEDEN, D.; TADESSE, G.; MISRA, A. K. ***Water and livestock form human development***. 2018. Recuperado em 30 de janeiro de 2024, de http://www.iwmi.cgiar.org/assessment/Water%20for%20Food%20Water%20for%20Life/Chapters/Chapter%2013%20Livestock.pdf

PERDIKAKI, M.; MAKROPOULOS, C.; KALLIORAS, A. *Participatory groundwater modeling for managed aquifer recharge as a tool for water resources management of a coastal aquifer in Greece.* **Hydrogeology Journal**, v. 30, p. 37-58. 2022.

PERNAMBUCO. Ministério de Desenvolvimento Regional. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. **Delimitação do Semiárido**. 2021.

PERNAMBUCO. Governo do Estado. Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento. **Pernambuco Tridimensional -** PE3D. Disponível em: http://www.pe 3d.pe.gov.br/. Acesso em: 06 nov. 2023.

PFANNKUCH, H.-O. *et al*. Review: “Jacob’s Zoo”—how using Jacob’s method for aquifer testing leads to more intuitive understanding of aquifer characteristics. **Hydrogeology Journal**, v. 29, n. 6, p. 2001–2015, 25 set. 2021.

PINEDA, G. Y. F. **Gestão comunitária para abastecimento de água em áreas rurais: uma análise comparativa de experiências no brasil e na nicarágua**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

POULSEN, T. G.; MOLDRUP, P.; YAMAGUCHI, T.; JACOBSEN, O. H. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. **Soil Science**, 164(2), 877-887.1999.

RAU, G. C.; CUTHBERT, M. O.; POST, V. E. A.; Schweizer, D. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. **Hydrogeology Journal**, v. 28, n. 8, p. 2963–2969, 2020.

Rodrigues, F. B. **Caracterização hidrogeológica de depósito aluvial do Riacho Boa Vista no Sítio Caiçara, Afogados da Ingazeira, PE.** 2012. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2012.

ROSSETTO R., BORSI I., FOGLIA L. FREEWAT: FREE and open-source software tools for WATer resource management. Roma, Rendiconti Online**, Società Geologica Italiana,** v.35, p. 252-255, 2015.

ROSSMAN, N. R.; ZLOTNIK, V. A.; ROWE, C. M. Simulating lake and wetland areal coverage under future groundwater recharge projections: The Nebraska Sand Hills system**. Journal of Hydrology**, v. 576, p. 185-196, 2019.

SAFRE, L. dos S. S. **Simulação numérica do fluxo das águas subterrâneas na estação ecológica de Santa Barbára/SP**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2018.

SALARASHAYERI, A.F.; SIOSEMARDE, M. Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 2012.

SANTOS, L. M. A.; COELHO, P. A.; TABORDA, D. M. Influence of the variability of Coimbra sand index properties on its permeability. **XV Congresso Nacional de Geotecnia e VIII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia.** Porto. 2016.

SANTOS, L. M. A.; COELHO, P. A.; TABORDA, D. M. Influence of the variability of Coimbra sand index properties on its permeability. **XV Congresso Nacional de Geotecnia e VIII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia.** Porto. 2016.

SANTOS, M. V. C. dos. **Estudo do comportamento de um pequeno aquífero aluvial na bacia experimental de Santana do Ipanema:** Semi-árido Alagoano. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R.; SILVA, V. F. da. Qualidade da água em barragem subterrânea no semiárido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 3, p. 651 - 662, 2016.

SANTOS, W. J. S. dos *et al*. Fluxo e armazenamento de água em aluvião do semiárido pernambucano para abastecimento de pequenas comunidades. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, v. 55, n. 4, p. 479–497, 2020.

SANTOS, W. J. S. dos. **Fluxo de água na aluvião em um trecho do rio Capibaribe no semiárido pernambucano**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

SANTOS, W. J. S.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M.; COELHO, V. H. R. Alternative water supply: Use, demand and final destination in a rural community in semi-arid alagoano. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 18 (5), e05187. 2024.

SATHISH, S.; MOHAMED, M.; KLAMMLER, H. Regional groundwater flow model for Abu Dhabi Emirate: scenario based investigation. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, 2018.

Shepherd, R.G. Correlations of permeability and grain size. **Groundwater**. 27(5):663-638. 1989.

SILVA, A. S. **Qualidade de água de abastecimento na zona rural de Santa Rita – PB e propostas de melhoria**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SILVA, G.; FIGUEIREDO, L.; MORAES, M. Curvas de demanda pelos recursos hídricos dos principais usos consuntivos no submédio da bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 36, p. 45-59, 2015.

SLICHTER, C.S. **Theoretical investigations of the motions of groundwater**. USGS, pages 295–384, 1898.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**.Brasília, SNS/MDR, 183p. 2020.

SOUZA, E. S. de. **Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do estado da paraíba**: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente. 2005. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 138p. 2005.

SPITZ, K.; MORENO, J. **A practical guide to groundwater and solute transport modeling.** New York: John Wiley and Sons,1996. 461p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. New York: Wiley, 1964.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis**. São Paulo: Navegar, 2009. 278 p.

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no Brasil:** problemas, desafios e estratégias para o futuro. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014. 76 p.: 25 cm.

UMA, K.O.; EGBOKA, B.C.E.; ONUOHA, K.M. New statistical grain-size method for evaluating the hydraulic conductivity of sandy aquifers. **Journal of Hydrology**, Amsterdam,108,367-386. 16. 1989.

UNITED STATES. Department of Agriculture. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Washington, **Soil Conservation Service**, 1967. 50 p.

VASCONCELOS, G. L. M. B. **Caracterização hidrogeofísca do leito seco do rio Capibaribe**. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2015.

VASCONCELOS, M. B. Poços para captação de águas subterrâneas: revisão de conceitos e proposta de nomenclatura. *In*: **Anais ...** do 8° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2014.

VUKOVIC, M.; SORO, A. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition. **Water Resources Publications**, Littleton, Colorado. 1992

WATERLOO. Waterloo hydrogeologic. 2023. **Aquifer test**. Disponível em: https://www.waterloohydrogeologic.com/products/aquifertest. Acessado em: 12 de Mar. 2023.

WU, S. C. *et al*. Optimization of Groundwater Quality Monitoring Network Using Risk Assessment and Geostatistic Approach. **Water Resources Management**, v. 31, n. 1, p. 515–530, 1 jan. 2017.

ZEINALI, M.; AZARI, A.; HEIDARI, M. M. Simulating unsaturated zone of soil for estimating the recharge rate and flow exchange between a river and an aquifer. Water **Resources Management**, v. 34, p. 425-443, 2020.

APÊNDICE A – CADASTRO DOS MANANCIAIS E USOS DA ÁGUA

Formulário nº _____	Data:
Responsável pelo cadastro: _____	

DADOS DO USUÁRIO	
Nome do entrevistado:	
Localidade: ( ) residência ( ) Comércio	Nome da propriedade:
Endereço:	
Município:	
Celular:	Número de pessoas residentes: (que utilizam os mananciais)
Coordenadas geográficas (residência) Latitude: Longitude:	
Há abastecimento da residência pela rede pública? ( ) sim ( ) Não	Há abastecimento de água por outros mananciais? ( ) Sim ( ) Não

TIPOS DE USO DA ÁGUA (Todos os mananciais)	
( ) Criação de animais ( ) Pesca ( ) Irrigação ( ) Indústria	( ) Banho ( ) Beber e preparar alimentos ( ) Lavagens (Pisos e roupas) ( ) Sanitário (descarga) ( ) Uso de terceiros

IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES DE CAPTAÇÃO	
Tipo: ( ) Rio ou riacho ( ) Açuce ( ) Barreiro	( ) Cacimba (Poço escavado s/ revest.) ( ) Cacimbão (Poço Amazonas c/ rev.) ( ) Poço tubular ( ) Olho dágua (Nascente)

Registro de anos extremos (estiagem ou cheias): _____ _____

<table>
<tr><td colspan="3">MANANCIAL 1 – Rio ou Riacho (que não seja o Rio Ipanema/Aluvião)</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DO PONTO DE CAPTAÇÃO (Preencher um formulário para cada ponto)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Nome:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Coordenadas Geográficas
Latitude: Longitude:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Distância do ponto de captação ao ponto de consumo (Estimativa):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE USO DA ÁGUA (deste manancial)</td></tr>
<tr><td colspan="2">( ) Criação de animais
( ) Pesca
( ) Irrigação
( ) Indústria</td><td>( ) Banho
( ) Beber e preparar alimentos
( ) Lavagens (Pisos e roupas)
( ) Sanitário (descarga)
( ) Uso de terceiros</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DA VAZÃO DE CAPTAÇÃO (deste manancial)</td></tr>
<tr><td>Vazão média (m³/dia):</td><td>Tempo (h/dia):</td><td>Período (dias/mês):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE CAPTAÇÃO</td></tr>
<tr><td colspan="2">Mecanizado:
( ) Sim ( ) Não
Retirada Manual:
( ) Sim ( ) Não</td><td>Por bombeamento:
Vazão (m³/dia)_____
Potência das bombas:
_____CV _____HP</td></tr>
<tr><td colspan="2">Há quanto tempo o usuário usa o manancial?</td><td>Houve alteração da vazão captada?
( ) Sim ( ) Não
Por que?</td></tr>
<tr><td colspan="3">O manancial atende bem à demanda durante todo o ano ou há interferência da estação do ano (inverno/verão)?</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="3">MANANCIAL 2 – AÇUDE ou BARREIRO</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DO PONTO DE CAPTAÇÃO (Preencher um formulário para cada ponto)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nome:</td><td>Capacidade máxima de acumulação (m³)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Coordenadas Geográficas
Latitude: Longitude:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Distância do ponto de captação ao ponto de consumo (Estimativa):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE USO DA ÁGUA (deste manancial)</td></tr>
<tr><td colspan="2">( ) Criação de animais
( ) Pesca
( ) Irrigação
( ) Indústria</td><td>( ) Banho
( ) Beber e preparar alimentos
( ) Lavagens (Pisos e roupas)
( ) Sanitário (descarga)
( ) Uso de terceiros</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DA VAZÃO DE CAPTAÇÃO (deste manancial)</td></tr>
<tr><td>Vazão média (m³/dia):</td><td>Tempo (h/dia):</td><td>Período (dias/mês):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE CAPTAÇÃO</td></tr>
<tr><td colspan="2">Mecanizado:
( ) Sim ( ) Não
Retirada Manual:
( ) Sim ( ) Não</td><td>Por bombeamento:
Vazão (m³/dia)_____
Potência das bombas:
_____CV _____HP</td></tr>
<tr><td colspan="2">Há quanto tempo o usuário usa o manancial?</td><td>Houve alteração da vazão captada?
( ) Sim ( ) Não
Por que?</td></tr>
<tr><td colspan="3">O manancial atende bem à demanda durante todo o ano ou há interferência da estação do ano (inverno/verão)?</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="3">MANANCIAL 3 – ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (considerar o rio Ipanema/aluvião)</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DO PONTO DE CAPTAÇÃO (Preencher um formulário para cada ponto)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tipo construtivo do poço:
( ) Cacimba (Poço escavado s/ reves.)
( ) Cacimbão (Poço escavado c/ reves.)
( ) Poço tubular

( ) Coberto
( ) Aberto</td><td>( ) Alvenaria de tijolo
( ) Outros _____</td></tr>
<tr><td colspan="3">Localização:
( ) No leito ( ) Fora do leito</td></tr>
<tr><td colspan="3">Compartilhamento do poço:
( ) Individual ( ) Compartilhado com outras residências
Quantidade de residências total: _____ (inclusive a atual)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Distância do ponto de captação ao ponto de consumo (Estimativa):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE USO DA ÁGUA (deste manancial)</td></tr>
<tr><td colspan="2">( ) Criação de animais
( ) Pesca
( ) Irrigação
( ) Indústria</td><td>( ) Banho
( ) Beber e preparar alimentos
( ) Lavagens (Pisos e roupas)
( ) Sanitário (descarga)
( ) Uso de terceiros</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DA VAZÃO DE CAPTAÇÃO (deste manancial)</td></tr>
<tr><td>Vazão média (m³/dia):</td><td>Tempo (h/dia):</td><td>Período (dias/mês):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE CAPTAÇÃO</td></tr>
<tr><td colspan="3">( ) Manual
( ) Bomba sapo ( ) elétrica ( ) à combustão
( ) Bomba não submersa ( )elétrica ( ) à combustão
( ) Bomba injetora ( )elétrica ( ) à combustão
Potência das bombas: _____CV _____HP</td></tr>
<tr><td colspan="2">Há quanto tempo o usuário usa o manancial?</td><td>Houve alteração da vazão captada?
( ) Sim ( ) Não
Por que?</td></tr>
<tr><td colspan="3">O manancial atende bem à demanda durante todo o ano ou há interferência da estação do ano (inverno/verão)?</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="3">MANANCIAL 4 – NASCENTE (OLHO D’ÁGUA)</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DO PONTO DE CAPTAÇÃO (Preencher um formulário para cada ponto)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Nome:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Há caixa de proteção no ponto de captação:
( ) Sim ( ) Não</td></tr>
<tr><td colspan="3">Coordenadas Geográficas
Latitude: Longitude:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Distância do ponto de captação ao ponto de consumo (Estimativa):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE USO DA ÁGUA (deste manancial)</td></tr>
<tr><td colspan="2">( ) Criação de animais
( ) Pesca
( ) Irrigação
( ) Indústria</td><td>( ) Banho
( ) Beber e preparar alimentos
( ) Lavagens (Pisos e roupas)
( ) Sanitário (descarga)
( ) Uso de terceiros</td></tr>
<tr><td colspan="3">DADOS DA VAZÃO DE CAPTAÇÃO (deste manancial)</td></tr>
<tr><td>Vazão média (m³/dia):</td><td>Tempo (h/dia):</td><td>Período (dias/mês):</td></tr>
<tr><td colspan="3">TIPOS DE CAPTAÇÃO</td></tr>
<tr><td>Mecanizado:
( ) Sim ( ) Não
Retirada Manual:
( ) Sim ( ) Não</td><td colspan="2">Por bombeamento:
Vazão (m³/dia)_____
Potência das bombas:
_____CV _____HP</td></tr>
<tr><td>Há quanto tempo o usuário usa o manancial?</td><td colspan="2">Houve alteração da vazão captada?
( ) Sim ( ) Não
Por que?</td></tr>
<tr><td colspan="3">O manancial atende bem à demanda durante todo o ano ou há interferência da estação do ano (inverno/verão)?</td></tr>
</table>

USOS DA ÁGUA: IRRIGAÇÃO (dados do usuário em anos normais)														
Vazão: Potência do motor: Diâmetro do cano de saída:														
Nº de horas em que a bomba permanece ligada/dia		Nº de dias por semana												
Dados Gerais do Sistema de Irrigação														
Área total da propriedade (ha ou Tarefas):														
Culturas Perenes/semiperenes/ Temporárias														
Cultura	Área (Ha ou tarefas)	Meses do ano que utiliza irrigação												
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Todos
Observações:														

CADASTRO PARA CRIAÇÃO DE ANIMAIS (dados do usuário em anos normais)		
Espécie animal	Nº de animais	Tipo de uso Dessedentação e /ou Limpeza

OUTROS USOS
Tipo de uso:
Estimativa da vazão:

USO DE ÁGUA DE CHUVA
Há cisterna para captação de água de chuva na propriedade? ( ) Sim ( ) Não (Nesse caso, continue no próximo quadro abaixo)
Capacidade da cisterna (m^3) (Estimativa): _____
Tipo de cisterna ( ) Coleta de água do telhado ( ) Calçadão Área estimada de telhado (m^2): _____
A Cisterna também recebe água do carro-pipa? ( ) Sim ( ) Não Caso positivo, há pagamento pela água do carro-pipa? ( ) ( ) Não Qual a origem da água do carro pipa? ( ) Prefeitura ( ) Exército ( ) Outros: _____
( ) Beber ( ) Lavar roupa ( ) Cozinhar ( ) Banho ( ) Outros
A água armazenada na cisterna devido à chuva atende à necessidade de água durante todo o período de estiagem em todos os anos? ( ) Sim ( ) Não Qual o período crítico (meses) :_____ Repete-se anualmente? ( ) Sim ( ) Não

CASO NÃO HAJA CISTERNA NA PROPRIEDADE (continue aqui)
Há interesse
Do usuário em implantar uma cisterna de captação de águas pluviais na propriedade? ( ) Sim ( ) Não
Há disponibilidade de área de captação de águas pluviais na propriedade? ( ) Sim ( ) Não Área estimada de telhado (m^2): _____

TIPOS DE DESTINAÇÃO FINAL DE ESGOTO SANITÁRIO
Qual o tipo de sistema de destinação final do esgoto sanitário da residência? ( ) Fossa ( ) Outro _____ O Esgoto vai todo para a fossa/outro? ( ) Sim ( ) Não
Qual a divisão da destinação final? ( )Águas Cinzas para a sarjeta/meio-fio e Águas negras para fossa/outro Outra forma de divisão (especificar):_____ _____ _____
Você acha que o esgoto da sarjeta/meio-fio, pode escoar e contaminar o rio Ipanema/Aluvião? ( ) Sim ( ) Não

APÊNDICE B – PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DAS FONTES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ADAPTADO DE GARRIDO *ET AL.* (2016)

Quadro B1 - Classificação dos parâmetros para avaliação operacional da gestão do abastecimento de água.

Nº	Parâmetro de avaliação
1	**Cobertura da fonte de captação de água:** Se o atendimento da comunidade pela fonte de captação cobertura: Critérios: a) universal (total); b) parcial; c) sem rede (inexistente)
2	**Condição do abastecimento:** Se a continuidade e a regularidade do abastecimento se dão de forma: Critérios: a) contínua/regular; b) por manobra (intermitente); c) racionada
3	**Adequação do tratamento da água:** Pela condição do manancial, se a tecnologia e a eficiência do tratamento são: Critérios: a) adequadas; b) pouco adequadas; c) não há tratamento (inexistente)
4	**Controle da qualidade da água:** Existindo tratamento, se o controle de qualidade é: Critérios: a) satisfatório; b) parcial; c) não há controle (inexistente)
5	**Acesso a novas conexões:** As novas ligações nas fontes de captação existente são acessadas de forma: Parâmetros: a) facilitada (ágil e parcelado); b) razoável; c) custosa
6	**Domínio da tecnologia do sistema:** Se a operação local domina a tecnologia do sistema de forma: Critérios: a) suficiente; b) parcial; c) inexistente
7	**Uso da micromedição:** Os hidrômetros instalados estão na condição seguinte: Critérios: a) em uso; b) sem uso; c) não há hidrômetro (inexistente)
8	**Uso da macromedição:** Os macromedidores instalados estão na condição seguinte: Critérios: a) em uso com calibragem; b) sem calibragem; c) não há (inexistente)
9	**Controle de nível do reservatório:** A captação para o reservatório tem o controle: Critérios: a) automático; b) manual com eficiência; c) precário
10	**Agilidade no reparo da captação/bomba:** O reparo da captação/ bombas se dá de forma: Critérios: a) ágil; b) mediana; c) demorada
11	**Segurança hídrica do manancial:** A segurança do volume/vazão do manancial para atender à demanda é: Critérios: a) elevada; b) mediana; c) baixa

Fonte: Adaptado de Garrido *et al.* (2016).

APÊNDICE C – FONTES DE ABASTECIMENTO, USO, DEMANDA E DESTINAÇÃO FINAL

Tabela C1 - Fontes de abastecimento de água observados, Povoado Quandú - AL

Fonte	Rio ou Riacho	Açude	Barreiro	Aluvião	Poço Tubular	Olho d'água	Água de chuva	Carro Pipa
Quantidade de domicílios	0	0	0	115	0	0	100	56
Percentual (%)	0,00	0,00	0,00	95,83	0,00	0,00	83,33	46,67

Fonte: O Autor (2024).

Tabela C2 - Residências por finalidade de uso e origem da água, Povoado Quandú - AL

	Criação de Animais	Pesca	Irrigação	Indústria	Beber e Alimentos	Banho	Lavagens	Sanitários
Aluvião	15	1	8	0	13	107	115	115
	12,50%	0,83%	6,67%	0,00%	10,83%	89,17%	95,83%	95,83%
Cisterna	0	0	0	0	96	33	30	0
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	80,00%	27,50%	25,00%	0,00%
Total	**15**	**1**	**8**	**0**	**114**	**117**	**120**	**120**
	12,50%	0,83%	6,67%	0,00%	95,00%	97,50%	100,00%	100,00%

Fonte: O Autor (2024).

Tabela C3 - Residências por animais criados, Povoado Quandú - AL

Espécie	Edificações com criação	Percentual
bovinos	11	73,33%
caprinos	2	13,33%
ovinos	4	26,67%
suínos	2	13,33%
galináceos	3	20,00%
Total de edificações com criação	**15**	

Fonte: O Autor (2024).

Tabela C4 - Tipos de destinação final, Povoado Quandú - AL

	Sarjeta	Solo	Fossa
Águas Cinzas	100	80	12
	83,33%	6,67%	10,00%
Águas Negras	6	1	113
	5,00%	0,83%	94,17%

Fonte: O Autor (2024).