



Universidade Federal de Pernambuco

Centro Acadêmico do Agreste

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

DANILO JANUÁRIO SILVA

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO SOLO E QUALIDADE DA ÁGUA DA
ALUVIÃO EM UM TRECHO INTERMITENTE DO RIO CAPIBARIBE - SEMIÁRIDO
PERNAMBUCANO**

Caruaru

2018

DANILO JANUÁRIO SILVA

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO SOLO E QUALIDADE DA ÁGUA DA
ALUVIÃO EM UM TRECHO INTERMITENTE DO RIO CAPIBARIBE - SEMIÁRIDO
PERNAMBUCANO**

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

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: D.Sc. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Coorientador: D.Sc. Artur Paiva Coutinho

Caruaru

2018

DANILO JANUÁRIO SILVA

Caracterização hidrodinâmica do solo e qualidade da água da aluvião em um trecho intermitente do rio Capibaribe - semiárido pernambucano

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

Aprovada em 31/08/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Edevaldo Miguel Alves (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais Lucina Nunes
Paulino e Severino Januário Silva,
meu irmão Diogo Januário Silva e à
minha esposa Maryanna Araújo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Severino Januário Silva e Lucina Nunes Paulino Silva, por todo carinho, dedicação e apoio. Ao meu irmão Diogo Januário Silva, por todo o apoio e colaboração.

À minha esposa Maryanna Araújo, por todo o incentivo, apoio e carinho.

Em especial à minha avó Ana Maria Pereira e à minha tia avó Belarmina Nunes Oliveira, e ao meu irmão Demétrio Januário Silva, in memoriam.

A todos os amigos do mestrado, em especial o colega Luís Lucena, que foi de grande ajuda com as análises de água, e Adson Carvalho, pela ajuda na operação do piezômetro diferencial.

Aos amigos Paulo André Dias da Silva, Carlos Pedrosa e José Eduardo de Lima, que permitiram o monitoramento dos seus respectivos poços, viabilizando esse trabalho.

Ao amigo Iguaracy 'Naldo' Cosme Filho, morador ribeirinho da área de estudo desse trabalho, e sempre disposto a ajudar em todas as idas a campo.

A todos os professores do PPGECAM. Em especial ao professor Anderson Luiz de Ribeiro Paiva, pela dedicação e paciência, por sempre se disponibilizar a ensinar e orientar, mesmo com tempo bastante limitado.

Ao LEA (Laboratório de Engenharia Ambiental – UFPE) e ao LAMTESA (Laboratório Multidisciplinar de Tecnologias para o Semiárido – UFPE), pela concessão do local e de equipamentos para a realização de ensaios para a pesquisa.

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

RESUMO

A região Nordeste, especialmente o semiárido nordestino, que ocupa grande parte da região, ainda é deficiente quanto ao abastecimento de água. A irregularidade e os baixos quantitativos pluviométricos tornam as soluções tradicionais se tornam cada vez menos eficazes em suprir a demanda de recursos hídricos. As águas subterrâneas se mostram como uma alternativa para suprir essas necessidades e seu uso racional, junto com a preservação dos mananciais, se faz cada vez mais necessários. Esta pesquisa, realizada no trecho entre o reservatório de Poço Fundo e a zona urbana de Santa Cruz do Capibaribe, dá continuidade a trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto Águas de Areias, que tinha como objetivo o uso sustentável da água presente na aluvião do Alto Capibaribe. Foram analisadas características da areia e, principalmente da água da aluvião. Foi realizado monitoramento dos níveis de água e de qualidade de água nos poços amazonas, com equipamentos portáteis, que evidenciou a influência da quantidade de água nos parâmetros de qualidade. Ensaio de infiltrometria em solo saturado em algumas seções ao longo do trecho em estudo foram realizados para análise de parâmetros do solo, indicando uma grande capacidade de infiltração. Resultados obtidos em trabalhos anteriores foram utilizados para avaliar a vulnerabilidade desse aquífero, que foi classificado como muito vulnerável. Tais resultados contribuíram para uma análise das condições hidrodinâmicas do rio Capibaribe em um trecho intermitente, agregando informações para melhoria da gestão das comunidades ribeirinhas que depende dos recursos hídricos oriundos do rio.

Palavras-chave: Monitoramento. Infiltração no solo. Vulnerabilidade à poluição.

ABSTRACT

The Northeast, especially the Northeastern semi-arid region, which occupies a large part of the region, is still deficient in water supply. Irregularity and low rainfall make traditional solutions less and less effective in meeting the demand for water resources. Groundwater is an alternative to meet these needs, and its rational use, along with the preservation of water sources, is becoming increasingly necessary. This research, carried out on the section between the reservoir Well Fund and the urban area of Santa Cruz do Capibaribe, continues to work under the Águas de Areias project, which was aimed at sustainable use of water present in the alluvium Alto Capibaribe. Characteristics of the sand and, mainly, the water of the alluvium were analyzed. Water and water quality levels were monitored in Amazonas wells, with portable equipment, which evidenced the influence of the quantity of water on the quality parameters. Infillometry tests on saturated soil in some sections along the study were carried out to analyze soil parameters, indicating a large infiltration capacity. Results obtained in previous works were used to evaluate the vulnerability of this aquifer, which was classified as very vulnerable. These results contributed to an analysis of the hydrodynamic conditions of the Capibaribe River in an intermittent section, adding information to improve the management of the riverine communities that depend on the water resources coming from the river.

Keywords: Monitoring. Soil infiltration. Vulnerability to pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.....	26
Figura 2 - Sonda Multiparamétrica.....	28
Figura 3 - Turbidímetro.....	28
Figura 4 - Infiltrômetro sendo utilizado em campo.....	30
Figura 5 - Infiltrômetro já cravado no leito do rio.....	30
Figura 6 - Piezômetro utilizado.....	31
Figura 7 - Piezômetro sendo utilizado em campo.....	32
Figura 8 - Esquema do piezômetro diferencial.....	32
Figura 9 - Diagrama do método GOD.....	34
Figura 10 - Variação dos níveis de água dos poços monitorados.....	37
Figura 11 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no Poço 1.....	38
Figura 12 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no Poço 2.....	39
Figura 13 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no Poço 3.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrão de potabilidade para alguns parâmetros.....	24
Tabela 2 - Classes de vulnerabilidade do método GOD.....	34
Tabela 3 - Classes de vulnerabilidade do método AVI.....	35
Tabela 4 - Dados dos testes com piezômetro diferencial e valores calculados para os gradientes hidráulicos.....	36
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos dos resultados do monitoramento da qualidade da água.....	42
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de infiltrometria em solo saturado.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Semiárido	15
3.2	Aluvião	16
3.3	Exploração de água	17
3.4	Exploração de areia	18
3.5	Vulnerabilidade à poluição	19
3.6	Caracterização da aluvião	20
3.6.1	Ensaio de campo.....	20
3.6.2	Granulometria e textura do solo.....	22
3.6.3	Monitoramento da qualidade e quantidade da água	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	Área de estudo	25
4.2	Qualidade e quantidade da água da aluvião	26
4.3	Infiltrometria em leito com água	28
4.4	Gradiente hidráulico	30
4.5	Métodos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à poluição	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Gradiente hidráulico	35
5.2	Monitoramento do nível	35
5.3	Monitoramento de parâmetros qualitativos da água da aluvião	36
5.4	Infiltrometria em solo saturado	41
5.5	Avaliação da vulnerabilidade à poluição	42
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	43
6.1	Conclusões	43
6.2	Recomendações	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

As secas prolongadas são um fenômeno recorrente na região do semiárido nordestino e a cada período seco é evidenciada a vulnerabilidade do manejo dos recursos hídricos da região. Nos períodos mais críticos são tomadas medidas emergenciais como o abastecimento através de carros-pipa e outras medidas paliativas. No entanto tais soluções apenas amenizam, momentaneamente o problema, que se repete na próxima estiagem.

A solução mais comum na região, para o armazenamento de água são os barreiros e açudes, reservatórios de pequeno e grande porte, respectivamente. Em ambos os casos, especialmente para os barreiros, a alta evaporação da região torna os reservatórios insuficientes para o abastecimento de água a longo prazo.

Outra solução adotada na região é a perfuração de poços, porém devido ao semiárido encontrar-se sobre formações cristalinas, em sua maior parte, problemas como baixas vazões ou mesmo ausência de água e alta salinidade são comuns (CIRILO *et al.*, 2013).

No Nordeste do Brasil ocorrem importantes depósitos aluviais que dão origem a expressivas reservas de águas subterrâneas, situadas ao longo dos vales da grande rede de drenagem regional. Estas reservas são fundamentais para o desenvolvimento econômico e social de diversas comunidades, e constituem uma importante fonte de água para diversos usos, como abastecimento público, irrigação, tanto de subsistência como comercial, pecuária, entre outros e que é ao longo desses vales que se concentra a maioria da população rural aumentando, conseqüentemente, a demanda por água (GOMES & FRISCHKORN, 2009; SÁ & DINIZ, 2012).

Na região estudada, as águas aluviais são utilizadas no consumo doméstico, agricultura e pecuária de subsistência. Comumente, viam-se plantios de vegetais como beterraba e cenoura para abastecer as feiras livres da região, apesar das características da qualidade da água, que possui altos teores salinos. Além disso, em períodos de estiagem a aluvião torna-se uma fonte de grande importância para o abastecimento da zona urbana, fazendo a exploração dessas águas através de poços escavados (BRAGA *et al.*, 2014).

Entretanto as areias dos leitos secos dos rios intermitentes são muito importantes para outra atividade que também contribui para o desenvolvimento da região, a construção civil, que apresentou crescimento significativo nos últimos anos, conseqüentemente, aumentando a demanda por areia e a exploração do leito do rio, que passou a ser feita de forma mecanizada por meio de escavadeiras e dragas. Assim a velocidade da retirada de areia supera muito a recarga natural causada pelas enxurradas das épocas chuvosas que carregam sedimentos ao longo do leito do rio, além disso, a estiagem que ainda vigora na região contribuiu ainda mais para o agravamento do conflito entre esses dois usos da aluvião (BRAGA *et al.*, 2014).

A crescente preocupação com a gestão dos recursos naturais e a escassez de água tem levado à elaboração de políticas públicas e privadas, orientadas por meio do uso das chamadas tecnologias sociais. Muitas comunidades difusas fazem uso desses recursos hídricos, principalmente em tempos de estiagem. Nesse contexto, estas comunidades rurais precisam entender e aplicar os conceitos de sustentabilidade hídrica, para garantir o uso racional da água que deve ser explorada de acordo com as suas potencialidades naturais (GOMES & FRISCHKORN, 2009; PEDROSA *et al.*, 2010; BRAGA *et al.*, 2014).

O uso das águas provenientes da aluvião na região do Alto Capibaribe pelas comunidades ribeirinhas cresceu quantitativamente e em importância por causa da estiagem prolongada que a região enfrenta; ao mesmo tempo o crescimento da economia e, conseqüentemente, das atividades da construção civil fez aumentar a demanda de areia, que geralmente é extraída de leitos de rios. Tanto o uso da água quanto o da areia, sendo feitos sem o conhecimento das potencialidades e restrições, característicos do regime da deposição de sedimentos e do armazenamento de água na aluvião, pode levar ao esgotamento dos dois recursos, prejudicando o uso da água e da areia (BRAGA *et al.*, 2014).

Além da preocupação com a quantidade de água disponível, também deve existir o cuidado com a qualidade desse recurso, que pode ser afetada tanto pela exploração feita sem controle, quanto devido à poluição do aquífero. E apesar de, no senso comum, serem vistas como mais protegidas em relação a esses aspectos, as águas subterrâneas podem ser vulneráveis à contaminação por poluentes (BOVOLATO, 2007; HIRATA & FERNANDES, 2008; SOUZA, 2009).

Para que a exploração da água da aluvião seja feita de forma sustentável é necessário, entre outras coisas, conhecer melhor as variações na quantidade e na qualidade da água, assim como investigar a susceptibilidade desse aquífero à poluição. Assim torna-se possível enquadrar e dimensionar a utilização dos recursos hídricos; e também direcionar o uso do solo na região de modo a causar o mínimo de impacto sobre o aquífero.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a estrutura e as características hidrodinâmicas do solo; e a qualidade da água acumulada na aluvião em um trecho intermitente do alto rio Capibaribe, no semiárido pernambucano.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o comportamento do solo da aluvião quanto à infiltração de água, através de ensaios de infiltrometria, em diversas seções ao longo da área de estudo;
- Caracterizar o padrão de qualidade da água acumulada na aluvião da área de estudo;
- Avaliar a vulnerabilidade do aquífero aluvial em relação à poluição.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Semiárido

As regiões semiáridas têm como características precipitações anuais menores que 800 mm, potencial de evaporação é próximo dos 2500 mm. Geralmente as regiões semiáridas se localizam próximas a desertos, localizando-se como a transição entre o deserto e outra região mais úmida, porém o Brasil apresenta uma exceção (SILVA *et al.*, 2010; PINHEIRO *et al.*, 2017).

No Brasil a região do semiárido ocupa cerca de 12% do território nacional. Essa região apresenta como cobertura vegetal predominante a caatinga. A caatinga possui uma grande diversidade de espécies, sendo muitas delas endêmicas (PINHEIRO *et al.*, 2017). O semiárido brasileiro está inserido, na sua maior parte, na região Nordeste. Quanto à hidrogeologia, o Nordeste do Brasil apresenta quatro províncias: a Província do Escudo Oriental Nordeste, a Província do São Francisco, a Província do Parnaíba e a Província Costeira. O semiárido, quase em sua totalidade, encontra-se sobre a Província do Escudo Oriental Nordeste que apresenta predominantemente rochas cristalinas e em consequência disso um potencial muito pequeno de armazenamento de água no subsolo, esse fato combinado com o regime pluviométrico da região faz com que a pouca água que eventualmente é encontrada em fissuras na rocha cristalina de embasamento tenha altos teores de sais dissolvidos. Em meio ao embasamento cristalino ocorrem, pontualmente, algumas regiões de rochas sedimentares que devido à sua quantidade reduzida na região adquirem uma grande importância, pois são mais propícias ao acúmulo de água subterrânea (CPRM, 2004).

No semiárido a maioria dos rios se enquadra como intermitente devido, principalmente, às precipitações que são de baixa intensidade, ao regime irregular de chuvas, às grandes taxas de evaporação e aos solos rasos (SABIÁ, 2008). Rios intermitentes são rios nos quais o escoamento superficial não é regular ao longo do tempo, havendo épocas de cheia, em que há escoamento superficial no leito do rio, e de estiagem quando deixa de existir escoamento. Mesmo com a irregularidade da vazão, muitas comunidades se formam às margens desses rios na região semiárida devido à possibilidade de se utilizar as águas presentes no solo do leito seco desses rios (BRAGA *et al.*, 2014).

Em Pernambuco, 88% da área do estado pertence ao semiárido e 84% da área estadual está sobre embasamento de rocha cristalina, onde é característica a ocorrência de aquíferos fissurais. Pernambuco possui parte de algumas bacias sedimentares, onde ocorrem aquíferos intersticiais, como a bacia sedimentar do Araripe, da qual cerca de um terço está no território pernambucano, representando pouco mais de 4% da área total do estado, e a bacia sedimentar costeira Pernambuco/Paraíba, da qual a parte pertencente a Pernambuco representa pouco mais de 1% da área do estado. Há ainda bacias menores no interior pernambucano que juntas totalizam mais 2% da área estadual. Ocorrem ainda aquíferos aluviais nos leitos dos rios (COSTA FILHO & COSTA, 2000).

O agreste pernambucano está quase que inteiramente sobre o embasamento cristalino, assim como a maior parte dessa mesorregião faz parte do semiárido, com exceção das cidades mais próximas à zona da mata de Pernambuco (CPRM, 2005).

3.2 Aluvião

A aluvião é formada por sedimentos, cascalho e areia, principalmente, e finos, formados através da erosão fluvial e transportados pela correnteza do curso d'água. As aluviões são depositadas ao longo de muitos anos no leito e nas margens de um sistema fluvial, e também são denominados depósito aluvial. No semiárido nordestino, tais sedimentos são transportados no pequeno intervalo de tempo em que se concentram as chuvas da região, formando áreas com potencial para mineração. Na região, depósitos aluviais formam importantes reservas de águas subterrâneas para as populações instaladas nas margens dos cursos de água (SÁ & DINIZ, 2012).

A água das chuvas que, além de agente transportador, chega até o leito do rio se infiltram na aluvião, que, durante o período chuvoso é reabastecido e serve de fonte hídrica explorável tanto para as populações rurais instaladas próximo às margens dos rios intermitentes da região, quanto as populações urbanas próximas nos períodos críticos de falta de água. As comunidades ribeirinhas, através do bombeamento ou do transporte manual, fazem uso dessas águas, para agricultura, pecuária e uso doméstico. Já o uso dessas águas para o abastecimento da zona urbana é feito pelo transporte através de caminhões pipa (BRAGA *et al.*, 2014).

3.3 Exploração de água

A escavação de poços para obtenção de água foi utilizada em todas as partes do mundo ao longo da história (MACHADO, 2005). Atualmente, no semiárido nordestino, são empregados vários métodos para a escavação de poços em depósitos aluviais. Os mais utilizados no trecho estudado são os poços apenas escavados e os poços escavados e com parede, este último tipo ainda se subdivide em: com parede de alvenaria de tijolos cerâmicos ou de concreto, com parede de alvenaria de pedra, parede de anéis de concreto (PAIVA *et al.*, 2014).

Dentre todos os tipos citados, o de anéis de concreto mostrou-se o mais seguro e mais eficiente tanto na conservação da qualidade da água quanto na sua própria durabilidade (PAIVA *et al.*, 2015).

Poços escavados são, para as populações instaladas próximo a leitos de rios intermitentes, a solução para o abastecimento de água durante as estiagens (BRAGA *et al.*, 2014). Também conhecidos como cacimbas, no caso dos poços somente escavados, ou cacimbões ou poço amazonas, no caso dos poços com parede.

Geralmente a construção e manutenção são feitas por membros da própria comunidade, na grande maioria das vezes a construção acontece sem estudos prévios. A seleção do local do poço é feita empiricamente, as vezes baseando-se no sucesso ou insucesso de poços escavados anteriormente. Isso acarreta maus resultados como poços em locais onde a aluvião apresenta uma profundidade muito pequena, poços com recarga insuficiente, deterioração das paredes por diversos fatores, contaminação da água ou aterramento do poço pela ausência de tampa para o mesmo, entre outros problemas.

Os diâmetros das cacimbas no trecho estudado geralmente são de grandes dimensões, chegando até a cerca de 20 metros devido ao emprego de escavadeira hidráulica para a sua escavação, já os cacimbões têm diâmetros menores, variando de 1 a 7 metros, de modo que seja possível pelo menos uma pessoa trabalhar dentro do poço. As profundidades também variam muito, em função da profundidade em que se consegue atingir a reserva de água e da profundidade do próprio depósito aluvial (PAIVA *et al.*, 2014).

3.4 Exploração de areia

A areia é considerada um recurso abundante, e por isso as práticas de desenvolver levantamentos de reservas e recursos minerais, para saber a relação entre produção e reservas, prever sua exaustão e indicar a necessidade de novos investimentos em pesquisa, busca de novos recursos, não é usual na exploração da areia (VALVERDE, 2001). Pelo fato de na composição do preço da areia, cerca de dois terços do valor serem atribuído ao transporte, a viabilidade do uso da areia é diretamente proporcional à proximidade entre a reserva de onde é extraída e o local onde será usada. Em lugares onde não há reservas de areia razoavelmente próximas, é usado em seu lugar o pó de pedra, subproduto da britagem de rocha. Na região do polígono das secas a maior parte do subsolo, 70%, é constituída de embasamento cristalino, restando os outros 30% para depósitos sedimentares, tornando mais viável a areia disponível nos leitos dos rios. No Brasil 70% da areia produzida, é extraída dos leitos dos rios, que é proveniente do transporte pelo sistema fluvial, que transportam e depositam naturalmente a areia ao longo do tempo, constituindo nos leitos dos rios, reservas potencialmente mineráveis (CPRM, 2001; QUARESMA, 2009). A grande maioria das empresas que fazem a extração de areia é de pequenas empresas familiares que atuam na clandestinidade, parcial ou total. Os levantamentos mais recentes indicam um total de cerca de 2000 empresas de extração de areia no Brasil (VALVERDE, 2001).

O consumo de agregados, junto ao consumo de cimento, segue o ritmo do desenvolvimento econômico, também é fato que países mais desenvolvidos apresentam maior consumo de agregados per capita, que os países menos desenvolvidos. Países que passaram por fenômenos de crescimento econômico intenso em curto período de tempo registraram também um grande aumento no consumo de agregados, principalmente para construção civil e obras pesadas e no agreste pernambucano não foi diferente, o crescimento econômico recente refletiu no aumento das atividades da construção civil e acarretou um aumento significativo na demanda por areia (KONDOLF, 1997; QUARESMA, 2009).

Historicamente a retirada de areia nos rios intermitentes do semiárido nordestino tem sido aceita, devido a acreditar-se que há uma renovação contínua e também ao fato de que a retirada era feita sem mecanização. Mas com o desenvolvimento econômico em algumas regiões do semiárido e o consequente

aumento da demanda por areia, sua extração passou a ser feita com máquinas como dragas e retroescavadeiras. A retirada de areia sem controle do leito de rios pode trazer muitos problemas como alterações na velocidade de escoamento do rio, prejuízo a estruturas construídas no leito do rio como poços e pontes, destruição do habitat de peixes.

Em casos mais extremos, a falta de sedimentos na desembocadura do rio propicia instabilidade nas margens e a transposição do problema para jusante, uma vez que o rebaixamento no leito causado pela retirada de areia, posteriormente, irá receber os sedimentos carregados pela correnteza, que seriam levados para trechos a posteriores do rio. Além disso, ocorre a exposição da água, que até então estava armazenada na camada de areia, à evaporação, destruindo a estrutura que poderia armazenar água em enchentes futuras.

Em contrapartida a retirada planejada de areia pode ser benéfica, ajudando a restaurar a capacidade de escoamento do rio e pontos onde há acúmulo excessivo ou ainda recuperar a capacidade de armazenamento de reservatórios onde ocorre o depósito de sedimentos (KONDOLF, 1994; BATALLA, 2003; BRAGA *et al.*, 2014).

3.5 Vulnerabilidade à poluição

A vulnerabilidade à poluição diz respeito à facilidade de um determinado aquífero ser contaminado por uma fonte poluidora, podendo ser avaliada apenas considerando as características do aquífero, ou levando em conta também outros fatores externos como: a presença de atividades potencialmente poluidoras próximo ao aquífero; a sua importância tanto no aspecto socioeconômico, quanto no aspecto ecológico, também considerando a viabilidade da sua substituição por fontes alternativas de água. A vulnerabilidade pode ainda ser avaliada de forma geral, para qualquer atividade ou contaminante; específica, avaliando o comportamento de uma única atividade, um poluente ou uma classe de poluentes; absoluta, atribuindo valores que correspondem à vulnerabilidade do aquífero em si; ou relativa, comparando vários casos entre si, mas sem um significado absoluto para nenhum (HIRATA & FERNANDES, 2008).

Existem muitos métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à poluição, DRASTIC, SI, SINTACS, GOD, AVI, por exemplo. Utilizando-se da

combinação de parâmetros referentes à geologia, hidrodinâmica, topografia e pluviometria do local analisado entre outros, para chegar a um índice que caracteriza a vulnerabilidade do aquífero em faixas de valores de muito baixa a muito alta ou de insignificante a extrema, por exemplo (HIRATA e FERNANDES, 2008; SOUZA, 2009).

3.6 Caracterização da aluvião

3.6.1 Ensaio de campo

As características físicas e hídricas do solo são determinantes no comportamento da movimentação da água no mesmo, a condutividade hidráulica representa a facilidade com que um fluido se movimenta em um meio poroso, assim depende das características de ambos. A curva granulométrica do solo pode ser utilizada para a obtenção de importantes parâmetros do solo, a partir dos quais, com o uso de formulas empíricas é possível encontrar o valor da condutividade hidráulica no solo saturado (SIMÕES, 2010).

O conhecimento do valor da condutividade hidráulica, e conseqüentemente do comportamento da água nos aquíferos, é muito importante para o manejo e a conservação das reservas de água subterrânea. Vários métodos podem ser utilizados para a estimativa dos valores de condutividade hidráulica, sejam eles ensaios de campo, ensaios em laboratórios ou fórmulas empíricas. Os testes de campo podem apresentar um custo alto e dificuldades na determinação da geometria do aquífero. Os ensaios em laboratório podem apresentar dificuldades na adequabilidade das amostras e longos períodos para finalizar os ensaios (ODONG, 2008).

A condutividade hidráulica em solos não saturados é muito influenciada pela água retida nos seus vazios, que por sua vez depende da distribuição granulométrica do solo e da sua estrutura. Para a caracterização hidrodinâmica de um solo são determinadas a curva de retenção de água no solo, que indica como se relacionam o potencial matricial e a umidade do solo, e a curva de condutividade hidráulica, que mostra a relação entre a umidade do solo e a condutividade (SOUZA *et al.*, 2008).

Há vários ensaios de campo que podem ser utilizados para obter essas características do solo como, por exemplo, o método de drenagem interna, os métodos de infiltrometria como o ensaio com infiltrômetro a disco e com infiltrômetro simples a anel e ainda testes de bombeamento (CPRM, 1998; MACIEL NETTO *et al.*, 2000; MOREIRA *et al.*, 2002).

No método de drenagem interna são medidos simultaneamente a umidade no solo, utilizando uma sonda de nêutrons, e seu potencial matricial, utilizando um ou mais tensiômetros com um manômetro de mercúrio, em diferentes profundidades de uma parcela do solo isolada do restante do solo ao redor com material impermeável, a parcela do solo analisada deve receber água até que as leituras nos tensiômetros estabilizem. Após a saturação a parte de cima da parcela em questão deve ser isolada para evitar evaporação ou infiltração de qualquer tipo, então devem ser feitas leituras frequentes tanto da sonda de nêutrons quanto dos tensiômetros. A partir dessas leituras é possível estimar a curva de retenção de água do solo, com essa curva obtém se, com algumas equações, a curva de condutividade hidráulica, nesse método sempre devem ser feitos ajustes nos valores de umidade e armazenamento de água (MACIEL NETTO *et al.*, 2000).

Através da infiltrometria é possível estimar a condutividade hidráulica do solo sem causar grandes perturbações à sua estrutura, por meio da infiltração de volumes determinados em área pré-estabelecidas e da medição do tempo necessário para que isso ocorra.

Para o método do infiltrômetro a disco são necessários dois reservatórios, um de alimentação e outro para o controle da pressão, no qual o nível de água é mantido constante durante todo o experimento, e um disco com uma membrana, fixada na base do disco, para contato com o solo, mantendo uma lâmina d'água constante durante o ensaio e medindo o quanto varia o volume de água no reservatório de alimentação. A partir desse método pode ser obtida a sorvidade do solo, que é sua capacidade de absorção somente por capilaridade e adsorção.

Para o infiltrômetro simples a anel, é necessário apenas um cilindro, que deve ser cravado no solo, e um volume conhecido de água, que deve ser vertido no cilindro sucessivamente assim que o volume anterior infiltre completamente no solo, os tempos necessários para cada volume infiltrar no solo são registrados e o

processo continua até que se tornem constantes. Nesse momento representa o início da condição de regime constante, por esse método é possível obter a condutividade hidráulica e a sorvidade do solo. Também pode ser utilizado um reservatório de água associado ao cilindro, no qual devem ser feitas medidas frequentes a cada intervalo de tempo determinado para saber o volume de água infiltrado em relação ao tempo. (THONY *et al.*, 1991; BORGES *et al.*, 1999; MOREIRA *et al.*, 2002; FONSECA, 2012).

Testes de Bombeamento acarretam na restrição de serem realizados em um local onde exista um poço, escavado ou perfurado e necessitam equipamentos como: bomba ou compressor e da escolha ou escavação de um ou mais poços de observação próximos o suficiente, do poço de bombeamento, para que haja durante os testes um rebaixamento mensurável pelos equipamentos utilizados; um recipiente para armazenar a água bombeada e a partir da medição do tempo das variações no nível do recipiente, calcular a vazão de bombeamento, um medidor de nível para acompanhar as mudanças no nível de água no poço de observação e um cronômetro.

Para melhores resultados, alguns aspectos devem ser observados como: aquífero homogêneo, sem camadas impermeáveis nas proximidades; conhecimento prévio da geologia da região e que a captação seja exclusivamente do aquífero estudado. A duração de um teste de bombeamento para caracterização do aquífero pode variar muito, geralmente o teste continua até que o rebaixamento medido seja insignificante ou que o nível da água se estabilize (CPRM, 1998; HIRATA & FERNANDES, 2008).

3.6.2 Granulometria e textura do solo

O ensaio granulométrico é utilizado para a determinação da percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total da amostra. Através dos resultados obtidos é possível a construção da curva granulométrica (UFPI, 2010). A determinação da granulometria pode ser feita por diversos métodos, como peneiramento, e peneiramento combinado com sedimentação, por exemplo (ABNT, 1984). Trabalhos anteriores, feitos na mesma área de estudo do presente trabalho verificaram, através das curvas

granulométricas, que o solo do leito do rio é composto predominantemente por areia. Classificando a camada superficial nas texturas areia franca e franco-arenosa (VASCONCELOS, 2015; SANTOS, 2017; CAETANO, 2018).

3.6.3 Monitoramento da qualidade e quantidade da água

A água encontrada na natureza geralmente não se encontra totalmente pura, apresentando várias outras substâncias dissolvidas ou em suspensão. Essas substâncias podem alterar as características e a qualidade da água (VON SPERLING, 2005).

Os parâmetros servem para quantificar as características da água nos aspectos físicos, químicos e biológicos e funcionam como indicadores da qualidade da água (VON SPERLING, 2005). Segundo o Ministério da Saúde (2017) “Água potável – água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde”.

Alguns parâmetros de qualidade da água e seus respectivos valores de aceitação podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Padrão de potabilidade para alguns parâmetros.

Parâmetro	Valor Máximo
Turbidez	5uT
pH	6,0 – 9,5
Cor Aparente	15 uH

Baseado em (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

Outros parâmetros como alcalinidade, que não consta no padrão de potabilidade, mas valores muito elevados alteram características da água como o sabor; cloreto, máximo de 250 mg/L; nitrogênio, não consta no padrão de potabilidade mas pode levar a eutrofização de ambientes aquáticos; nitrito, máximo de 1 mg/L; nitrato, máximo de 10 mg/L; fósforo, não consta no padrão de potabilidade mas pode levar a eutrofização de ambientes aquáticos; ferro, máximo

de 3 mg/L; e condutividade elétrica, não consta no padrão de potabilidade mas pode indicar a presença de sais dissolvidos (VON SPERLING, 2005; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

A salinidade das águas ocorre devido a presença de sais dissolvidos. É uma das características que melhor indicam a presença de sais é a condutividade elétrica, que é maior quanto maior for a salinidade da água. Costa *et al.* (2006) afirmam que entre os fatores que influenciam a substâncias presentes nas águas são os de natureza geológica, de circulação da água e a exposição da água à evaporação. Almeida & Frischkorn (2015) afirmam que a presença de sais dissolvido nas águas subterrâneas está ligado ao seu contato com rochas cristalinas, que estão presentes na maior parte da região nordeste e que evaporação é um fator de importante contribuição para a salinização das águas acumuladas nas aluviões. Também segundo Santos *et al.* (1984 *apud* RIBEIRO *et al.*, 2005), um dos fatores responsáveis pela salinização das águas é a exposição à evaporação. A diminuição do volume de água armazenado na aluvião, que naturalmente já apresenta sais dissolvidos, acarreta no aumento na concentração desses sais, pois eles não evaporam junto com água. Assim a retirada em excesso de areia do leito do rio prejudica a reserva de água ali presente, tanto em quantidade, pois a lamina d'água exposta à evaporação aumenta, quanto em qualidade devido ao aumento da salinidade.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O município de Santa Cruz do Capibaribe, que se encontra no Polígono das Secas, situa-se na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, apresentando clima Tropical Semiárido e está inserida, em sua totalidade, na bacia hidrográfica do rio Capibaribe e no domínio hidrogeológico fissural, que é composto de rochas cristalinas. Sua população é de cerca de 103 mil habitantes e seu principal reservatório é o açude de Poço Fundo (CPRM, 2005; IBGE, 2017).

O município de Brejo da Madre de Deus, também se encontra no Polígono das Secas, situa-se na mesma unidade geoambiental do município de Santa Cruz do Capibaribe, apresentando as mesmas características de clima e domínio hidrogeológico e também está inserido, em sua totalidade, na bacia hidrográfica do rio Capibaribe (Figura 1) e no domínio hidrogeológico fissural. Sua população é de cerca de 49 mil habitantes e seus principais reservatórios são os açudes de Machados e Oitís (CPRM, 2005; IBGE, 2017).

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: o autor

A área de estudo encontra-se no trecho do rio Capibaribe entre as coordenadas 7° 56' 49,46706" S, 36° 16' 36,35876" W e 7° 57' 27,18480" S, 36° 18' 32,30788" W, no limite entre os municípios de Santa Cruz do Capibaribe e Brejo da Madre de Deus.

Nos momentos mais críticos da seca que a região enfrentou, a água dos depósitos aluvionares também foram usados para abastecer a zona urbana da cidade. Em alguns pontos do trecho houve retirada de areia significativa, chegando até a expor o embasamento rochoso sobre o qual a aluvião se encontra (BRAGA *et al.*, 2014).

Após vários anos de estiagem, entre os meses de março e abril de 2018, ocorreram chuvas intensas na região, chegando a apresentar uma precipitação acumulada de aproximadamente de 200 milímetros em alguns dias. Como consequência houve escoamento superficial em vários afluentes do rio que desaguam no trecho estudado, resultando em escoamento também no próprio Capibaribe e o reabastecimento do aquífero contido na aluvião.

4.2 Qualidade e quantidade da água da aluvião

Foi realizado um monitoramento da qualidade da água na aluvião, através de coletas em três poços amazonas distribuídos ao longo da área de estudo, o primeiro das três seções está localizado nas coordenadas 7° 57' 56,0" S, 36° 19' 55,5" W; o segundo nas coordenadas 7° 57' 26,5" S, 36° 18' 30,8" W e o terceiro nas coordenadas 7° 56' 43,4" S, 36° 17' 48,6" W, representando a variabilidade espacial ao longo do rio. Haverá campanhas para uma variabilidade temporal dos parâmetros medidos.

O monitoramento consiste em campanhas de aferições dos parâmetros de qualidade da água nos poços com o uso de uma sonda multiparamétrica cedida pelo LAMTESA (Figura 2) – Laboratório de Tecnologias do Semiárido – UFPE, que mede os parâmetros Oxigênio Dissolvido, Condutividade Elétrica, Ph e Temperatura, e um turbidímetro (Figura 3) que foi utilizado no LEA – Laboratório de Engenharia Ambiental. A princípio foram realizadas 4 campanhas quinzenais com a primeira no mês de outubro de 2017. De acordo com as variações detectadas nos parâmetros o intervalo entre campanhas foi ajustado, para medições mensais. Principalmente,

devido ao fato da seca continua em que os parâmetros de qualidade devem estar numa baixa variabilidade.

Figura 2 - Sonda multiparamétrica de qualidade da água.



Fonte: o autor.

Figura 3 - Turbidímetro.



Fonte: o autor.

Nas campanhas, também ocorreram medições do nível da água nos poços, para determinar a relação entre sua variação e a variação nos parâmetros de qualidade da água. Estas medições foram realizadas manualmente com medidor de nível. As cotas topográficas do nível da boca dos poços já foram obtidas em campanha com gps geodésico, resultado do projeto Águas de Areias.

Posteriormente ao monitoramento, foi realizada a análise da relação entre as variações no nível da água e nos valores dos parâmetros de qualidade para verificar a possibilidade e a intensidade da influência entre eles.

4.3 Infiltrometria em leito com água

Os testes de infiltração foram realizados no leito com água, devido às chuvas do início do presente ano terem causado escoamento superficial que deixou água acumulada em vários pontos do leito. O método escolhido, baseado no trabalho realizado no rio Beberibe e descrito em Veras (2011) e Albuquerque (2015), utiliza-se um cilindro feito em material transparente que é fixado ao leito do rio e a ele é ligado um recipiente que fornecerá água, que no caso é uma bolsa hospitalar, no qual são medidos o volume inicial de água e os volumes parciais em intervalos de tempo definidos. A taxa de infiltração é calculada com a Equação 1:

$$I_t = \frac{V}{t \cdot A} \quad (1)$$

Onde:

I_t = taxa de infiltração (mm/s);

V = volume infiltrado (mm³);

t = tempo (s); e

A = área do cilindro (mm²)

O infiltrômetro utilizado (Figuras 4 e 5) tem 19 centímetros de diâmetro interno, resultando em uma área de infiltração de 283,53 cm². O cilindro deve ser fixado no leito de modo que a extremidade inferior, que é aberta, atinja cerca de quatro centímetros de profundidade no solo. A cada ensaio deve ser conferido o encaixe da mangueira, que liga o reservatório de água ao infiltrômetro, e deste no solo. Para

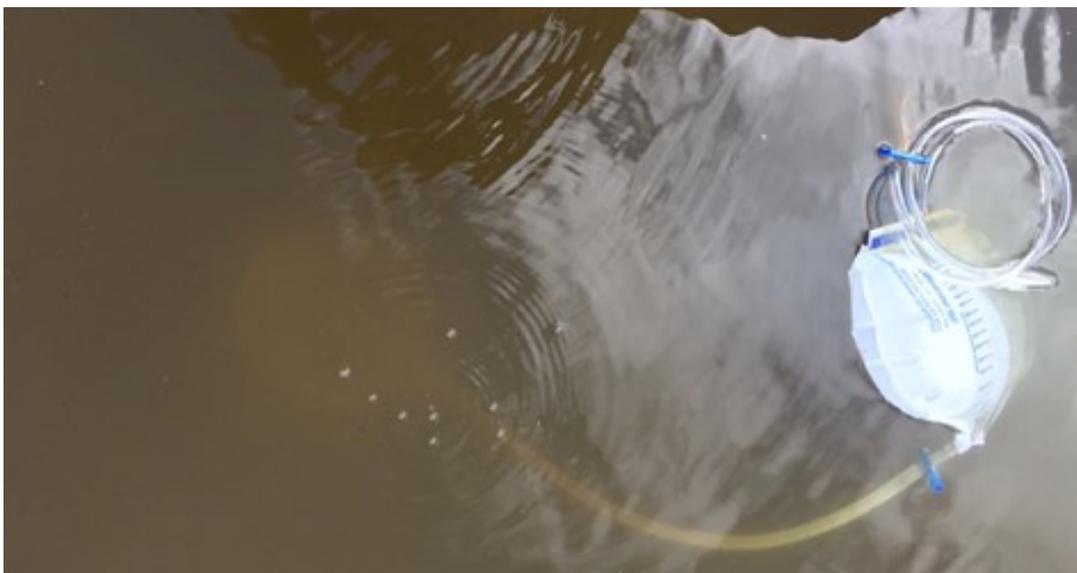
uma melhor vedação e fixação no solo o infiltrômetro possui uma aba de emborrachado na parte inferior, que impede que a água da superfície invada seu interior

Figura 4 - Infiltrômetro sendo utilizado em campo.



Fonte: o autor.

Figura 5 - Infiltrômetro já cravado no leito do rio.



Fonte: o autor.

A partir dos resultados obtidos foi possível avaliar a variação espacial do comportamento do saturado frente à infiltração, comparando os dados dos três pontos onde foi feito o ensaio. Além de, com a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com resultados de ensaios feitos anteriormente nos mesmos locais, avaliar o efeito do escoamento superficial nas características do solo.

4.4 Gradiente hidráulico

Para a medição do gradiente hidráulico foi utilizado um piezômetro diferencial (Figura 6), desenvolvido na UFPE baseado em Chen *et al.* (2003). O piezômetro diferencial consiste em um tubo metálico com uma ponteira, que contém orifícios com material filtrante para permitir a entrada de água sem que entrem sedimentos. No interior do tubo há uma mangueira transparente que liga a ponteira ao topo do tubo e através dela é possível medir o nível de água.

Figura 6 - Piezômetro utilizado.



Fonte: o autor.

A parte inferior do piezômetro deve ser cravada no solo de modo que a ponteira do tubo fique totalmente enterrada no leito e que a extremidade superior permaneça acima do nível da água na superfície, a parte cravada no solo permite que a água do aquífero subterrâneo entre no tubo e fique submetida apenas à

pressão atmosférica (Figura 7). São medidas então lâmina d'água na superfície e o nível de água dentro do piezômetro a partir da extremidade inferior do tubo liso. Nesse sistema a profundidade da água superficial equivale à carga hidráulica no leito do rio, h_{sup} , o nível de água medido dentro equivale à carga hidráulica no aquífero subterrâneo, h_{sub} , e o comprimento total da parte enterrada do piezômetro é representado por L_v (Figura 8). O gradiente hidráulico i é calculado pela Equação 2:

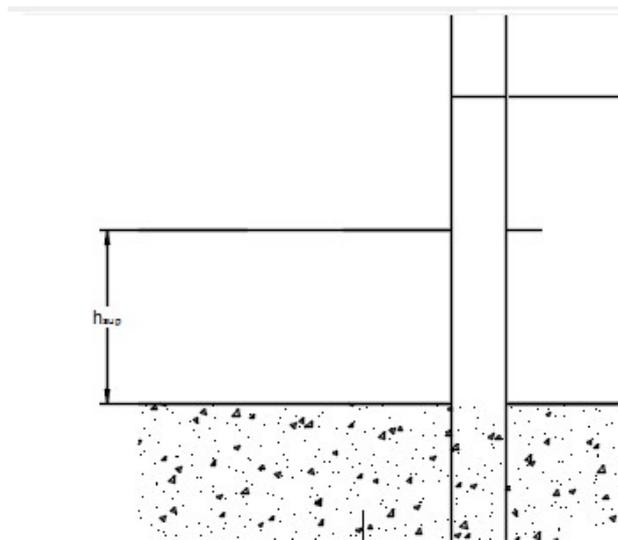
$$i = \frac{h_{sub} - h_{sup}}{L_v} \quad (2)$$

Figura 7 - Piezômetro sendo utilizado em campo.



Fonte: o autor.

Figura 8 - Esquema do piezômetro diferencial.



Fonte: o autor.

Em caso de o valor de i ser positivo, a carga hidráulica do aquífero subterrâneo é maior que a do fundo do rio, indicando que o aquífero subterrâneo está alimentando o rio nesse ponto. Caso i tenha valor negativo, indica que o rio alimenta o aquífero subterrâneo (CHEN *et al.*, 2003; ALBUQUERQUE, 2015).

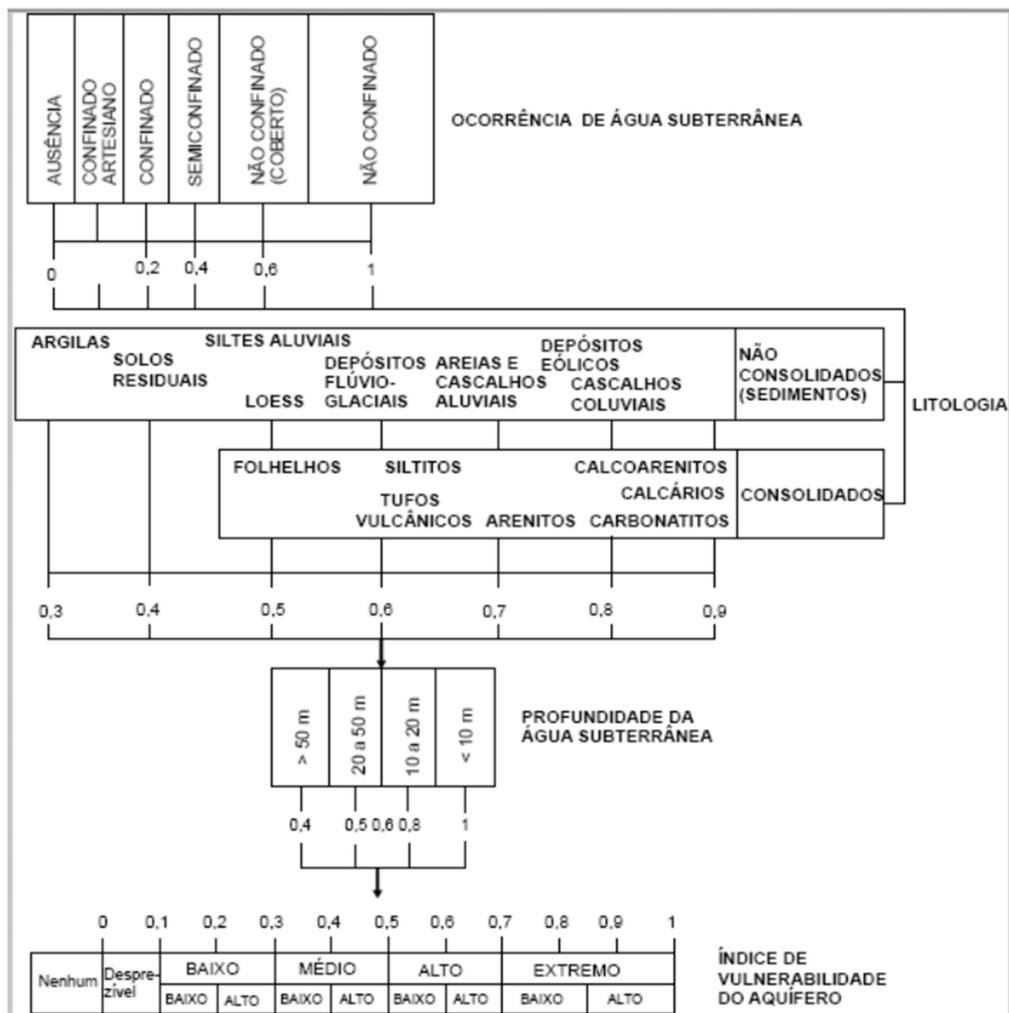
Foram realizados testes com o piezômetro diferencial nas três seções próximas aos poços monitorados, nos três casos os testes foram feitos na margem por dificuldades de acesso ao meio do leito. Para obter o nível de água no interior do piezômetro foi utilizado um medidor de nível, medindo a distância entre o topo do piezômetro e a superfície da água no interior deste, em seguida subtraindo o valor encontrado da altura total do piezômetro que é de um metro.

4.5 Métodos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à poluição

Dois métodos foram utilizados para mensurar a vulnerabilidade do aquífero aluvial; devido à disponibilidade de informações necessárias foram escolhidos os métodos GOD e AVI.

O método GOD usa três parâmetros, o primeiro referente a forma em que a água está contida no aquífero, o segundo referente à origem litológica e ao grau de consolidação do aquífero e o terceiro referente à profundidade até o extremo superior da zona saturada. A cada um é atribuído um valor de acordo com a Figura 9, o produto dos 3 valores classifica a vulnerabilidade de acordo com a Tabela 2.

Figura 9 - Diagrama do método GOD.



Fonte: o autor (adaptado de Bovolato, 2009).

Tabela 2 - Classes de vulnerabilidade do método GOD.

Intervalo	Classe
0,0 – 0,1	Insignificante
0,1 – 0,3	Baixo
0,3 – 0,5	Médio
0,5 – 0,7	Alto
0,7 – 1,0	Extremo

Fonte: Lobo Ferreira e Oliveira (2003)

O método AVI utiliza dois parâmetros, a espessura e a condutividade hidráulica das camadas não saturadas superiores ao aquífero. O somatório das razões dos dois parâmetros para cada camada resulta no índice C, de acordo com a Equação 3 (LOBO FERREIRA & OLIVEIRA, 2003):

$$C = \sum d_i/K_i \quad (3)$$

Onde:

d_i é a espessura de cada camada;

K_i é a condutividade de cada camada;

A vulnerabilidade do aquífero é classificada pelo índice C obtido, de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 - Classes de vulnerabilidade do método AVI.

Intervalo	Vulnerabilidade
0 – 10	Extremamente Alta
10 – 100	Alta
100 – 1000	Moderada
1000 – 10000	Baixa
> 10000	Extremamente Baixa

Fonte: Lobo Ferreira & Oliveira (2003).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Gradiente hidráulico

Na Tabela 4 são apresentados os resultados correspondentes a aplicação do piezômetro diferencial, bem como os valores calculados para os gradientes hidráulicos.

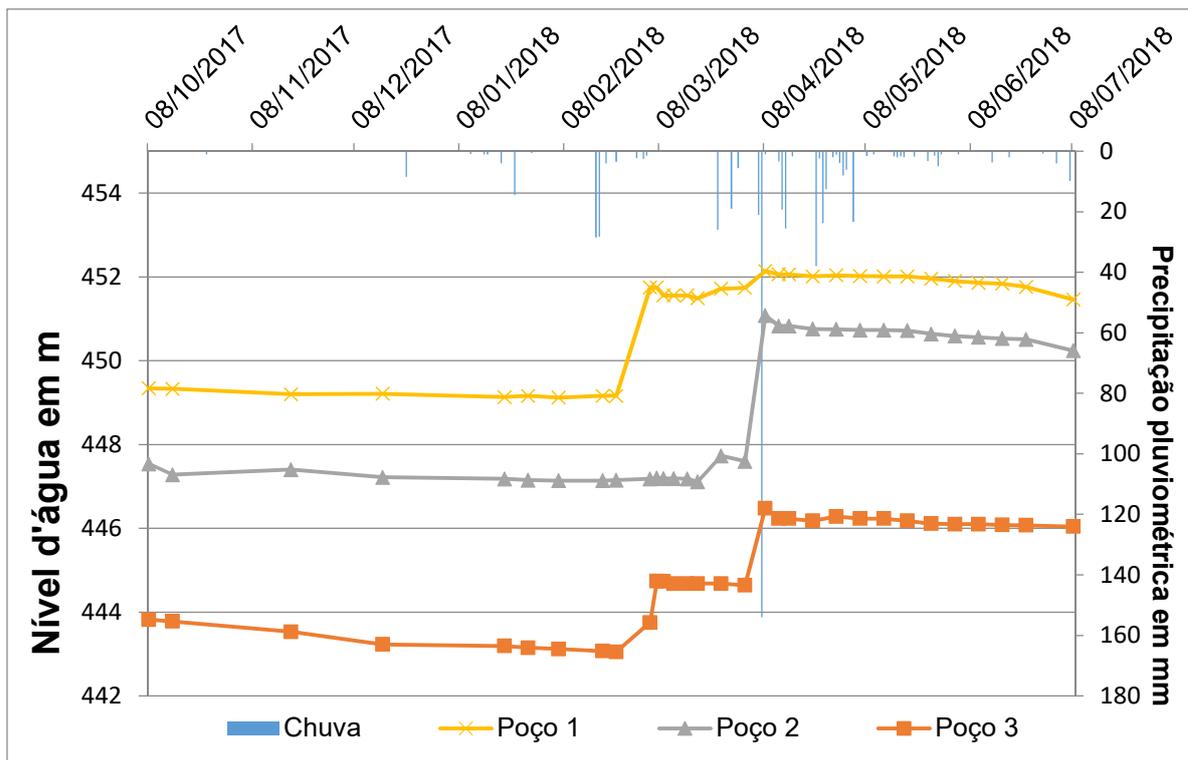
A partir dos testes executados em pontos próximos aos poços monitorados chegou-se aos valores da tabela abaixo, observou-se que para o Poço 1, o gradiente foi de 1,07 m/m, para o Poço 2, foi de 1,04 m/m e para o Poço 3 o gradiente hidráulico foi unitário. Observa-se que em todos os pontos testados, que as medições indicam uma carga hidráulica maior da água contida na aluvião em relação à água superficial, caracterizando um fluxo ascendente entre essas duas camadas, permitindo afirmar que o aquífero subterrâneo alimenta o rio, com um leve aumento no gradiente hidráulico à medida que se vai para jusante.

Tabela 4 - Dados dos testes com piezômetro diferencial e valores calculados para os gradientes hidráulicos.

	H sup(m)	H sub (m)	Lv (m)	i
Poço 1	0,40	0,69	0,27	1,07
Poço 2	0,20	0,48	0,27	1,04
Poço 3	0,45	0,72	0,27	1,00

5.2 Monitoramento do nível

Na Figura 10 são apresentadas as variações dos níveis de água dos poços monitorados.

Figura 10 - Variação dos níveis de água dos poços monitorados.

Como pode ser observado em todos os pontos monitorados os níveis de água subiram entre os meses de março e abril de 2018, período no qual voltou a chover significativamente na região. Observa-se ainda que de junho a julho de 2018 queda nos níveis de água é mais intensa no Poço 3 que está mais a montante e se tem essa intensidade diminuída a medida que se observa os poços mais a jusante, chegando no Poço 1 com nível de água quase atingindo a estabilidade. Esses resultados se correlacionam com os obtidos para o gradiente hidráulico vertical, medido no dia 5 de julho de 2018 em pontos próximos a cada poço. Vale ressaltar que no caso do Poço 3 desde o início de julho vem sendo realizado o bombeamento a partir do poço para irrigação de plantios.

5.3 Monitoramento de parâmetros qualitativos da água da aluvião

Em três poços foram monitorados o nível e parâmetros da água entre os meses de agosto de 2017 e junho de 2018, exceto o parâmetro turbidez que começou a ser medido em abril de 2018. Nas Figuras 10, 11 e 12 podem ser vistos os comportamentos de cada parâmetro ao longo do período de monitoramento.

Figura 11 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no Poço 1.

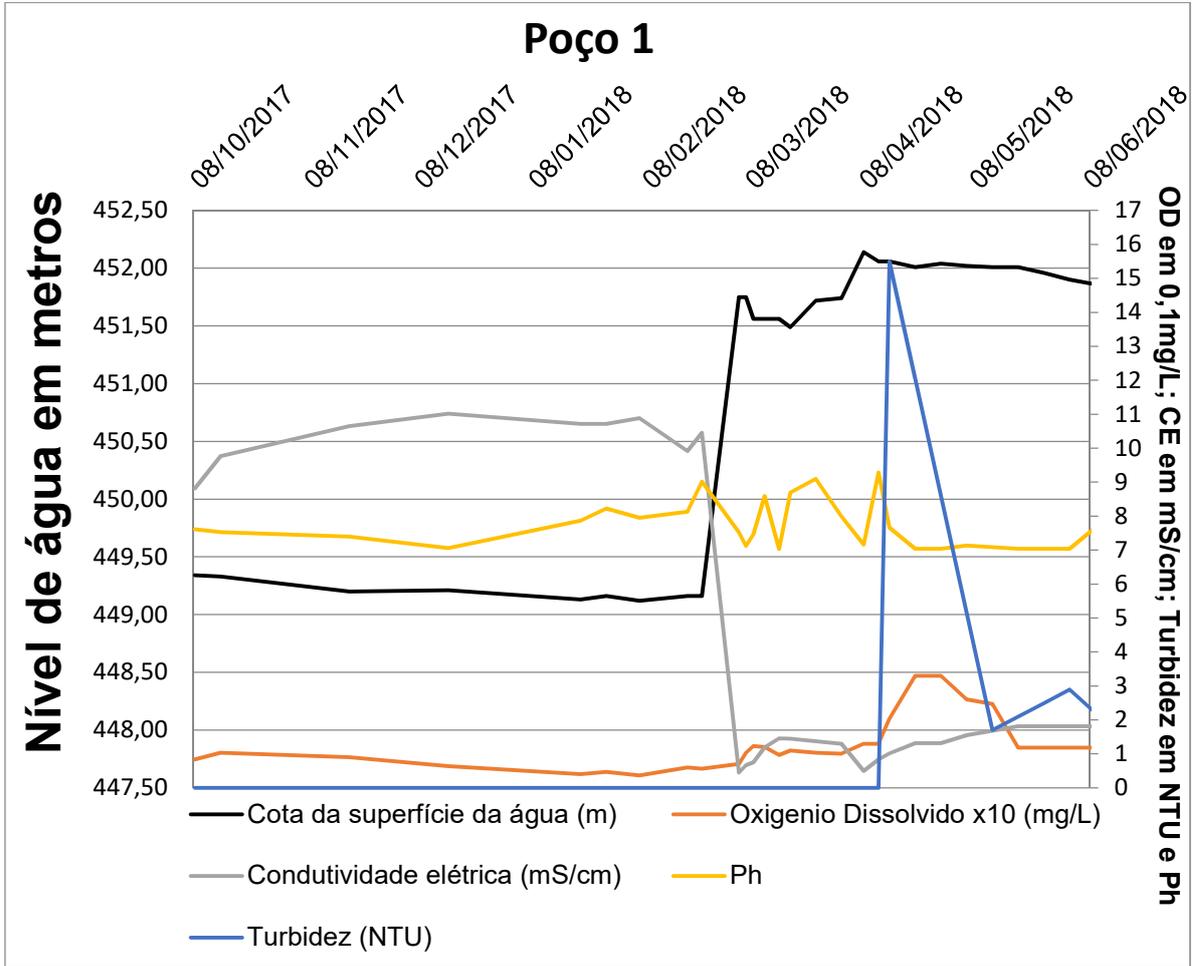


Figura 12 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no Poço 2.

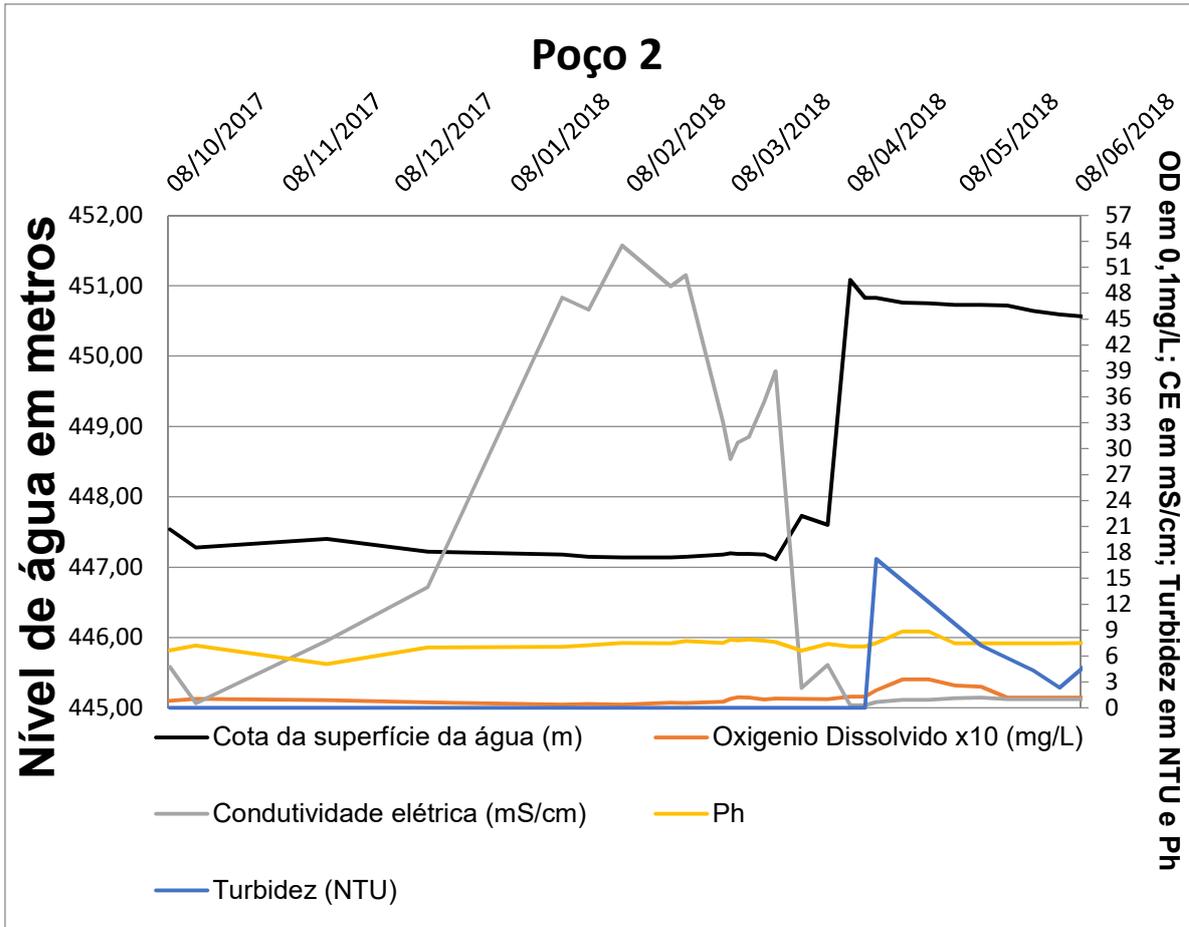
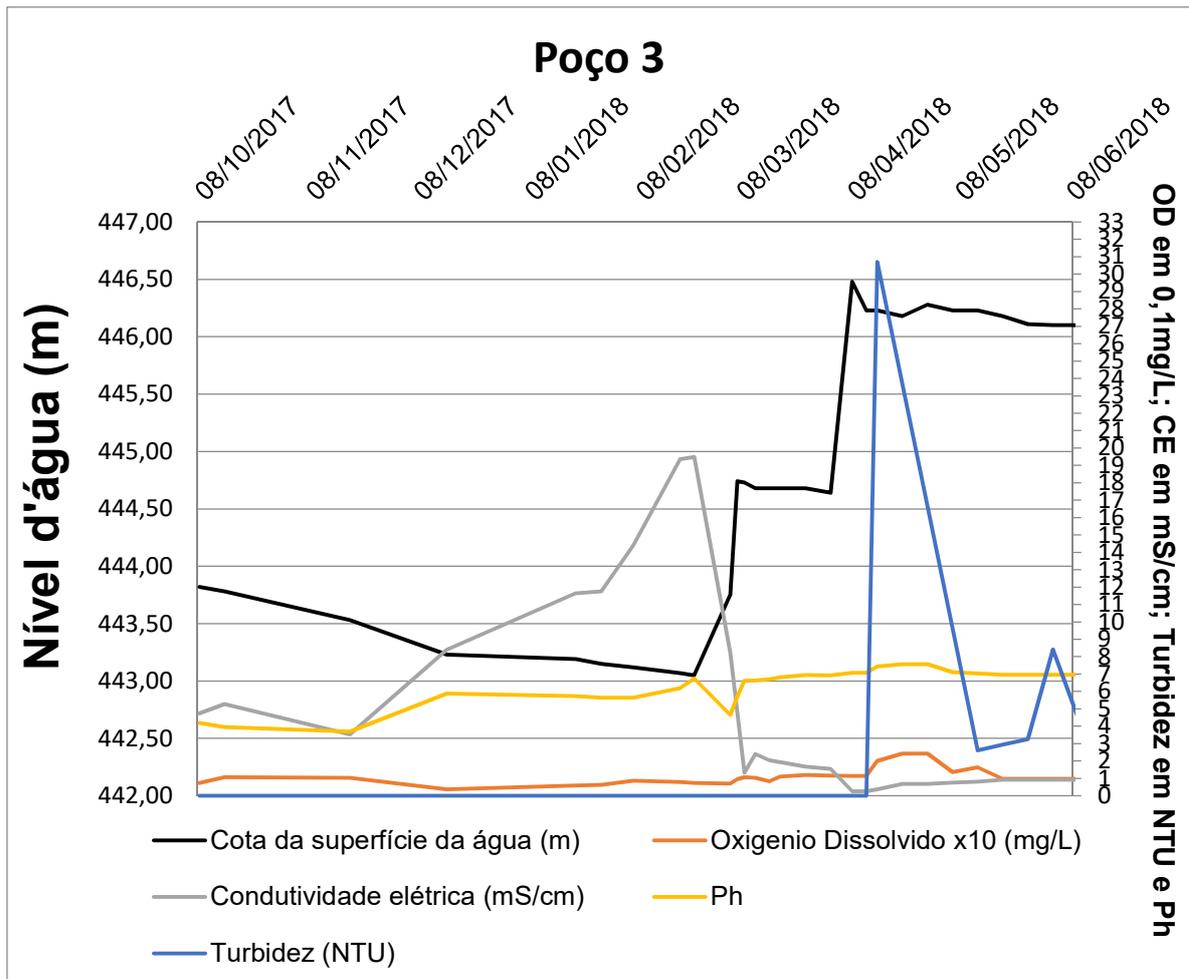


Figura 13 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no Poço 3.



Pode ser observado nos gráficos que com o aumento do volume de água na aluvião, causado por um período de alguns dias com chuvas intensas na região entre os meses de março e abril, houve uma diminuição significativa, principalmente no Poço 2, no parâmetro condutividade elétrica, que é diretamente proporcional à salinidade.

Para o parâmetro oxigênio dissolvido houve um pequeno aumento, simultâneo ao aumento nos níveis de água, principalmente no Poço 3. Pouco tempo depois, observou-se que esses parâmetros retornaram a valores próximos aos observados antes da recarga da aluvião. O Ph no Poço 1 passou de ácido a aproximadamente neutro e nos outros poços continuou próximo à neutralidade, apesar de várias oscilações, no geral esse parâmetro se apresentou dentro dos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde (2017). Já a turbidez apresentou valores altos logo após a cheia causada pelas chuvas, diminuindo com o passar de algumas semanas, vale observar que devido ao escoamento superficial os 3 poços monitorados foram

encobertos pela água do rio fazendo com que a água, mais turva devido a correnteza, entrasse pelas bocas dos poços e não pelo fundo depois de atravessar toda a camada de sedimentos como normalmente ocorre. Passado o efeito da submersão dos poços, a turbidez atingiu valores dentro dos limites de potabilidade no final do período de monitoramento.

Em trabalho anterior, conduzido na mesma área de pesquisa do presente trabalho, Gusmão (2016) analisou amostras de água de vários cacimbões da região. Foram ao todo seis campanhas de análise entre os anos 2013 e 2015, esse período permitiu que fossem realizadas medições dos parâmetros, tanto em épocas de estiagem severa, quanto após chuvas. Foi verificado que houve uma redução na condutividade hidráulica após eventos chuvosos, devido ao aumento na quantidade de água na aluvião, assim como no presente trabalho. Em relação à turbidez também houve uma variação considerável nas medições, mesmo em cacimbões com tampa. Na pesquisa supracitada foram observados valores mais altos para o oxigênio dissolvido, da ordem de 10 vezes superiores aos medidos no presente trabalho, levando isso em consideração é interessante repetir, posteriormente, a análise desse parâmetro, para verificar possíveis alterações futuras e para buscar as causas dessas variações.

Para fins de análises estatísticas foram avaliados os valores de lâmina d'água dos poços no lugar dos níveis de água, devido a esses últimos terem valores muito distantes em relação aos demais parâmetros, a fim de facilitar os ajustes entre os dados. O valor da lâmina d'água foi calculado subtraindo a cota do fundo do poço da cota do nível d'água em cada data em que o nível foi medido.

Os parâmetros estatísticos correspondentes às variações das lâminas d'água e dos parâmetros de qualidade são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos dos resultados do monitoramento da qualidade da água.

Parâmetro		Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	Coef. Variação
Lâmina d'água (m)	Poço 1	2,09	3,75	0,32	1,27	0,61
	Poço 2	1,61	4,05	0,08	1,74	1,08
	Poço 3	2,16	3,30	0,28	1,27	0,59
Ph	Poço 1	6,26	7,56	3,69	1,12	0,18
	Poço 2	7,42	8,84	5,08	0,71	0,10
	Poço 3	7,75	9,29	7,03	0,71	0,09
Temperatura (°C)	Poço 1	28,32	30,10	24,50	1,44	0,05
	Poço 2	28,30	30,20	24,70	1,64	0,06
	Poço 3	28,33	30,90	25,00	1,68	0,06
OD (mg/L)	Poço 1	0,11	0,24	0,04	0,05	0,46
	Poço 2	0,13	0,33	0,04	0,08	0,66
	Poço 3	0,15	0,25	0,07	0,05	0,31
Condut. Elétrica (mS/cm)	Poço 1	5,09	19,48	0,25	5,90	1,16
	Poço 2	19,40	53,50	0,32	20,06	1,03
	Poço 3	4,46	11,02	0,45	4,52	1,01
Turbidez (NTU)	Poço 1	3,66	30,70	2,61	11,02	3,01
	Poço 2	2,80	17,24	2,33	5,68	2,02
	Poço 3	1,88	15,50	1,70	5,48	2,91

Observando o coeficiente de variação, pode ser notado que os parâmetros que possuem os coeficientes mais próximos aos de lâmina d'água é a condutividade elétrica, enquanto o parâmetro turbidez apresenta valores muito mais altos e o Ph apresenta valores muito baixos para o coeficiente de variação.

5.4 Infiltrometria em solo saturado

Os resultados dos ensaios de infiltração no em solo saturado constam na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de infiltrometria em solo saturado.

	Gramas infiltrados	mm ³ infiltrados	mm infiltrados	mm/s
Poço 1	862	858983	30,30	0,01683
Poço 2	1160	1155940	40,77	0,02265
Poço 3	530	528145	18,63	0,01035

Os ensaios indicam que, mesmo onde a infiltração aconteceu de forma mais lenta, em um minuto, em uma área de um metro quadrado, o solo estudado infiltra 1000, 1300 e 600 litros, respectivamente para as seções dos poços 1, 2 e 3. Esses

resultados indicam que mesmo um escoamento superficial com um período curto de duração pode recarregar rapidamente o aquífero subterrâneo.

5.5 Avaliação da vulnerabilidade à poluição

Para a aplicação do método GOD, o aquífero foi enquadrado em: não confinado (Coberto): índice 0,6; formado por areias aluviais: índice 0,7; e com menos de 10 metros de profundidade: índice 1; de acordo com as características observadas em campo. Aplicando os valores correspondentes temos o resultado de 0,42, o que enquadra a vulnerabilidade do aquífero aluvial estudado entre as classes 'Alto' e 'Extremo'.

Quanto ao método AVI, se fazem necessários os parâmetros condutividade hidráulica e profundidade da zona não saturada. Caetano (2018) obteve como média para a condutividade hidráulica 0,11 mm/s; a profundidade foi adotada de acordo com a escavação dos poços até encontrar a camada rochosa abaixo do leito, para os poços monitorados é cerca de 3,5 metros. Entretanto, como o limite entre aquífero e zona não saturada é variável, de acordo com o nível da água, foi considerado, para o uso no método AVI, a zona não saturada com 3 metros de profundidade. Utilizando a equação 3, foi obtido o índice $C = 27,3$, que enquadra a vulnerabilidade do aquífero estudado como 'Alta'.

Os dois resultados indicam um grande risco de poluição da água, no caso de o leito do rio ser atingido por poluentes em meio líquido como, por exemplo, esgoto doméstico.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A partir do monitoramento dos níveis e dos parâmetros de qualidade de água, verificou-se que uma variação no nível de água tem influência, direta ou inversamente dependendo do parâmetro, nos parâmetros de qualidade da água dos poços, com exceção da turbidez que, caso o poço tenha uma altura adequada de modo a não ficar submerso na época de cheia do rio, não sofre influencia das variações de nível de água. O Ph e a turbidez, esta somente no final do monitoramento, apresentaram valores dentro dos limites de potabilidade.

A partir dos dados levantados e da aplicação de procedimentos estatísticos pode ser observado que o coeficiente de variação dos níveis de água no, período do monitoramento, próximo aos coeficientes de variação dos Parâmetros de qualidade, com exceção do Ph que tem valores para esse coeficiente muito abaixo do observado para os níveis de água e da turbidez onde os valores são consideravelmente superiores, tal proximidade indica uma forte influência da quantidade de água armazenada sobre a qualidade desta.

Observou-se ainda que para a situação, nível de água, condições climáticas, textura do solo, em que os ensaios com o piezômetro diferencial foram realizados o gradiente hidráulico é positivo na direção aquífero-leito do rio em todos os pontos testados e os valores do gradiente hidráulico se mostraram bastante próximo ao longo do trecho do rio.

Verificou-se, a partir dos ensaios de infiltração em solo saturado, a grande capacidade de infiltração no leito do rio que, tanto possibilita que o aquífero seja rapidamente recarregado mesmo por escoamentos superficiais de pequena duração, quanto deixa as águas subterrâneas mais suscetíveis à poluição, como os resultados da avaliação de vulnerabilidade à poluição também indicaram.

6.2 Recomendações

É importante continuar o monitoramento tanto dos níveis quanto dos parâmetros de qualidade da água e também aumentar o tempo total de monitoramento, para assim obter uma maior quantidade de dados e melhorar a análise da influencia das variações no nível nesses parâmetros. Também é

recomendado o monitoramento de outros parâmetros para uma caracterização mais detalhada da qualidade da água.

É recomendado aumentar o número de poços de monitoramento e também o número de seções com os ensaios de infiltração e com o piezômetro diferencial para caracterizar melhor as propriedades do leito desse trecho do rio.

É recomendado repetir os testes com o piezômetro diferencial com frequência para verificar o comportamento do gradiente hidráulico através do tempo, assim como em situações diferentes da atual, quanto ao nível de água e ao clima em geral.

É interessante que a vulnerabilidade à poluição seja avaliada com outros métodos e que seja feito um mapa de vulnerabilidade englobando a calha do rio e regiões próximas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ALBUQUERQUE, T. B. V. de. Caracterização Física E Biológica Da Zona Hiporreica Na Interação Rio-Aquífero No Rio Beberibe - Pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco, Doutorado em Engenharia Civil - Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Tese de Doutorado. Recife-PE, 2015.
- ALMEIDA, J.R.F.de; FRISCHKORN, H. Salinization mechanisms of a small alluvial aquifer in the semiarid region of northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. . v.19, p.643-649.
- BATALLA R.J. Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain. **Rev. Cuaternario y Geomorfología**, 2003. 17:79-91
- BOVOLATO, L.E. **Estudo de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas utilizando a metodologia “GOD” para a área urbana de Araguaína/TO.**2005.
- BRAGA, R.A.P.; PAIVA, A.L.R.de; ARAÚJO FILHO, P.F.; CABRAL, J.S.P.; SILVA, A.V.da; GUSMÃO, P.T.; CAVALCANTI, E.; FARIAS, C.R.; COSTA, W.D.A. sustentabilidade do uso da água subterrânea frente à exploração de areias em leito de rios do semiárido brasileiro. In: **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 15pp. Belo Horizonte, MG. 2014.
- BRASIL, **Portaria Ministério da Saúde nº 5**, 2017.
- BORGES, E.; ANTONINO, A.C.D.; DALL’OLIO, A.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C.J.G. Determinação das propriedades hidráulicas de solos não saturados utilizando-se permeâmetros a disco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.11, p.2083-2090, 1999.
- CAETANO, T O. **Disponibilidade hídrica das aluviões e as características de uso e demanda de água em comunidades rurais do semiárido pernambucano.** . Universidade Federal de Pernambuco, Mestrado em Engenharia Civil - Área de Tecnologia Ambiental. Dissertação de Mestrado. Recife-PE, 2018.

CHEN, X.; SONG, J.; & CHENG, C.; WANG, D.; LACKEY, S.O. A new method for mapping variability in vertical seepage flux in streambeds. **J Hydrol**, 2003. 17: 519 - 525.

CIRILO, J.A.; ABREU, G.H.F.G.; COSTA, M.R.; GOLDENBERG, D.; COSTA, W.D. Soluções para o Suprimento de Água de Comunidades Rurais Difusas no Semi-Árido Brasileiro: Avaliação de Barragens Subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. 2013. v.18, n.1.

COSTA FILHO, W.D.; COSTA, W.D. Caracterização hidrogeológica do Estado de Pernambuco. In: **Anais do Joint World Congress on Groundwater**, Fortaleza. 2000.

COSTA, A.M.B.; MELO, J.G.; SILVA, F.M. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, São Paulo, 2006. v.20, p.67-82.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. – **Programa de ações emergenciais de combate aos efeitos das secas – Execução de testes de bombeamento em poços tubulares – Manual prático de orientação**. Elaboração: Feitosa, F.C.; Costa Filho, W. D. Agosto de 1998.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. – **Programa de água subterrânea para a região Nordeste**. 2001.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil (2004). **Estudo hidrogeológicos de bacias sedimentares da região semi-árida do nordeste brasileiro** - Proposta. Elaboração: Feitosa, F.C.; Vidal, C. Outubro de 2004. xpp.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. – **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Estado de Pernambuco. Relatório dos municípios de Santa Cruz do Capibaribe, Brejo da Madre de Deus, Jataúba, Feira Nova, Tupanatinga, Bom Conselho e São Bento do Una**. 2005.

FONSECA, A.C.G. da. **Comparação de três métodos de determinação dos parâmetros da infiltração transiente (Ks e S) a partir do infiltrômetro a anel simples**. Recife, 2012.

FOSTER, S.S.D.A; HIRATA, R.C.A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas; uma proposta de avaliação regional.** São Paulo: ABAS, 1988.

GOMES, D.F.; FRISCHKORN, H. Aspectos da hidrodinâmica do aquífero aluvial do rio Jaguaribe, em Limoeiro do Norte – Ceará. **Revista Águas Subterrâneas**, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, São Paulo, 2009.

GUSMÃO, P. T.R. de. **Qualidade das águas captadas nas areias de aluvião.** In: BRAGA, R.A.P. Águas de areias. 1. ed. Clã, Recife, 2016, p. 89-105.

HIRATA, R. FERNANDES, J.A. **Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos.** In: FEITOSA, Fernando. C (org). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro:CPRM:LABHID, 2008. 812p

IBGE. **IBGE – Cidades – Pernambuco – Santa Cruz do Capibaribe e Brejo da Madre de Deus.** 2017. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=26&search=pernambuco>>. Acesso em 01 set. 2017.

KONDOLF G.M. Geomorphic and environmental effects of in-stream gravel mining. **Landscape and Urban Planning**, 1994. 28:225-243

KONDOLF G.M. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. **Environmental Management.** 1997. 21:533-551.

LOBO FERREIRA. J. P.; OLIVEIRA. M. M. **Análise de sensibilidade da aplicação de métodos indexados de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas.** Jornadas Luso-Espanholas sobre Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica. Faro 2003.

MACHADO, J.L.F. Água Subterrânea: Uma Visão Histórica. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa, PB. 2005.

MACIEL NETTO, A.; ANTONINO, A.C.D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C.J.G.; DALL'OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um podzólico amarelo da zona da mata norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2000. v.35, n.6, p.1221-1228.

MOREIRA, L.F.F.; BALTASAR FILHO, T.; ARAÚJO, V.M. ; GOMES, D.M.. Uso de infiltrômetro na determinação das propriedades hidrológicas do solo. In: **Anais do XII Congresso de Iniciação Científica da UFRN.** Natal, RN. 2002. v. 1. p. 45-52.

ODONG, J. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. **The Journal of American Science**, 4(1), Lansing, Michigan, 2008.

PAIVA, A.L.R.de; CABRAL, J.S.P.; SILVA, A.V.da; CAETANO, T.O.; SILVA, D.J.; BRAGA, R.A.P. Evolução tecnológica de poços escavados em leito seco de rio no semiárido. In: **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 8p. Brasília, DF. 2015.

PEDROSA, A. S.; RASIA, P. G.; LIRA, W. S.; MALAGODI, E. Avaliação da gestão integrada e participativa no programa de formação e mobilização social para a convivência com o semi-árido: Um milhão de cisternas de placas. In: **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**. Suplemento. São Luís, MA. Setembro, 2010.

PINHEIRO, E. A. R.; LIER, Q. J. van.; BEZERRA, A. H. F. **Hydrology of a Water-Limited Forest under Climate Change Scenarios: The Case of the Caatinga Biome, Brazil**. Forests. Basileia, Suíça; 2017. v. 8, 3ª ed.; p. 62.

QUARESMA, L. F. **Projeto de assistência técnica ao setor de energia – Perfil de areia para construção civil**. Ministério de Minas e Energia – Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. 2009.

RIBEIRO, G.M.; MAIA, C.E; MEDEIROS, J.F.de. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. 2005. v.9, p.15-22.

SÁ, J. U.; DINIZ, J. A. O. Aproveitamento das aluviões do semiárido do Nordeste. In: **Anais do XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Suplemento. Bonito, MS. Outubro de 2012.

SABIÁ, R. J. **Estudo do padrão de emissão de poluentes para o enquadramento de rios intermitentes: estudo de caso do Rio Salgado**, Ce. 2008. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

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

Engenharia Civil - Área de Tecnologia Ambiental. Dissertação de Mestrado. Recife-PE, 2017.

SIMÕES, M. **Estimativa da condutividade hidráulica pela curva de distribuição granulométrica do aquífero plio-quadernário da bacia do baixo Tejo, em Belverde**. Universidade de Nova Lisboa, Centro de investigação em ciências e engenharia geológica. Caparica, Portugal. 2010.

SILVA, P. C. G. da; MOURA, M. S. B. de; KIILL, L. H. P.; BRITO, L. T. de L.; PEREIRA, L. A.; SA, I. B.; CORREIA, R. C.; TEIXEIRA, A. H. de C.; CUNHA, T. J. F.; GUIMARÃES FILHO, C. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: **SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. da (Orgs). Semiárido Brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 17-48.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; MACIEL NETTO, A. Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. Mar./Apr. 2008. v.12 n.2.

SOUZA, N. A. de. **Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas – um estudo do aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG**. Universidade Federal de Uberlândia, Mestrado em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Uberlândia-MG, 2009.

THONY, J.L.; VACHAUD, G.; CLOTHIER, B.E.; ANGULO-JARAMILLO, R. Field measurements of the hydraulic properties of soil. **Soil Technology, Cremlingen**, 1991. v.4, p.111-123.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ (Terezina, PI) – Departamento de recursos hídricos e geologia aplicada – **Ensaio: Análise granulométrica de solos por peneiramento (via úmida)**. Piauí, 2010.

VASCONCELOS, G. L. M. B. **Caracterização hidrogeofísica de sedimentos típicos do leito seco do rio Capibaribe: Experimentação e modelagem**. . Universidade Federal de Pernambuco, Doutorado em Engenharia Civil - Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Tese de Doutorado. Recife-PE ,2015.

VALVERDE, F. M. **Agregados para construção civil**. Balanço Mineral Brasileiro, 2001.

VERAS, T. B. **Análise da interação rio-aquífero na zona hiporréica para a tecnologia de filtração em margem: estudo de caso no rio Beberibe-PE.** Universidade Federal de Pernambuco, Mestrado em Engenharia Civil - Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Dissertação de Mestrado. Recife-PE, 2011.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. Belo Horizonte.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.