



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
ÁREA: RECURSOS HÍDRICOS E SANEMANTO AMBIENTAL

DA RECARGA NÃO GERENCIADA À RECARGA GERENCIADA:  
ESTRATÉGIA PARA AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO

JOÃO DEHON DE ARAÚJO PONTES FILHO

Campina Grande - PB

2018

JOÃO DEHON DE ARAUJO PONTES FILHO

DA RECARGA NÃO GERENCIADA À RECARGA GERENCIADA:  
ESTRATÉGIA PARA AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Carlos de Oliveira Galvão

Coorientador: Prof. Janiro Costa Rêgo

Campina Grande - PB

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P814d Pontes Filho, João Dehon de Araújo.

Da recarga não gerenciada à recarga gerenciada : estratégia para aquífero aluvial no semiárido brasileiro / João Dehon de Araújo Pontes Filho. – Campina Grande, 2018.

67 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Prof. Dr. Janiro Costa Rêgo".

Referências.

1. Gestão Integrada de Recursos Hídricos – Engenharia Civil. 2. Recarga Gerenciada de Aquífero. 3. Reuso de Água. 4. Escassez de Água. I. Galvão, Carlos de Oliveira. II. Rêgo, Janiro Costa. III. Título.

CDU 624:556.18(043)

JOÃO DEHON DE ARAUJO PONTES FILHO

DA RECARGA NÃO GERENCIADA À RECARGA GERENCIADA:  
ESTRATÉGIA PARA AQUIFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO

Dissertação aprovada no dia 07 de fevereiro de 2018



---

Prof<sup>o</sup> Carlos de Oliveira Galvão  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Orientador**



---

Prof<sup>o</sup> Janiro Costa Régio  
Universidade Federal de Campina Grande  
**coorientador**



---

Prof<sup>o</sup> Vera Lúcia Antunes de Lima  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Examinador Externo**



---

Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho  
Universidade Federal da Paraíba  
**Examinador Externo**

*Dedico este trabalho à memória do meu pai, que estaria muito orgulhoso de me ver seguindo seus passos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela perfeita construção de todas as coisas.

Esta dissertação não teria chegado ao fim se não fosse o apoio incondicional da minha mãe, Ana Maria e minha avó, Iracema, que nunca mediram esforços para apoiar meus estudos, minha namorada, Quévia, meu braço direito e esquerdo e da minha irmã, Gabriella, meu exemplo de pessoa estudiosa.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande e ao CNPq por me permitirem estudar recursos hídricos em uma cidade inserida no semiárido brasileiro. Agradeço também ao projeto BRAMAR que me forneceu os subsídios para o desenvolvimento desta pesquisa.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador Prof. Carlos Galvão, por ter me supervisionado de maneira bastante cuidadosa, me fornecidos conselhos valiosos para minha carreira e ter servido de exemplo de pesquisador de altíssimo nível.

Agradeço enormemente ao Prof. Janiro Rêgo, primeiramente por ter me aceitado como orientando, em segundo lugar por ter dividido comigo seu vasto conhecimento científico, em terceiro, pelas deliciosas conversas nos mais variados tópicos e, por último e talvez mais importante, por ter me mostrado o caminho para ser um excelente professor, fato que muito me incentivou a seguir na carreira acadêmica.

Esse trabalho contou com a colaboração de muitas pessoas, por isso, meus sinceros agradecimentos aos membros do grupo de águas subterrâneas, nas pessoas de Bárbara, Armando, Mateus e Ingrid, parceiros indispensáveis durante a pesquisa, ao professor Hugo por toda articulação realizada, a professora Mônica pelas discussões, a Djair pela enorme contribuição na coleta de informações de campo, aos membros do laboratório de Qualidade da Água do CDSS/UFCG e aos funcionários do Laboratório de Hidráulica I, em especial, Ismael, Alrezinha e Raul.

Durante minha passagem por Campina Grande, pude contar com o apoio e companheirismo dos alunos da turma de mestrado de 2016, Danilo, Dátia, Elis, Gleson, Mariah, Michelle, Renata, Rennan, Simone e Thiago e ainda, Matheus e Paulo, com quem dividi momentos de construção e desenvolvimento pessoal envolvidos no processo de pós-graduação.

Por fim, meu muito obrigado aos alunos das turmas de Hidráulica Geral e Sistemas de Abastecimento de Água, 2017.1, com os quais pude transferir o que sabia e aprender o que ensinava.

## EPÍGRAFE

“No meio da confusão, encontre a  
simplicidade”

Albert Einstein

## RESUMO

Grande parcela dos escassos recursos hídricos do semiárido brasileiro estão armazenados nos aquíferos aluviais, servindo como importante fonte para o abastecimento de comunidades rurais e a irrigação de pequeno porte, diante da intermitência dos rios da região. Apesar da importância desses aquíferos, esgoto doméstico, tratado ou não, é depositado nos leitos secos desses rios, gerando uma recarga não gerenciada desses aquíferos que pode provocar impactos negativos, fato que demanda a criação de estratégias em busca de possibilitar o correto manejo desse sistema. Uma opção é realizar a recarga gerenciada desses aquíferos, aproveitando-se da infraestrutura hídrica existente, formada por barragens associadas aos sistemas de tratamento de esgoto. Para formulação de tal estratégia nesse estudo, buscou-se um local que possuísse características representativas da região. Foram levantados dados litológicos e monitorados o nível estático e a qualidade da água do aquífero, assim como sua relação com a precipitação. Dessa forma, o sistema, formado pelo aquífero do Rio Sucuru, o açude Sumé e o esgoto produzido pela cidade de Sumé-PB, foi estudado e observou-se que a concentração de cloreto, utilizado como traçador para indicar a presença de esgoto, manteve-se elevada na zona urbana, devido à falta de saneamento. Porém, tanto seus valores, como a variação deles ao longo do tempo, vão diminuindo com o transcorrer do fluxo subterrâneo. Ainda, em busca de entender a efetividade do tratamento solo-aquífero na região, comparou-se as análises de nutrientes e de indicador bacteriológico do poço com maior presença de cloreto e do esgoto tratado, obtendo-se resultados melhores para o efluente após passagem pelo solo do que pelo sistema de lagoas de estabilização. Apesar dessa aparente capacidade de tratamento do aquífero para tais parâmetros, o mesmo não possui capacidade de remoção de cloreto, o que mostra a necessidade de realizar recarga com águas de menores concentrações, objetivando garantir seus usos e evitar risco de salinização. Diante disso, a estratégia proposta foi dividida em quatro medidas, duas utilizando o esgoto e duas recursos hídricos superficiais, as quais consideram os desafios financeiros e operacionais que podem surgir, de modo a promover: (i) reuso de águas servidas, (ii) diminuir as perdas por evaporação, e, conseqüentemente, (iii) aumentar a oferta. Sendo assim, essa proposta de promoção da gestão integrada dos recursos hídricos da região atuará no sentido de atingir os objetivos de desenvolvimento do milênio.

**Palavras-chave:** Recarga gerenciada de aquífero; Gestão Integrada de Recursos Hídricos, Reuso da água; Escassez de água



## ABSTRACT

Great amount of scarce water resources from Brazilian semiarid are stored at alluvial aquifers, serving as important source to supply rural communities and small irrigation, due to its intermittent rivers. Despite the importance of this aquifers, wastewater, treated or not, is disposed at dry riverbed, generating an un-managed aquifer recharge that can lead to negative impacts, demanding creation of strategy searching for correct management of this system. One option is to manage recharge this aquifers, taking advantage of hydric works, made by dams, in conjunction with treated wastewater. To formulate this strategy, a site that possess representative characteristics of the region was chosen, in which lithologic data and of water quality and hydraulic heads were monitored, as their relationship with precipitation. Therefore, the system made by Sucuru River, Sumé Dam and wastewater produced by the city of Sumé, in the State of Paraíba, were studied. It was observed that chloride concentration, used as a tracer to indicate wastewater presence due to lack of sanitation, kept high at the urban zone. However, its values and variation with time decrease along the aquifer. Seeking to understand the effectivity of soil-aquifer treatment, the presence of nutrients and bacteriological indicator were compered between the well with highest amount of chloride and the effluent of the wastewater treatment plant and better results were found for the passage of wastewater through the soil than the system composed by stabilization lagoons. Despite this apparent capacity of treatment from the aquifer, it cannot remove chloride, demonstrating the need to use water with less concentration of this parameter in order to secure its uses and avoid salinization hazard. In face of that, the proposed strategy was divided in four measures, two utilizing wastewater and two superficial water resources available and they consider financial and operational challenges that may occur, in order to promote: (i) water reuse, (ii) reduce evaporation losses and, consequently, (iii) increase offer. This proposal to promote integrated management of existing water resources will act to achieve millennium development goals.

**Keywords:** Managed aquifer recharge; Integrated water resources management; Water reuse; water scarcity

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Sistema de tratamento Solo-Aquífero (TSA)</i>	23
<i>Figura 2: Técnica de bacias de percolação visando incrementar recarga</i>	23
<i>Figura 3: Libração de água para recarga</i>	24
<i>Figura 4: Técnica de Aquífer Storage and Recovery (ASR)</i>	25
<i>Figura 5: Técnica de Aquífer Storage Transfer and Recovery (ASTR)</i>	25
<i>Figura 6: Fluxograma metodológico</i>	29
<i>Figura 7: Poço em que é realizado o monitoramento do nível estático com marcação do local onde deve ser realizada a leitura do nível da água</i>	30
<i>Figura 8: Localização da área de estudo.</i>	32
<i>Figura 9: Sistema de esgotamento sanitário de Sumé</i>	34
<i>Figura 10: ETE da cidade de Sumé</i>	34
<i>Figura 11: Precipitação média mensal</i>	377
<i>Figura 12: Variação do nível estático dos poços ao longo do aquífero</i>	37
<i>Figura 13: Variação do nível estático e dos valores de cloreto nos poços de monitoramento ao longo do aquífero e no efluente da ETE</i>	39
<i>Figura 14: Variabilidade do cloreto em relação ao nível do aquífero e aos eventos de precipitação no poço P33</i>	40
<i>Figura 15: Série temporal do cloreto para poços distribuídos ao longo do aquífero</i>	41
<i>Figura 16: Comparação entre eficiência do tratamento do SSA e da ETE para espécies do nitrogênio</i>	42
<i>Figura 17: Imagem típica do leito do rio Sucuru seco</i>	43
<i>Figura 18: Riacho Pedra Comprida em época de estiagem. Toda área alagada é formada pelo esgoto doméstico bruto</i>	43
<i>Figura 19: Modelo conceitual esquemático representando a área de estudo</i>	44
<i>Figura 20: Poço Bico de Pato em representação esquemática.</i>	46
<i>Figura 21: Modelo conceitual de RGA proposta para a área de estudo</i>	51

## LISTA DE QUADRO

*Quadro 1: Estratégia de RGA proposta para o caso Sumé* \_\_\_\_\_ 47

## LISTA DE TABELA

*Tabela 1: Concentrações médias de cloreto para as fontes de recursos hídricos existentes na região* \_\_\_\_\_ 50

## LISTA DE SIGLAS

ASR	Aquifer Storage and Recovery
ASTR	Aquifer Storage Transfer and Recovery
BRAMAR	BRAZil Managed Aquifer Recharge
CDSS	Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido
CF/88	Constituição Federal de 1988
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FNDCT	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RGA	Recarga Gerenciada de Aquífero
RNGA	Recarga Não Gerenciada do Aquífero
SAB	Semiárido Brasileiro
SNGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
TSA	Tratamento Solo-Aquífero
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>14</b>
1.1.1	Objetivo geral .....	14
1.1.2	Objetivos específicos .....	14
<b>1.2</b>	<b>Estrutura da dissertação .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Aquíferos aluviais no semiárido brasileiro .....</b>	<b>16</b>
2.1.1	Características .....	16
2.1.2	Usos .....	17
<b>2.2</b>	<b>Gestão integrada das águas subterrâneas no Brasil .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Recarga gerenciada de aquífero.....</b>	<b>21</b>
2.3.1	Técnicas de RGA .....	22
2.3.2	Esgoto como fonte de recarga dos aquíferos aluviais no SAB.....	26
2.3.3	Águas superficiais como fonte de recarga no SAB .....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização litológica .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Monitoramento do nível estático .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Monitoramento da qualidade da água.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4</b>	<b>Dados pluviométricos .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Características amostradas da área de estudo.....</b>	<b>35</b>
4.1.1	Hidrogeologia do aquífero aluvial de Sumé .....	35
4.1.2	Comportamento do aquífero com relação ao nível do lençol freático .....	35
4.1.3	Análises qualitativas dos recursos hídricos .....	38

<b>4.2</b>	<b>Recarga Não gerenciada do Aquífero (RNGA)</b> .....	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>Recarga gerenciada</b> .....	<b>45</b>
4.3.1	RGA utilizando esgoto como fonte.....	45
4.3.2	RGA utilizando recursos hídricos superficiais como fonte .....	47
4.3.3	Discussão .....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE 1</b> .....	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE 2</b> .....	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O Semiárido Brasileiro (SAB) é uma região caracterizada por alta densidade populacional, grande variabilidade climática e secas recorrentes. A característica litológica predominante na região é a de solos rasos, sobre embasamento cristalino (FEITOSA et al., 2005) que, aliada à ocorrência de chuvas concentradas temporalmente, implica na intermitência dos rios da região. Para garantir o abastecimento dos seus quase 23 milhões de habitantes dispersos em uma área de 980.000 km<sup>2</sup> (MEDEIROS et al., 2012), principalmente os habitantes de regiões urbanas, uma densa rede de reservatórios foi construída ao longo de mais de um século de políticas públicas com o propósito de solucionar o problema de acesso à água na região. A construção de reservatórios superficiais possui como desvantagens as elevadas perdas por evaporação e a dificuldade em abastecer as pequenas comunidades difusas e a irrigação de pequeno porte. Como alternativa, essas demandas têm sido parcialmente supridas com água subterrânea proveniente de pequenos aquíferos aluviais (BURTE et al., 2005; MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2006; BURTE et al., 2011).

Tais aquíferos, livres, rasos e estreitos, são compostos por sedimentos não consolidados, decorrentes da desintegração de rochas da bacia hidrográfica que se depositam nas regiões de baixa declividade dos leitos dos rios e são limitados na base e na lateral por rochas cristalinas (RÊGO et al., 1990). Apesar de sua difundida utilização e crescente importância, não só no SAB, como também em outras regiões áridas e semiáridas do mundo, as concentrações de sais destas águas subterrâneas tendem a ser elevadas devido à gênese das rochas existentes nas bacias hidrográficas do SAB e também ao baixo volume de precipitação existente na região (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2006; BURTE et al., 2011; MISSIMER et al., 2012; ANDRADE, 2014; RAWY et al., 2016), principalmente quando comparadas às dos grandes aquíferos regionais. Além disso, como esses sistemas não são gerenciados de forma adequada (RÊGO et al., 1999; BURTE et al., 2005; ALBUQUERQUE et al., 2015), ações antrópicas aumentam o risco de salinização.

O esgoto, em especial, é um agravante de risco para tais aquíferos por ser uma fonte com alta concentração de sais, que, ao ser despejado diretamente no solo, irá se infiltrar e atingir o lençol freático, constituindo uma recarga não gerenciada do aquífero (RNGA). Essa situação ocorre tipicamente no SAB, com quase 9,0m<sup>3</sup>/s de esgoto, dos quais apenas 19,1% tratados, sendo lançados em corpos receptores intermitentes (ANA, 2017a). Dessa situação decorre a necessidade de uma solução mais adequada para a destinação final desse recurso, já que o mesmo não pode se beneficiar dos processos de diluição e autodepuração decorrentes do



despejo em corpos hídricos perenes. Este desafio é motivado ainda pelo interessante potencial quantitativo e pela continua disponibilidade temporal das águas residuárias como fonte de recarga dos aquíferos aluviais.

Uma forma avançada de depuração do esgoto no solo é através do sistema chamado tratamento solo-aquífero (TSA), por meio do qual ocorre uma geopurificação que se beneficia de processos físicos, químicos e biológicos a partir de interações com a zona vadosa e com as águas subterrâneas (JOHNSON, 2009; ABEL, 2014; SHARMA et al., 2008; SHARMA e KENNEDY, 2016). No entanto, nem os sistemas TSA, tampouco as técnicas convencionais de tratamento de esgoto são capazes de retirar sais da água, o que pode agravar o risco de salinização em regiões já vulneráveis.

Dessa forma, a recarga gerenciada de aquífero (RGA) apresenta-se como uma estratégia promissora para o gerenciamento de aquíferos aluviais em regiões áridas e semiáridas, tanto em termos quantitativos como em termos qualitativos (MISSIMER et al., 2012; RAWY et al., 2016; SARMA e XU, 2017). A RGA é definida como o armazenamento e o tratamento de água em aquíferos realizados de maneira intencional (GALE, 2005) e, associada aos benefícios de melhoria da qualidade do esgoto pelo TSA e da utilização de fontes com menores concentrações de sais, pode-se obter resultados mais sustentáveis.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Propor uma estratégia de RGA em aquíferos aluviais a partir de uma situação típica existente no SAB.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Descrever qualitativa e quantitativamente um caso específico de RGA existente em aquífero aluvial no SAB;
- Desenvolver um modelo conceitual dessa RGA típico para a região;
- Utilizar águas superficiais em conjunto com disposição de efluentes como estratégia de RGA;
- Desenvolver um modelo conceitual dessa RGA com potencial de ser replicada em outras áreas do SAB.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado está inserida no projeto BRAMAR (BRAzil Managed Aquifer Recharge), que visa o desenvolvimento de estratégias e tecnologias inovadoras para mitigação dos efeitos da escassez de água no nordeste brasileiro, sendo uma rede cooperação binacional Brasil – Alemanha através de pesquisas multidisciplinares de abrangência regional. Dispõe de financiamento aprovado do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) e teve início no ano de 2014 e se estende até 2018.

Este documento é composto por esta introdução e mais cinco capítulos, conforme descritos a seguir:

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Neste item, são apresentados aspectos legais relativos à gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Em seguida, é feita uma caracterização desses recursos no SAB. Por fim, apresenta-se um item relativo às técnicas de RGA e às fontes que podem ser utilizadas no SAB.

Capítulo 3 – Metodologia: Esta pesquisa apresenta uma metodologia para obtenção de estratégia de RGA que possa ser replicada em outras regiões semelhantes. O primeiro passo é a escolha de um caso representativo, em seguida quais informações devem ser levantadas para melhorar o entendimento do sistema, para, por fim, propor uma estratégia que se adeque as especificidades da região.

Capítulo 4 – Neste capítulo, são apresentados os resultados adquiridos com os levantamentos de campo, um modelo conceitual da situação de RGA provocada pela disposição do esgoto nos leitos secos da região e finaliza expondo a estratégia que poderá promover a gestão integrada dos recursos hídricos da região.

Capítulo 5 – A partir dos objetivos traçados e dos resultados apresentados, conclui-se acerca da implementação da estratégia proposta e das dificuldades para realizá-la.

Capítulo 6 – São apresentados comentários sobre possíveis pesquisas futuras que podem ser desenvolvidas no sistema hídrico estudado, visando à implementação da estratégia proposta.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 AQUÍFEROS ALUVIAIS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Conceitos importantes para o entendimento desta dissertação são os de aquífero e de água subterrânea. Aquífero é uma camada de rocha portadora de água que poderá cedê-la em quantidade economicamente utilizável a um poço ou nascente (HEATH, 1983). Os aquíferos livres e porosos são formados por duas regiões distintas: a zona saturada, na qual a água ocupa completamente os interstícios do solo; e a zona não saturada, também conhecida como zona vadosa, na qual os vazios são ocupados majoritariamente pelo ar. Água subterrânea é definida como aquela contida na zona saturada, por ser a única disponível para suprir poços e fontes e sua camada superficial, no limite entre as zonas saturada e vadosa, é denominado de lençol freático ou superfície freática e indica o nível estático ocupado pela água subterrânea naquela região em determinado momento (HEATH, 1983).

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2000), os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão da água nos seus limites e de acordo com a sua porosidade.

Quanto à pressão, nos aquíferos constituídos por uma camada permeável entre duas camadas impermeáveis, sua pressão será maior que a atmosférica e esse aquífero será referido como confinado; já quando a água preencher parcialmente o aquífero, permanecendo livre na superfície da zona saturada, ou seja, submetido à pressão atmosférica, tais aquíferos são classificados como livres ou freáticos.

Quanto à porosidade, podem ser classificados em: (i) poroso, quando formado por rochas sedimentares consolidadas ou inconsolidadas, onde a água ocorre nos poros entre os grãos; (ii) fissural, quando formado em rochas ígneas e/ou metamórficas, em que o armazenamento e a circulação da água ocorrem no interior de suas fraturas, fendas ou falhas; e (iii) cárstico, quando formado em rochas calcárias, onde a circulação se dá nas discontinuidades causadas pela dissolução do carbonato pela água.

#### 2.1.1 Características

Os aquíferos aluviais são classificados como livres e porosos e são limitados na base e na lateral por rochas cristalinas. Possuem pequenas dimensões, com largura variando entre 100 m e 500 m e profundidades entre 0,5 m e 15 m (BURTE, 2008; MONTENEGRO E MONTENEGRO, 2006).

As características da bacia a montante da região do aquífero são determinantes na tipologia dos sedimentos e na determinação da sua extensão (BURTE, 2008). Sua litologia é bastante heterogênea devido às diferentes velocidades de sedimentação das partículas erodidas e da mobilidade dos leitos dos rios (VIEIRA, 2002, ALMEIDA et al., 2004). Essa heterogeneidade e a presença de grãos de pequeno diâmetro, como a argila, podem influenciar no fluxo subterrâneo dos aluviões, dificultando simulações de seu comportamento (TSUYUGUCHI et al., 2017). Apesar dessa dificuldade, seu fluxo é predominantemente axial (BURTE, 2008) e acompanha o sentido do escoamento do rio em que está associado.

Quanto a qualidade de suas águas, há a possibilidade de que as concentrações de sais destas águas subterrâneas serem elevadas (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2006; BURTE et al., 2011; ANDRADE, 2014), principalmente quando comparadas as dos grandes aquíferos regionais. Ainda assim, é a melhor fonte de água subterrânea na região, visto que as águas armazenadas nas fissuras das rochas cristalinas possuem maiores concentrações de sais (BURTE, 2008). A concentração de sais se dá mais intensamente nas áreas de menor condutividade hidráulica e de menor profundidade do aquífero (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2003).

Outra característica interessante de tais aquíferos para a região é sua baixa evaporação, especialmente devido ao seu elevado déficit hídrico existente, precipitações anuais entre 300 e 800 mm e evaporação em torno de 2.000 mm (BURTE et al., 2011).

Tais característica fazem dos sistemas aquíferos aluviais reservas estratégicas, que podem funcionar como alternativa para o armazenamento nos reservatórios superficiais, provendo águas de boa qualidade e diminuindo suas perdas por evaporação.

### **2.1.2 Usos**

As águas subterrâneas presentes nos aquíferos aluviais são bastante utilizadas em diversas regiões, sendo especialmente importantes nas regiões de reconhecida escassez hídrica, uma vez que apresentam, de maneira geral, águas com melhor qualidade, possuem baixas taxas de evaporação e podem servir como fonte de armazenamento nos períodos chuvosos para posterior utilização nos períodos secos. Prova dessa importância é que o abastecimento de mais de dois milhões de habitantes, 15,7% da população do semiárido brasileiro (SAB), é realizado exclusivamente por fontes subterrâneas e outros 7% são abastecidos por fontes mistas, manancial superficial e subterrâneo (INSA, 2014a).

O aproveitamento de pequenos aquíferos aluviais é prática comum e importante fonte de recursos hídricos no cenário de escassez majoritariamente encontrado no semiárido brasileiro (RÊGO et al., 1999, ANDRADE, 2014), tendo como principais usos o abastecimento de comunidades difusas e a irrigação para agricultura familiar ou de pequena escala, servindo, muitas vezes, como o único recurso disponível para irrigação em regiões semiáridas (MONTEGRO et al., 2003; ALMEIDA, et al., 2004, ALBUQUERQUE et al., 2015). Burte (2008) ressalta o potencial do uso dos aquíferos aluviais para o desenvolvimento rural devido à baixa evaporação, dispersão geográfica e a proximidade de terras férteis.

Esses sistemas são facilmente explorados devido a facilidade de escavação de poços pelo solo ser predominantemente arenoso e ao baixo custo operacional de bombeamento, uma vez que o pacote aluvial possui pequenas profundidades (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000). Além disso, possuem alto potencial para o desenvolvimento da região diante de sua dispersão geográfica e proximidade com terras férteis (BURTE, 2008).

Como esses sistemas não são gerenciados de forma adequada (RÊGO et al., 1999; BURTE et al., 2005; ALBUQUERQUE et al., 2015), ações antrópicas como a irrigação nos vales aluviais e o despejo de esgoto aumentam o risco de salinização inerente devido a qualidade de suas águas (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2006, SILVA 2016 e SALGADO, 2016).

Nessa perspectiva, Burte et al. (2011) avaliou a dinâmica da salinidade das águas de um aquífero aluvial no semiárido do estado do Ceará, identificando que as águas podiam ser usadas para irrigação, apesar de existir risco de salinização e sodificação dos solos, o que poderia ser contornado utilizando um manejo integrado das águas superficiais e subterrâneas da bacia.

Para o bom gerenciamento desses sistemas, deve-se levar em consideração os principais usos, abastecimento humano em comunidades difusas e irrigação de pequeno porte. Sendo assim, de acordo com a Portaria 2.914/11 do Ministério da Saúde, o limite máximo permissível para o cloreto, que pode funcionar como um bom indicador, tanto de salinidade quanto de contaminação por esgoto, é de 250 mg/L. A agricultura nessas regiões deve buscar a utilização de plantas que melhor se adaptem às condições de salinidade naturais. Plantas mais sensíveis, como as hortaliças, por exemplo, precisam considerar a utilização tratamento prévio para reduzir os teores de sais.

Albuquerque et al (2015), analisaram a recarga de aquífero aluvial no semiárido do estado de Pernambuco e encontraram que a principal recarga é devida as precipitações que ocorrem diretamente na área e a irrigação que capta água dos poços do próprio aluvião estudado.

Investigando a reação de aquífero aluvial ao longo do rio Piranhas-Açu por intermédio de modelagem numérica, Rêgo (2012) propôs medidas para gestão dos recursos hídricos, tais como: aumento e controle das recargas do aquífero liberando águas armazenadas nos reservatórios superficiais, construção e operação de barragens subterrâneas para retardar as saídas e adequada distribuição espacial dos poços.

Diante de tais informações, percebe-se a importância de realizar o correto manejo das águas dos aquíferos aluviais da região e da consideração de todos os recursos hídricos existentes, de modo a promover a gestão integrada das diversas fontes e ampliar os benefícios aos usuários desses sistemas hídricos.

## 2.2 GESTÃO INTEGRADA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL

A utilização de águas subterrâneas é prática comum em diversas regiões do planeta e pode abastecer tanto comunidades urbanas como rurais, além de servir como fonte para irrigação. Seus benefícios residem no tratamento simplificado, uma vez que os aquíferos funcionam como uma reserva hídrica de menor vulnerabilidade à contaminação do que quando encontrado superficialmente. Além disso, possui a facilidade de acesso e menores custos de implantação e distribuição pelo fato da fonte poder ser encontrada próxima a região onde será consumida (LIBÂNIO, 2010). A reserva potencial explorável brasileira é de 11.430m<sup>3</sup>/s, tendo em vista que o país possui alguns dos maiores aquíferos do mundo, o que possibilita grande disseminação de uso, estimando-se em mais de 476.000 poços perfurados (ANA, 2013).

Apesar de sua grande utilização, a gestão das águas subterrâneas é bastante problemática, devido a necessidade de estudos mais complexos para concessão de outorga que para as águas superficiais (OLIVEIRA et al., 2007) e o seu baixo apelo político, já que as obras para sua utilização não requerem grandes investimentos públicos (DE STEFANO, 2014);

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Brasil está regulamentada de maneira fragmentada em diversos diplomas normativos, dentre eles a Constituição Federal de 1988 (CF/88), a legislação específica para recursos hídricos, Lei nº 9.433/97, e nas resoluções específicas elaboradas pelos conselhos nacionais de recursos hídricos e do meio ambiente.

Na CF/88, está estabelecido que a dominialidade das águas subterrâneas é dos Estados e do Distrito Federal, em seu artigo 26. A Lei Nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional

de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGREH), trata tanto dos recursos hídricos de forma geral, se estabelecendo como o principal instrumento legislativo referente aos recursos hídricos no país.

A regulamentação dos recursos hídricos subterrâneos avançou também através de resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e no Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Tais diplomas normativos possuem a diretriz de buscar promover a gestão integrada deste recurso hídrico, englobando tanto as relações entre águas superficiais e subterrâneas, como também, aspectos de qualidade e quantidade.

As resoluções que abrangem questões quantitativas das águas subterrâneas são: (i) CNRH 15/01, que determina que as diretrizes para implementação da PNRH e dos seus instrumentos deve considerar a interdependência entre as águas superficiais e subterrâneas; (ii) CNRH 22/02, que estabelece as diretrizes para inserção das águas subterrâneas nos Planos de Recursos Hídricos, um dos principais instrumentos da PNRH; e (iii) CNRH 153/2013, que reconhece que uma das formas de promover a integração dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos de maneira gerenciada é a partir da recarga de aquíferos.

Essa norma específica para recarga de aquíferos determina as formas as quais a recarga pode ser implantada, os objetivos de tal execução, determina que o órgão gestor estadual de recursos hídricos é o responsável pela concessão da autorização ao empreendedor. Define ainda o nível de detalhamento mínimo dos estudos necessários para concessão de tal autorização e limita a utilização desses sistemas de recarga para os casos em que cause alteração da qualidade das águas subterrâneas ao ponto de provocar restrição dos usos preponderantes.

Aspectos de qualitativos, como o enquadramento em classes, estão regulamentados nas resoluções CNRH 91/08 e CONAMA 396/98. Outro importante fator de interesse dos recursos hídricos subterrâneos é a busca de sua proteção contra à contaminação que está compreendida na CNRH 92/08. Já o reconhecimento da capacidade do solo em agir como filtro natural está disposto na CONAMA 420/2009.

Diante da extensa regulamentação e de sua dificuldade de gestão já mencionada, surge a necessidade de maior atenção para esses recursos, especialmente na região semiárida, devido ao seu inerente déficit hídrico. Os aquíferos aluviais do SAB, fontes de extrema importância para desenvolvimento de comunidades rurais da região, possuem o desafio de manter a boa qualidade, uma vez que sofrem ameaças da introdução de esgotos domésticos e da irrigação insustentável, além de sofrerem com a superexploração, que aumenta a insegurança hídrica vigente.

De acordo com Oliveira et al (2007), a premissa básica para executar a gestão integrada das águas superficiais/subterrâneas é a existência de aquífero livre hidraulicamente interconectado com corpos hídricos perenes. O SAB possui rios intermitentes, porém, existe um grande volume de água sendo armazenado superficialmente em suas barragens, o que produz uma condição bastante peculiar em comparação a outras regiões do Brasil e que merece atenção especial por parte dos legisladores, de modo que suas regulamentações possam abranger tais características.

De modo geral, o modelo brasileiro de gestão de águas subterrâneas é bastante complexo e abrangente, estando disseminado em várias normativas. No entanto, sua implementação tem sido incipiente, principalmente no SAB que possui uma necessidade de explorar todos os seus recursos hídricos da forma mais sustentável possível.

### 2.3 RECARGA GERENCIADA DE AQUÍFERO

De acordo com a resolução CNRH 153/2013, entende-se por recarga natural: “a infiltração natural de água nos aquíferos, sem intervenção antrópica, ou facilitação por práticas conservacionistas, e compreende uma variável do ciclo hidrológico. ”. A recarga artificial, neste trabalho apresentada como recarga gerenciada para evitar o termo “artificial”, conforme proposto por Gale (2005), é definida na mesma resolução como: “introdução não natural de água em um aquífero, por intervenção antrópica planejada ...). ”. Uma outra definição importante presente na referida norma é a de recarga acidental, exposta como: “Introdução de água em um aquífero, por consequência de atividades antrópicas não planejadas para fins de recarga artificial. ”.

A RGA, que pode ser entendida como o armazenamento e o tratamento de água em aquífero realizados de maneira intencional, vem sendo apontada como forma de gerenciamento sustentável de aquíferos em regiões áridas e semiáridas, especialmente em um cenário de aumento de demanda e de mudanças climáticas (GALE, 2005; SARMA e XU, 2017).

São grandes motivadores da utilização de RGA: (i) a manutenção dos benefícios da utilização de águas subterrâneas; (ii) re-pressurização dos aquíferos submetidos a intensas explorações e (iii) promover o reuso de águas servidas, onde se beneficia de melhoria na qualidade e em aspectos psicológicos relacionados a sua aceitação por parte da população (GALE, 2005; BOWER, 2002). Outra grande motivação para realizar RGA é visando o armazenamento de águas nos períodos chuvosos para posterior uso nos períodos de estiagem,



especialmente em regiões áridas e semiáridas, que sofrem com longos períodos sem chuva e altas taxas de evaporação.

Podem servir como fontes de recursos hídricos para RGA: rios, barragens, drenagem urbana de água da chuva, águas da chuva captadas por telhados e esgotos.

A partir dessa definição, qualquer introdução de água em aquífero realizada de maneira não intencional, decorrente de algum descontrole de atividades antrópicas, deverá ser considerada como RGA. Outras atividades que não são consideradas técnicas de RGA são decorrentes do aumento de recarga de aquíferos decorrentes de atividades que não tinham esse objetivo, como limpeza de solo para fins agropecuários ou infiltração de água utilizada para irrigação de cultivos (GALE, 2005).

Portanto, RGA pode servir como ferramenta para alcançar a gestão integrada dos recursos hídricos existentes em determinada região, objetivando mitigar os problemas ambientais existentes e aumentar a oferta hídrica quando necessário.

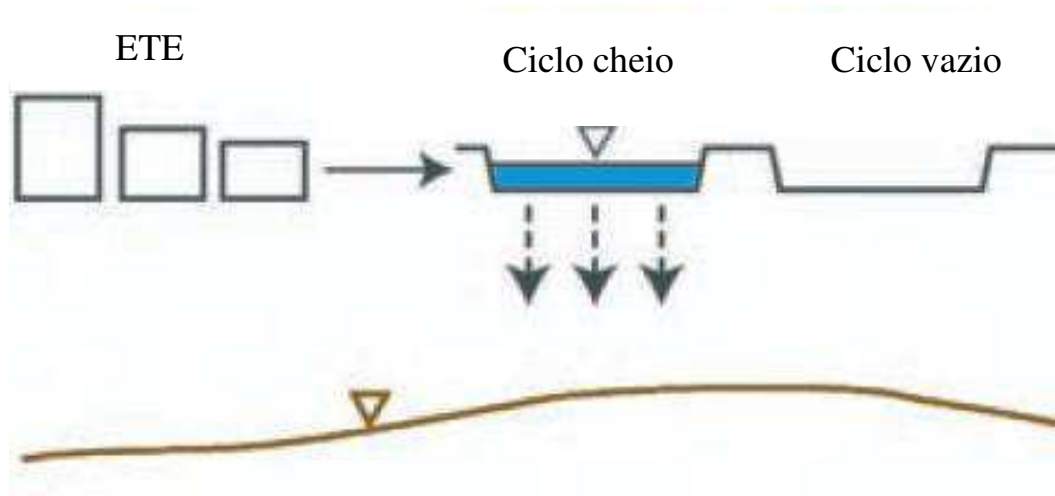
### **2.3.1 Técnicas de RGA**

Existe uma grande variedade de metodologias desenvolvidas para realizar a recarga de água subterrânea de maneira intencional, podendo ser agrupadas em: técnicas de espalhamento e poços de injeção (GALE, 2005). O primeiro grupo é mais aplicado para recarregar aquíferos livres que estejam próximos da superfície do solo. Já o segundo pode permitir utilizar poços que alimentem diretamente aquíferos freáticos ou confinados.

Nos métodos de espalhamento, destacam-se a técnica Tratamento Solo-Aquífero (TSA), as bacias de percolação e a liberação de água para recarga.

TSA é uma forma de realizar RGA quando a fonte é esgoto tratado, Figura 1. É uma tecnologia de tratamento para remoção de contaminantes utilizando meios físicos, químicos e biológicos e vem sendo utilizada em escala real em várias partes do planeta (JOHNSON, 2009; USEPA, 2012; SHARMA e KENNEDY, 2016). Nela, o efluente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), após tratamento primário, secundário ou terciário, é recarregado por meio de bacias de infiltração. A utilização de mais de uma bacia de infiltração permite aplicar sistema rotacional, no qual, a secagem elimina crescimento de algas que, aliado com a limpeza do fundo, restaura as taxas de infiltração (GALE, 2005).

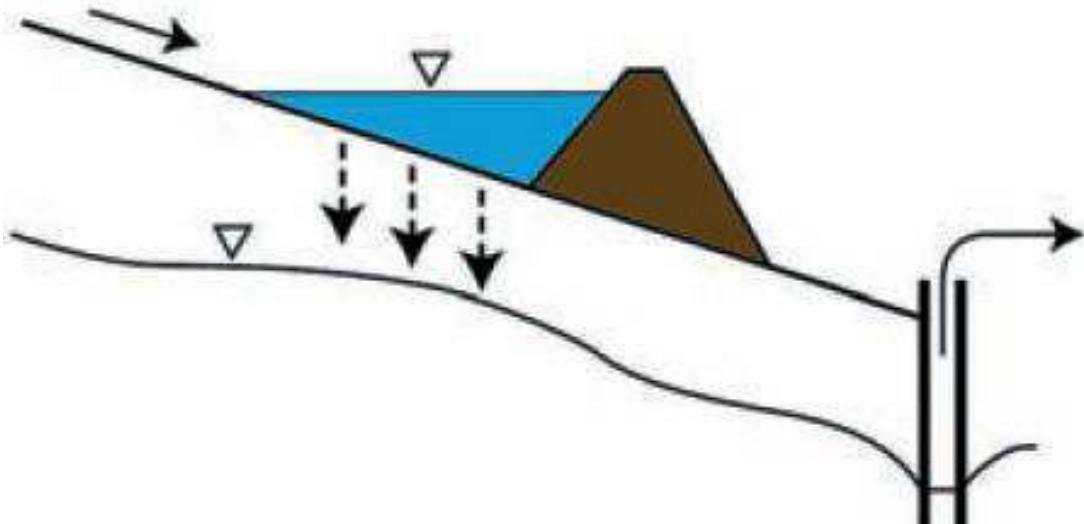
Figura 1: Sistema de tratamento Solo-Aquífero (TSA)



Fonte: Adaptado de GALE, 2005

A construção de pequenas barragens superficiais nos vales de rios efêmeros pode reduzir o fluxo e permitir a percolação no solo, beneficiando-se ainda da redução da erosão, Figura 2. A formação dessas bacias de percolação pode ainda ser utilizada para ampliar a área de cultivo, aproveitando a umidade do solo após seu esvaziamento (GALE, 2005).

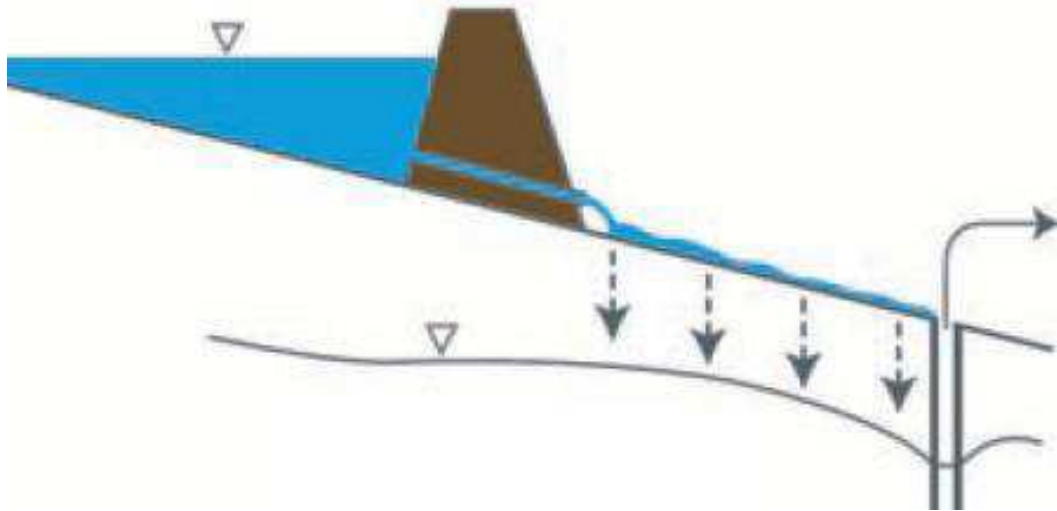
Figura 2: Técnica de bacias de percolação visando incrementar recarga



Fonte: GALE, 2005

O armazenamento em barragens maiores para posterior liberação para o rio a jusante permite que ocorra recarga do aquífero. Essas estruturas retêm alagamentos, permitem sedimentação de sólidos suspensos e liberação a taxas que permitam a infiltração na calha do rio, como mostra a Figura 3

Figura 3: Libração de água para recarga

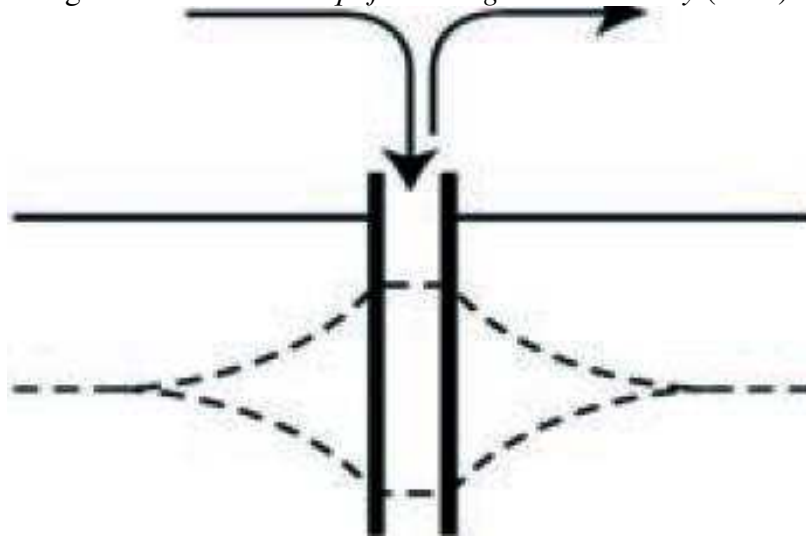


Fonte: GALE, 2005

A utilização de poços de injeção é recomendada para situações em que se deseja acelerar o processo de recarga do aquífero, quando existem camadas espessas de material de baixa condutividade acima do aquífero alvo ou, ainda, quando existirem restrições de área disponível para instalação do sistema de RGA. Existem duas principais variações quando deseja-se utilizar tais poços, em uma, utiliza-se apenas um poço para realizar injeção e captação, na segunda utilizam-se poços distintos para cada processo, permitindo, assim, maior trânsito da água injetada no aquífero.

A primeira delas é conhecida como *Aquífer Storage and Recovery (ASR)* e é muito utilizada quando o maior interesse é em armazenamento subterrâneo do recurso hídrico para posterior utilização, Figura 4. Tem como benefícios a diminuição de custos com perfuração de poço e de problemas com redução da permeabilidade, visto que no processo de extração, ocorre limpeza dos poros que haviam colmatado (MALIVA et al., 2006; MALIVA e MISSIMER, 2010; SCANLON et al., 2016; GALE, 2005).

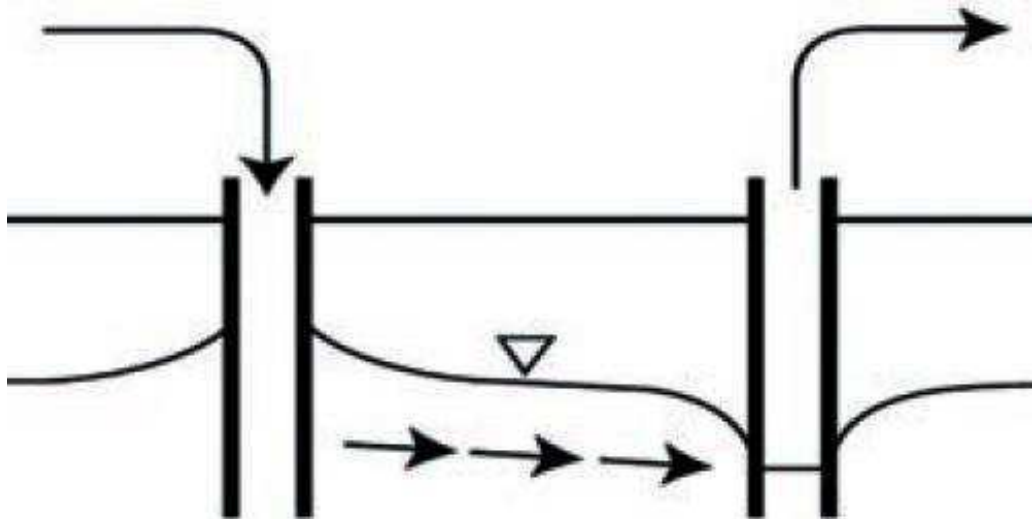
Figura 4: Técnica de *Aquifer Storage and Recovery* (ASR)



Fonte: GALE, 2005

A segunda técnica se beneficia do maior período de residência dentro do aquífero e maior trânsito do fluxo pelo meio poroso de modo a melhorar a eficiência na inativação de patógenos e processos de biodegradação, e é conhecida como *Aquifer Storage Transfer and Recovery* (ASTR), Figura 5 (CSIRO, 2010; SIDHU et al., 2015).

Figura 5: Técnica de *Aquifer Storage Transfer and Recovery* (ASTR)



Fonte: GALE, 2005

As técnicas aqui apresentadas podem compor uma estratégia de RGA que as utilize de maneira conjunta, visando ampliar os benefícios da utilização dos recursos hídricos disponíveis, tais como o esgoto e as águas superficiais.

### 2.3.2 Esgoto como fonte de recarga dos aquíferos aluviais no SAB

Os aquíferos aluviais possuem diversos fatores que influenciam de maneira significativa na sua qualidade natural de suas águas, podendo-se destacar a dissolução de componentes químicos das rochas que compõem o aquífero e sua bacia hidrográfica, como também, da evaporação. Esses processos são agravados nas áreas de menor condutividade hidráulica, onde, devido à menor velocidade do fluxo subterrâneo, ocorre maior contato da água com a rocha (ANDRADE et al., 2010; ANDRADE et al., 2014; MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2003).

Ademais, os fatores antrópicos, como a irrigação e os inevitáveis despejos de esgotos domésticos, previamente tratados ou não, sobre os leitos secos de seus rios, intensificam as condições inerentes a esses aquíferos do SAB que, por serem livres e rasos, são mais vulneráveis à contaminação.

Não bastando as influências ambientais nesses sistemas hídricos, observa-se, ainda, que fatores políticos e legais interferem nas condições dos aquíferos. No âmbito político, escassos investimentos do poder público em saneamento no Brasil, sobretudo longe dos grandes centros urbanos (LEONETI et al., 2011), fizeram com que o sistema de esgotamento sanitário não acompanhasse o ritmo de crescimento das zonas urbanas, o que ocasionou o ínfimo índice de coleta e tratamento de esgoto na região, reforçando a mencionada vulnerabilidade.

Em uma situação de escassez hídrica conjuntural, o reuso desse recurso pode ainda não ser considerado nas tomadas de decisões dos engenheiros, políticos e gestores de recursos hídricos, mas, na prática, vem servindo como recarga estratégica diante da continuidade de seu fornecimento em regiões onde a recarga natural acontece apenas em curto período do ano.

No âmbito legislativo, contudo, o Brasil possui tentativas ainda tímidas no sentido de reconhecer a importância de estratégias de RGA/TSA. O Conselho Nacional de Meio Ambiente possui uma resolução, CONAMA 420/2009, que reconhece como uma das principais funções do solo agir como filtro natural e meio de adsorção e degradação de substâncias químicas e organismos. Já o Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabeleceu uma resolução específica para RGA, CNRH 153/2013, a qual dispõe que tal recarga não poderá causar alteração das águas subterrâneas que provoque restrições aos seus usos.

Diante da inevitável recarga do aquífero pelo esgoto e do eventual risco de salinização, podendo gerar restrição ao seu uso e, conseqüentemente, ir de encontro à disposição normativa, surge a necessidade de compensar este impacto através de outra medida de recarga: a utilização

de águas superficiais visando diluir os sais presentes no esgoto, medida melhor discutida no tópico seguinte.

Para indicar a presença de esgoto doméstico nas águas subterrâneas, o cloreto pode servir como um excelente traçador diante de suas propriedades conservativas, baixa reatividade, e por estar presente nos esgotos domésticos, apesar de também poder ser advindo da dissolução dos minerais e de águas utilizadas para irrigação (HEM, 1970; VON SPERLING, 2005; SANTOS et al., 2014).

Pelo exposto, estratégias de RGA/TSA podem servir como elo entre a dificuldade de implantação do sistema de esgotamento sanitário e a necessidade de ampliação da oferta hídrica para a região, agindo em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), de modo a atender diretamente ao disposto no item 6: água limpa e saneamento, e conseqüentemente a outros objetivos, como a erradicação da pobreza, fome zero, boa saúde e bem-estar, cidades e comunidades sustentáveis e combate às alterações climáticas.

### **2.3.3 Águas superficiais como fonte de recarga no SAB**

Diante da intermitência de seus rios, as águas superficiais do SAB são armazenadas em barragens, intensamente construídas pelo Governo Federal ao longo do século XX, objetivando mitigar os impactos das secas recorrentes na região, sobretudo durante ou após eventos severos. Na maioria das vezes, essas ações eram ineficientes e tardias ao combate imediato do fenômeno natural já instaurado, mas serviriam de importante apoio no enfrentamento de futuras secas (VILLA, 2001; MELLO, 2011; PONTES FILHO, 2015).

Após o declínio dessa política, nos anos 1980, os governos estaduais, juntamente com empreendedores individuais, passaram a ser os grandes responsáveis pelo crescimento da capacidade de armazenamento superficial na região. Com isso, a região conta com uma infraestrutura hídrica de mais de 2.500 reservatórios superficiais com área do espelho d'água superior a 20ha. (BRASIL, 2008). Essa política de intensa construção de barragens, contudo, não significou necessariamente aumento da disponibilidade de água, uma vez que muitas destas barragens sofrem com elevadas taxas de evaporação.

Essas barragens estão geralmente localizadas sobre ou próximas de aquíferos aluviais e constituem importantes reservas de recursos hídricos para os períodos de estiagem. Nesse sentido, a operação de tais barragens para recarregar o aquífero tem como principais benefícios: aumentar a oferta hídrica, uma vez que o armazenamento subterrâneo diminui as perdas por

evaporação em comparação ao armazenamento superficial; e a melhoria da qualidade da água subterrânea, especialmente quando podem agir diluindo a influência dos esgotos produzidos nas zonas urbanas nos aquíferos aluviais.

A liberação das águas dos reservatórios, todavia, não deve objetivar a perenização dos rios intermitentes da região, uma vez que grandes perdas podem ser geradas devido às interações entre o rio e o aquífero aluvial, assim como por evaporação, aumentando o risco de salinização da água e do solo (SANTIAGO et al., 2001; MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2012).

Ao avaliar possíveis situações de RGA em aluvião na região árida da Namíbia, Sarma e Xu (2017) perceberam que as taxas de infiltração dependem de fatores como condições antecedentes, vazão, duração, morfologia do canal e textura e composição do sedimento. Billib et al (1991) propuseram uma otimização da recarga artificial de aquífero aluvial do semiárido paraibano com a liberação de água de reservatório superficial após o período de chuvas, além de avaliar os riscos de salinização associados à elevação da evaporação com a manutenção de altos níveis do lençol freático. Clark et al (2015) mostraram que a recarga de águas pluviais em aquífero com águas salobras aumentou a confiabilidade do abastecimento de água e que o estabelecimento de um volume mínimo a ser armazenado no aquífero para garantir níveis de salinidade aceitáveis resultou em uma diminuição de apenas 3% no volume disponível para abastecimento.

Diante da infraestrutura hídrica existente e da possibilidade de aumento da disponibilidade de recursos hídricos resultante de diminuição de perdas por evaporação e da melhoria da qualidade da água subterrânea, a operação desses reservatórios no sentido de recargar os aquíferos aluviais apresenta-se como uma opção interessante para o SAB.

### 3 METODOLOGIA

Objetivando entender o impacto da RNGA devido ao despejo do esgoto no solo aluvial e estabelecer uma estratégia que possa mitigar os possíveis impactos e aumentar a oferta hídrica na região, buscou-se uma região que pudesse ser representativa para o SAB.

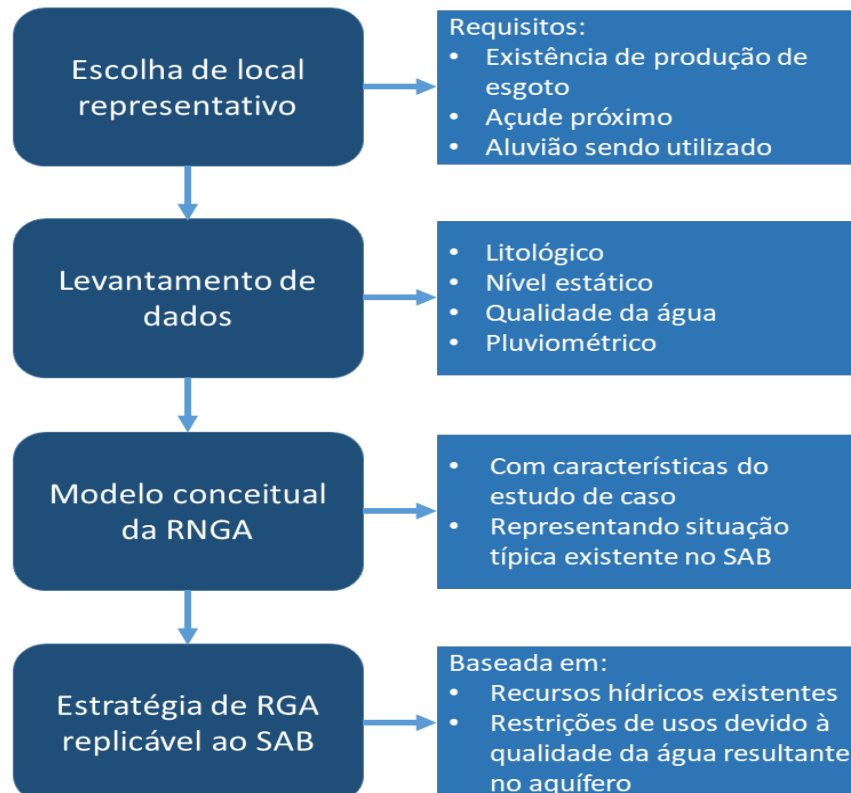
Assim, o município de Sumé foi o escolhido para basear o estudo pelo fato de possuir uma produção de esgoto significativa, um aquífero aluvial que está sendo utilizado para fins de irrigação e um reservatório que pode ser utilizado como fonte de recurso hídrico para alimentar os usos desse sistema.

Foi realizada uma caracterização do comportamento do sistema de recursos hídricos da região em estudo, com levantamento de informações litológicas, de nível estático, da qualidade das águas do sistema, e do regime pluviométrico.

Em seguida, buscou-se estabelecer um modelo conceitual da RNGA, que é representativo também de outras municipalidades do SAB.

De posse dessas informações, estabeleceu-se uma estratégia de RGA que permita a gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos existente no SAB. O Fluxograma metodológico é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma metodológico



Fonte: Autor, 2018



### 3.1 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA

A proposta de implementação de um sistema de RGA necessita de um profundo conhecimento das condições existentes, razão pela qual se buscou investigar a geologia e aspectos relacionados à qualidade e à quantidade da água no aquífero e das possíveis fontes de recarga.

A caracterização geológica foi realizada a partir de 117 sondagens intrusivas (ATECEL, 1999; BRAMAR, 2017). Além da composição do solo, buscou-se conhecer a espessura da camada de sedimentos não consolidados para melhor entender a capacidade de armazenamento e condições de fluxo de água no aquífero e identificar regiões com potencial para instalar sistemas de RGA.

### 3.2 MONITORAMENTO DO NÍVEL ESTÁTICO

O nível estático é dado pela profundidade da água do poço em relação a superfície do terreno. A leitura do nível da água foi realizada a partir da chamada “boca do poço”, em um ponto específico, como mostra a Figura 7 onde foi medida sua distância até o solo para que essa distância seja descontada no cálculo do nível estático. Todos os poços foram georeferenciados utilizando GPS geodésico. A frequência do monitoramento foi quinzenal.

Figura 7: Poço em que é realizado o monitoramento do nível estático com marcação do local onde deve ser realizada a leitura do nível da água



Fonte: Autor, 2018

A frequência de monitoramento do nível estático foi de 15 dias, em cerca de 40 poços, tendo sido iniciada em abril de 2015 e finalizada em outubro de 2017, realizada por alunos

voluntários do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande (CDSS/UFCG), Campus Sumé, localizado próximo ao aquífero aluvial.

### 3.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Para a caracterização qualitativa, foram realizadas coletas de água em três diferentes fontes: nove poços do aquífero, efluente da ETE e o Açude Sumé. A caracterização dessas três diferentes reservas hídricas é fundamental para entender o impacto das possíveis recargas em termos da qualidade final resultante no aquífero. Os parâmetros analisados foram cloreto, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e coliformes termotolerantes

O íon cloreto foi escolhido como traçador para indicar presença do esgoto por suas propriedades conservativas e por estar presente no esgoto visto que essa contaminação foi o principal problema ambiental detectado por Salgado (2016) para a área de estudo.

Esse parâmetro foi monitorado em todos os nove poços e o efluente da ETE. Já as análises das espécies do nitrogênio e dos coliformes termotolerantes foram feitas apenas no poço que Salgado (2016) indicou com maior de cloreto, e do efluente da ETE, objetivando a comparação dos dois tipos de tratamento de esgoto, TSA e lagoas de estabilização.

As análises de qualidade da água do aquífero foram coletadas em nove dos cerca de 40 poços em que ocorria o monitoramento do nível estático, além do efluente tratado da ETE e do açude Sumé. Essas análises foram realizadas pelo laboratório de Qualidade da Água, também do CDSS/UFCG, buscando possuir frequência mensal, iniciada em maio de 2016 e se estendendo até outubro de 2017. Problemas operacionais reduziram a quantidade de dados dos poços para quantidades entre 9 e 12 análises.

### 3.4 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Os dados pluviométricos foram obtidos a partir da média aritmética da estação climatológica instalada no CDSS/UFCG e da estação pluviométrica da AESA instalada na cidade de Sumé-PB.

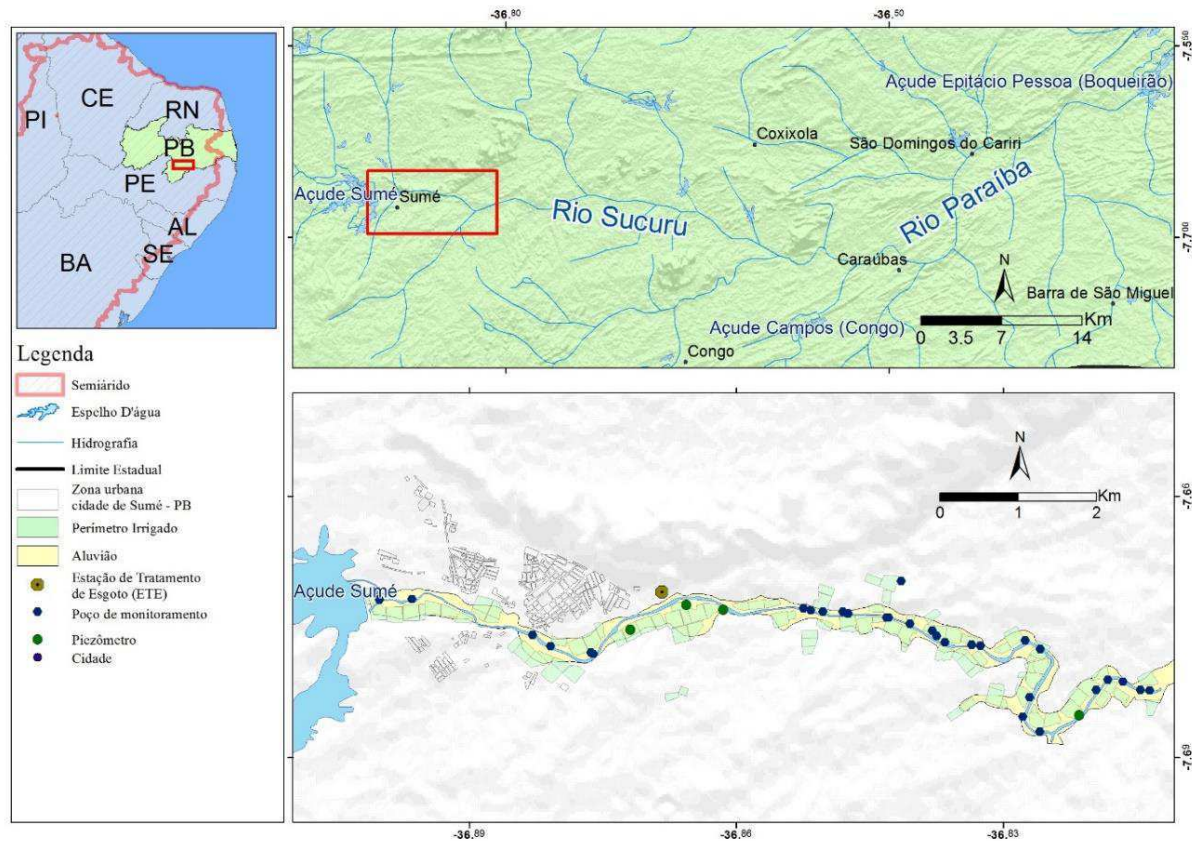
### 3.5 ÁREA DE ESTUDO

O sistema de recursos hídricos estudado é composto por um rio intermitente, o rio Sucuru, sob o qual se forma o aquífero aluvial estudado, estando situado na bacia hidrográfica do rio Paraíba e completamente inserido na região do semiárido brasileiro, como mostra a

Figura 8. A extensão da área estudada é de aproximadamente 12 km, trecho compreendido de jusante do Açude Sumé, construído pelo DNOCS na década de 1950, até o limite do Perímetro Irrigado Sumé, estabelecido pelo mesmo órgão federal na década de 1960.

O sistema de abastecimento da cidade de Sumé utiliza majoritariamente as águas do açude Cordeiro, com capacidade de armazenamento de 70 hm<sup>3</sup>, deixando a cargo do açude Sumé, que possui capacidade de armazenamento de 44 hm<sup>3</sup>, apenas 25% das demandas associadas para usos prioritários como abastecimento urbano e rural e dessedentação animal, e o restante para irrigação (ANA, 2017b). Apesar disso, em situações emergenciais esse último açude pode atender a cidade, contando também com recente reforço de águas advindas do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) para tais situações.

Figura 8: Localização da área de estudo.



Fonte: Autor, 2018

Apesar da alta demanda para irrigação associada ao açude, especialmente para destinada ao Perímetro Irrigado, seu atendimento, que inicialmente ocorria a partir de liberação de águas do reservatório para alimentar um sistema de canais que as levavam até os lotes dos

agricultores, foi interrompida devido à falta de manejo do reservatório e dos próprios canais, prejudicando os irrigantes (VIEIRA, 2002), que passaram a explorar o aquífero aluvial.

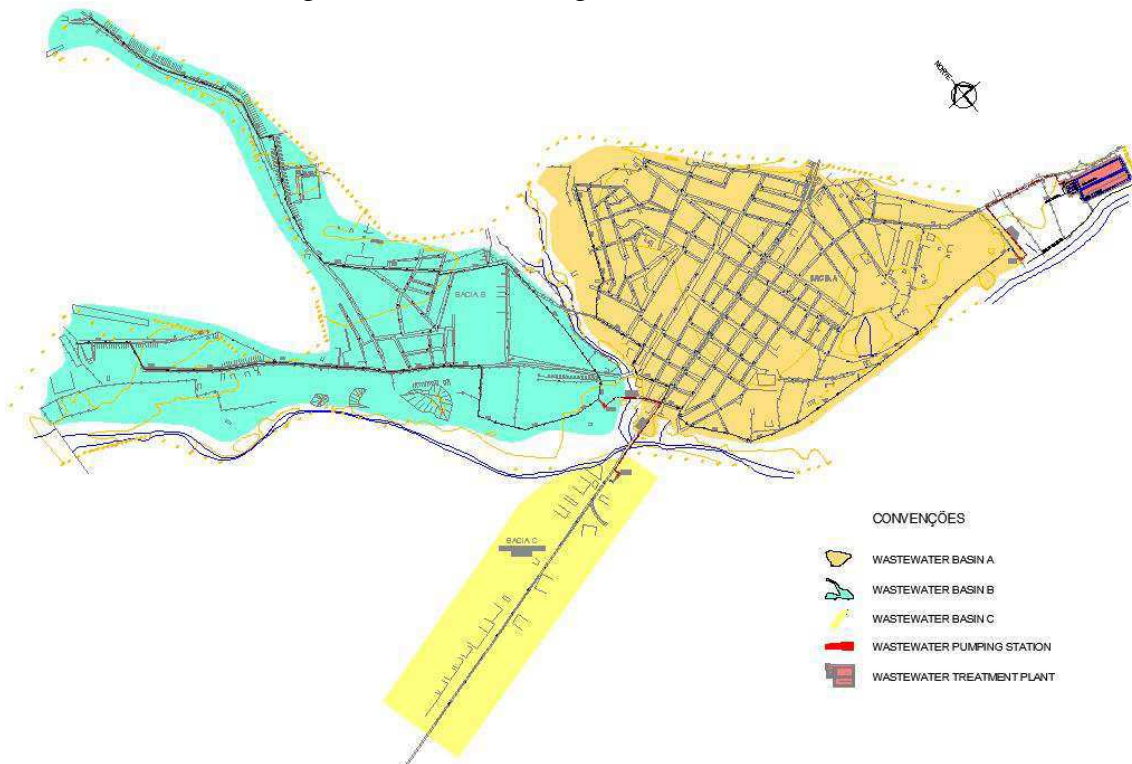
De acordo com Dillon et al. (2009), existem tipicamente três estágios de desenvolvimento da irrigação abastecida por águas subterrâneas: (i) quando os primeiros poços são instalados na área, a recarga natural do ciclo anual pode compensar as retiradas e o declínio na descarga do aquífero não é observada; (ii) o aumento na produção faz com que outros irrigantes passem a instalar poços e eventualmente o aumento da exploração o torna equivalente à recarga; (iii) quando se continua aumentando a retirada de água do aquífero, de modo a ocorrer a superexploração. Nesse último ponto, a produção agrícola deve declinar até não mais que aquela apresentada no estágio II. No caso em análise, acredita-se que a região de Sumé já tenha atingido o terceiro estágio, uma vez que já não suporta a capacidade de irrigação apresentada em anos anteriores. Assim, um adequado manejo do sistema deve reverter o terceiro estágio, a fim de promover o desenvolvimento sustentável da região.

Além dos problemas de superexploração, ainda existe uma situação de RNGA por parte do esgoto doméstico da cidade de Sumé, gerado por uma população de pouco mais de 16.000 habitantes (IBGE, 2017), que vem alimentando o aquífero. A cidade conta com uma ETE do tipo lagoas de estabilização, composta por uma lagoa anaeróbica seguida de lagoa facultativa.

O sistema de coleta e tratamento do esgoto da cidade de Sumé, apresentado na Figura 9, teve a primeira parte da Bacia A finalizada em 2015, dando início ao funcionamento da ETE. Atualmente, a Bacia A está praticamente finalizada e a maior parte da Bacia B também, no entanto, devido a inexistência das Estações de Bombeamento, apenas cerca de 22% do esgoto produzido na cidade é conduzido para a ETE para ser tratado (SALGADO, 2016).

A ETE, Figura 10, foi projetada para uma vazão média de 17L/s (CAGEPA, 2002), porém o sistema de coleta do esgoto urbano ainda está em expansão, de modo que a ETE opera com folga. Continuamente, são gerados 13L/s de esgoto doméstico na cidade de Sumé (ANA, 2017a), dentre os quais, apenas cerca de 3L/s são tratados. O efluente bruto é despejado sobre o leito do riacho Pedra Comprida, afluente do rio Sucuru, e o tratado sobre o rio Sucuru. Como ambos são intermitentes durante a maior parte do ano, esse esgoto é despejado diretamente no solo aluvial.

Figura 9: Sistema de esgotamento sanitário de Sumé



Fonte: CAGEPA, 2002

Figura 10: ETE da cidade de Sumé



Fonte: BRAMAR, 2017

Em virtude das condições ambientais apresentadas, notou-se que a cidade de Sumé tem potencial para ser analisada como base para formulação de estratégia de gestão dos recursos hídricos na região do SAB.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS AMOSTRADAS DA ÁREA DE ESTUDO

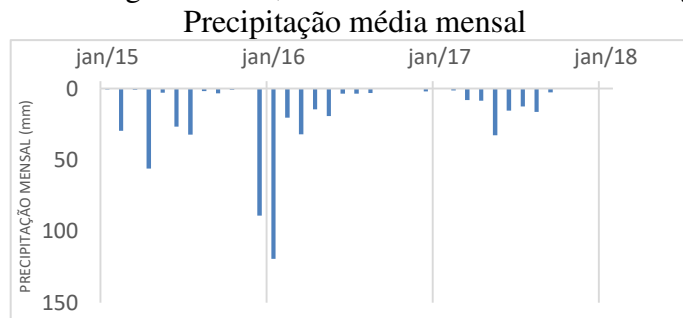
#### 4.1.1 Hidrogeologia do aquífero aluvial de Sumé

A hidrogeologia do aquífero aluvial de Sumé pode ser considerada representativa de aquíferos aluviais do SAB. Suas pequenas dimensões, largura variando entre 100m e 350m e profundidade variando entre 0,5m a até 11m, também são encontradas em outros sistemas da região (BURTE, 2008. MONTENEGRO E MONTENEGRO, 2006). Geralmente, a espessura do pacote aluvial é maior próxima ao leito do rio, decaindo nas margens laterais até atingir as rochas cristalinas, formando os chamados terraços aluviais.

As sondagens, além de indicarem a espessura do aquífero, também mostraram a grande heterogeneidade litológica na região, com composição majoritária de areia, o que facilita a recarga e o fluxo subterrâneo, ainda que tenham sido detectadas lentes de argila. A partir de testes de bombeamento, foram estimados a condutividade hidráulica em  $7,87 \times 10^{-4}$  m/s e a porosidade eficaz em 10% (VIEIRA, 2002). Essa heterogeneidade e a presença de grãos de pequeno diâmetro podem influenciar no fluxo subterrâneo dos aluviões, dificultando simulações de seu comportamento (TSUYUGUCHI et al., 2017).

#### 4.1.2 Comportamento do aquífero com relação ao nível do lençol freático

O comportamento do nível lençol freático ao longo do período analisado mostrou que existe uma recarga considerável com a precipitação, mesmo em um ano de seca hidrológica quando comparado com a climatologia do local, como foi o ano de 2016. As Figura 11 e Figura 11:



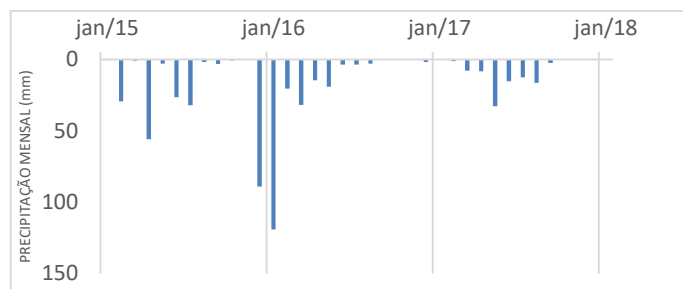
Fonte: Autor, 2018

Figura 12 mostra essa influência da precipitação na recarga do aquífero.

Apesar da baixa precipitação anual entre os anos de 2015 e 2016, com totais anuais abaixo dos 250 mm, os meses de dezembro de 2015 e janeiro de 2016 concentraram 208 mm

de chuva, sendo suficientes para realizar a quase total recarga do aquífero, diante da fácil infiltração decorrente da litologia da região.

No entanto, evento semelhante não se repetiu no ano de 2017, que teve volumes precipitados ainda menores, implicando em redução significativa do nível freático ao ponto de secar quatorze dos poços monitorados até o fim de 2017. Esses poços secos, no entanto, não indicam que o aquífero está completamente vazio em suas regiões, uma vez que a maioria deles são parcialmente penetrantes. A precipitação média mensal dos postos pluviométricos da AESA e da UFCG localizados na cidade de Sumé podem ser vistos na Figura 11, já a variação dos níveis estáticos, na Figura 11: Precipitação média mensal



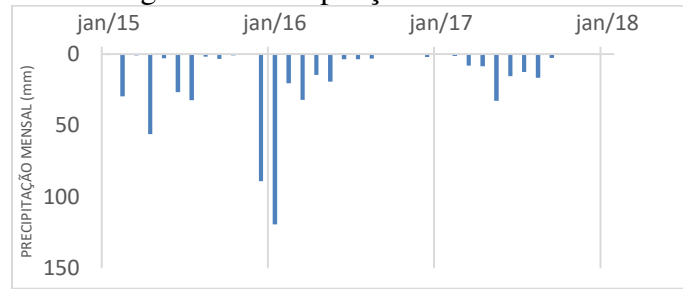
Fonte: Autor, 2018

Figura 12.

Essas fortes variações interanuais, com rebaixamento mais significativo nas regiões afastadas do perímetro urbano, indicam tendência de superexploração do aquífero aluvial. Essa situação pode ser contornada com uma efetiva gestão dos limites de captação de água, assim como, pelo incremento da oferta a partir de sistema de RGA.

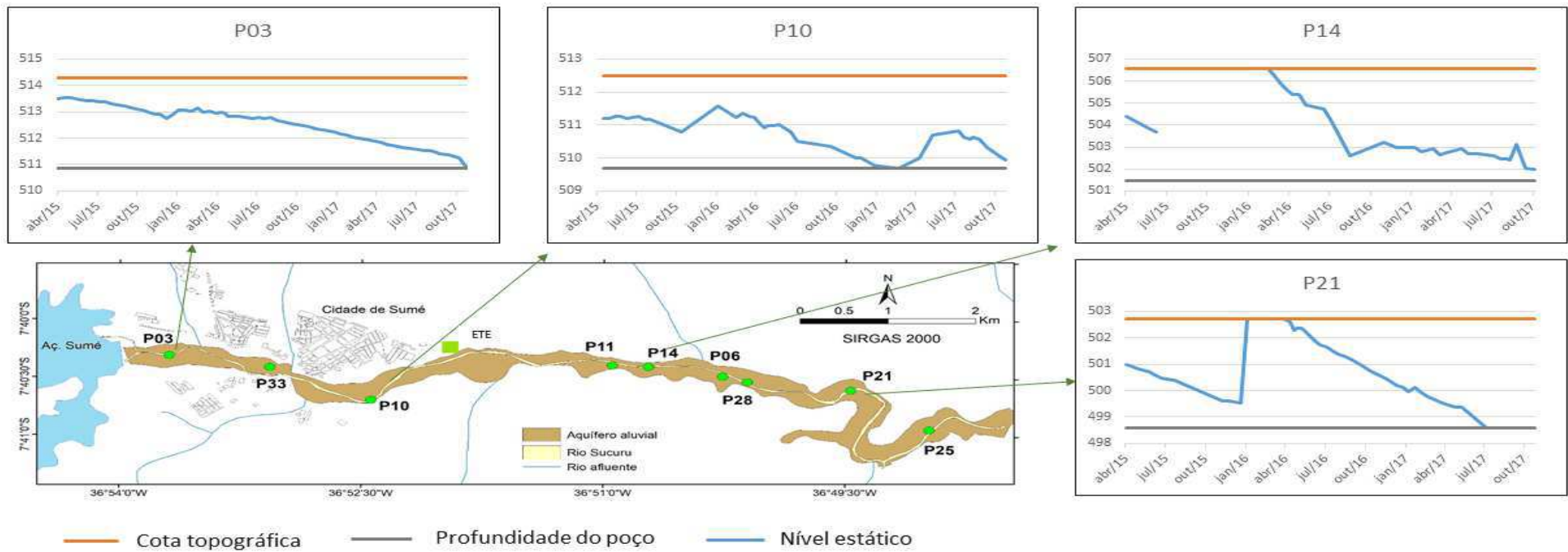
O conhecimento da dinâmica de recarga, circulação e descarga, cuja compreensão inicia-se através da observação dos níveis do lençol freático monitorado na área de estudo pelo projeto BRAMAR, no qual este estudo está inserido, é de fundamental importância à tomada de decisão e operação de um possível sistema de RGA.

Figura 11: Precipitação média mensal



Fonte: Autor, 2018

Figura 12: Variação do nível estático dos poços ao longo do aquífero



Fonte: Autor, 2018



### 4.1.3 Análises qualitativas dos recursos hídricos

A qualidade da água subterrânea foi analisada em nove poços. O Cloreto foi o parâmetro escolhido para ser monitorado, pois pode indicar presença de contaminação por esgoto e de salinização das águas. Além disso, os sistemas RGA/TSA não são capazes de remover esses íons por eles estarem dissolvidos e possuírem baixa capacidade de adsorção e reatividade (SHARMA e KENNEDY, 2016).

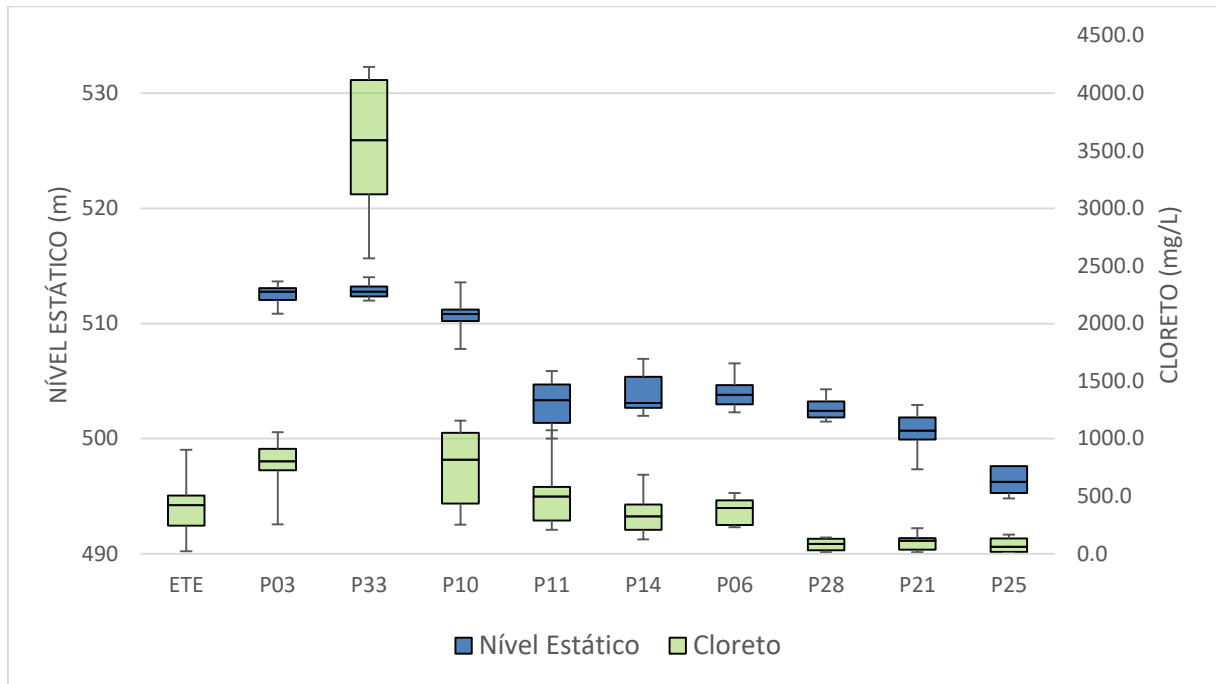
Desses nove poços, apenas dois estão tampados, ou seja, a grande maioria não possui uma barreira sanitária que possa diminuir a contaminação pontual, com a introdução de baldes contaminados para coletar água, por exemplo. Mais detalhes sobre os nove poços podem ser vistos no Apêndice 1.

Compilando as informações do monitoramento do nível estático e as análises de cloreto ao longo do período de monitoramento, Figura 13, foi possível perceber que o poço P33 é o poço de menor variação do nível estático, devido a RNGA contínua exercida pela infiltração do efluente bruto, além de seu impacto na concentração do cloreto na região.

Outra informação importante obtida pelo gráfico foi a melhoria significativa das concentrações desse parâmetro ao longo do aquífero, no sentido do fluxo subterrâneo, conforme havia sido detectado por Salgado (2016). Verificou-se ainda uma variação da amplitude dos resultados nas regiões que sofrem maior influência do lançamento do efluente, destacando-se o poço P33, em comparação com aquelas mais distantes das fontes de poluição. Essa variação pode ser explicada pela menor concentração desse parâmetro na água da chuva, que, ao recarregar o aquífero, produz significativa alteração no estado da água subterrânea.

O poço P03 se localiza antes da entrada do efluente bruto, porém por já se encontrar no perímetro urbano, já possui uma concentração considerável de cloreto. O poço P33 está situado na zona de influência da entrada do efluente bruto e possui os maiores níveis de contaminação. Os poços P10, P11 e P14 seguem, linearmente, o sentido do fluxo no aquífero e sentem os efeitos do tratamento do sistema solo-aquífero. Já os poços P06, P28, P21 e P25 se mostram com qualidades bem superiores aos anteriores.

Figura 13: Variação do nível estático e dos valores de cloreto nos poços de monitoramento ao longo do aquífero e no efluente da ETE



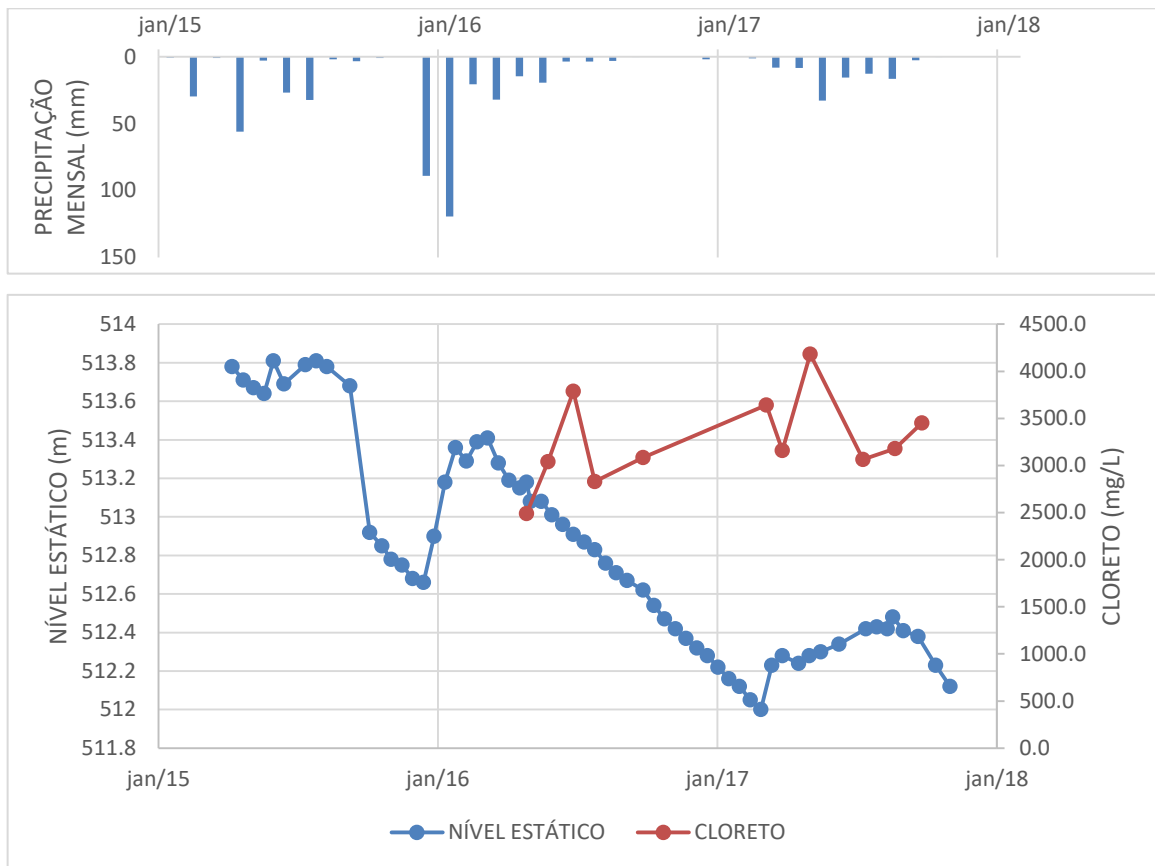
Fonte: Autor, 2018

Os principais mecanismos de remoção de contaminantes durante a passagem pelo solo são a filtração, biodegradação e a adsorção, sendo capazes de remover diferentes contaminantes como sólidos suspensos, patógenos, matéria orgânica biodegradável, nutrientes e micropoluentes orgânicos (SHARMA et al., 2011; SHARMA e KENNEDY, 2016). No entanto, os processos de remoção apontados acima não explicariam a atenuação nas concentrações de cloreto apresentadas, considerando que este íon não se degrada nem adsorve no seu percurso pelo aquífero. Tal atenuação pode ser devida ao fenômeno de dispersão hidrodinâmica envolvido no transporte de soluto nas águas subterrâneas, assim como pela própria diluição com as águas do aquífero.

A variabilidade da concentração de cloreto no poço P33 ao longo do período de monitoramento é apresentada na Figura 14. Percebe-se indícios de que a recarga natural provocada pela precipitação no início do ano de 2016 produziu uma diminuição das suas concentrações, que aumentaram com a diminuição do nível do lençol freático ao longo do ano de 2017, sem a ocorrência de novos eventos significativos de recarga.

Essa relação inversamente proporcional entre a quantidade de água existente no aquífero e sua respectiva qualidade indica a importância de estratégias de RGA para manter, de maneira intencional, o nível estático.

Figura 14: Variabilidade do cloreto em relação ao nível do aquífero e aos eventos de precipitação no poço P33



Fonte: Autor, 2018

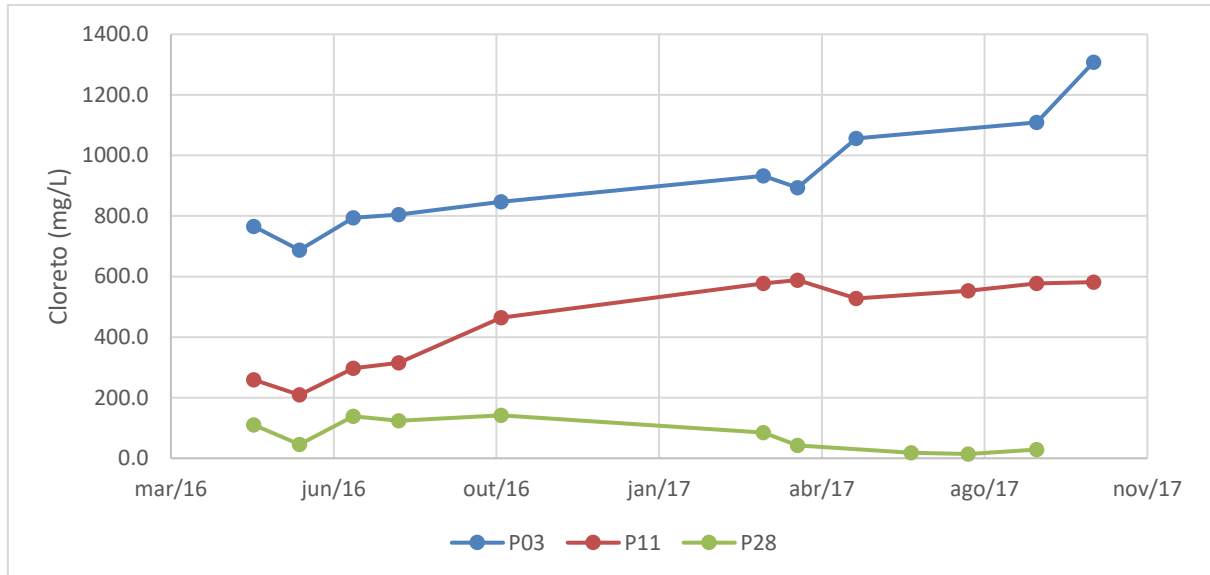
Alguns poços não apresentam comportamento de aumento da concentração com diminuição do nível estático tão linear como o poço P33, exemplo é o poço P25, que está situado próximo de comunidades rurais que despejam seus esgotos novamente no leito seco do rio Sucuru. Os gráficos dos nove poços monitorados, apresentando a variação do nível e da concentração de cloreto podem ser vistos no Apêndice 2.

A Figura 15 complementa a análise feita anteriormente ao mostrar temporalmente os valores de cloreto para poços situados em três regiões distintas: (i) P03, localizado na região urbana antes da entrada do efluente; (ii) P11, poço localizado fora do perímetro urbano mas ainda sob os efeitos provocados pela introdução do efluente bruto e (iii), P28, poço mais distante da entrada do contaminante, que dá indícios de estabilidade da qualidade.

Após recarga ocorrida no início de 2016, o aquífero foi secando ao longo do período de monitoramento. Como não ocorreu recarga significativa devida a precipitação, a única recarga possível era advinda do esgoto, e, com isso, os poços mais próximos da zona urbana apresentaram maior elevação dos níveis de cloreto que os mais afastados. Dessa forma, como

no poço P28 não quase não ocorre variação de sua concentração, o aquífero já tenha diluído o esgoto a tal ponto que pode-se considerar a qualidade da água nesse poço como a mais próxima das características naturais da água subterrânea na região.

Figura 15: Série temporal do cloreto para poços distribuídos ao longo do aquífero



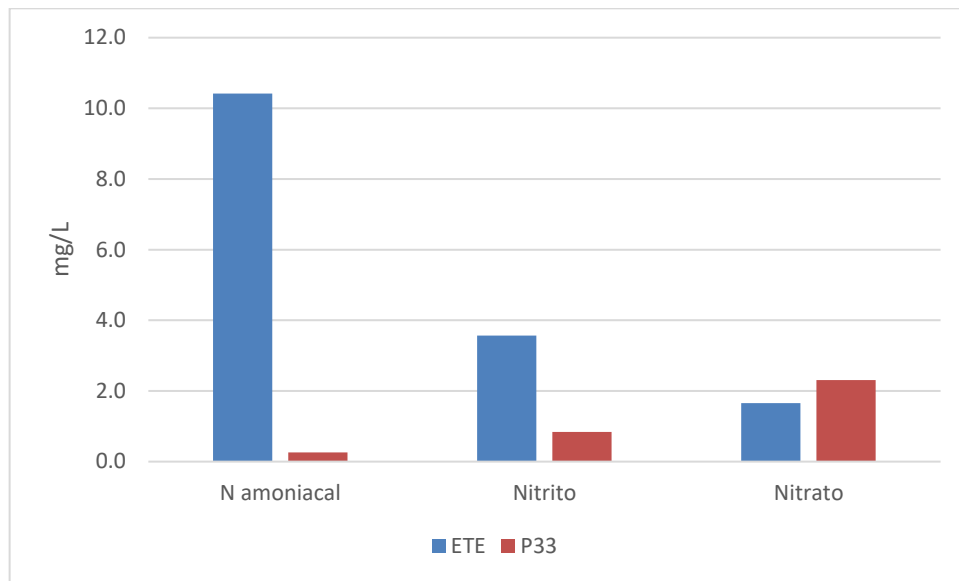
Fonte: Autor, 2018

Conhecendo o impacto da infiltração do esgoto bruto no poço P33 em termos de concentração de cloreto e buscando verificar melhoria da qualidade resultante dessa recarga pelos processos de interação com o solo e as águas do aquífero, comparou-se os resultados das análises de nitrogênio e de coliformes termotolerantes para esse poço e o efluente da ETE.

Conforme pode ser visto na Figura 16, o nitrogênio amoniacal e o nitrito foram significativamente inferiores no Poço P33, enquanto os valores de nitrato foram maiores, o que é esperado devido à pouca formação dessa espécie do nitrogênio durante o tratamento por lagoas de estabilização. Quanto às análises de coliformes termotolerantes, observou-se uma redução de 65% entre os valores encontrados no efluente da ETE e os do poço em questão.

Tais resultados podem indicar a capacidade do aquífero em realizar TSA, uma vez que a qualidade resultante foi até melhor que as apresentadas pelo sistema de tratamento empregado na região para os parâmetros analisados, apesar de existirem diversos fatores que afetam a eficiência do sistema, tais como reações de oxirredução, oxigênio dissolvido, temperatura, aspectos litológicos e hidráulicos (SHARMA et al., 2011; ABEL, 2014; SIDHU et al., 2015; SHARMA e KENNEDY, 2016).

Figura 16: Comparação entre eficiência do tratamento do SSA e da ETE para espécies do nitrogênio



Fonte: Autor, 2018

Com a análise dos dados apresentadas acima, pode-se perceber que o aquífero possui a capacidade de diminuir a influência do esgoto na qualidade da água resultante, no entanto, o total descontrolo dessa interação provocou uma concentração muito elevada de cloreto, que pode restringir o uso de tal recurso para os devidos fins.

#### 4.2 RECARGA NÃO GERENCIADA DO AQUÍFERO (RNGA)

Diante da análise dos dados hidrogeológicos e quali-quantitativos apresentada, é possível perceber que são produzidos impactos negativos no sistema do aquífero estudado, caracterizando o presente cenário de RNGA. Apesar do alto potencial quantitativo de recarga de esgoto produzido pela população de Sumé, a falta de manejo correto contribui para essa degradação.

O efluente bruto despejado sobre o aluvião ao longo dos anos fez com que ocorresse um acúmulo significativo de cloreto nas imediações onde o esgoto se acumula e infiltra. Ainda assim, baixa contaminação por nutrientes e de bactérias foram observadas em poço próximo. O efluente tratado, por sua vez, passa por sistema de lagoas de estabilização, resultando em significativa redução da concentração de material orgânico e de sólidos em suspensão (VON SPERLING, 2005). Esse tratamento prévio é ideal para a operação do sistema de RGA, uma

vez que evitará a ocorrência de colmatção nas unidades de infiltração. No entanto, não irá diminuir o aumento da concentração de sais resultante da infiltração de esgoto no aquífero.

Além disso, em Sumé, assim como em diversos outros municípios do SAB, o maior desafio da implantação do sistema de esgotamento sanitário não reside na estação de tratamento, que podem ser implantadas e operadas a baixos custos e com boa eficiência diante da alta disponibilidade de terreno e da abundância da incidência do sol na região. A dificuldade maior encontra-se no transporte do esgoto até a ETE, que, para o SAB, necessita de investimento até três vezes superiores àqueles destinados ao tratamento (ANA, 2017a). Sendo assim, a estratégia de RGA a ser proposta para a região deve considerar essa dificuldade financeira de implementação dos sistemas de coleta, como também, o impacto da introdução de sais decorrente da infiltração do esgoto, tratado ou não, em um único local.

A percepção de como essa RNGA é significativa para a região é demonstrada a partir de fotografias retiradas no mesmo dia, uma mostrando uma paisagem típica do leito seco do rio Sucuru, Figura 17, e outra mostrando uma zona de acumulação formada pela deposição de grande parte do esgoto bruto, Figura 18.

Figura 17: Imagem típica do leito do rio Sucuru seco



Fonte: BRAMAR, 2017

Figura 18: Riacho Pedra Comprida em época de estiagem. Toda área alagada é formada pelo esgoto doméstico bruto



Fonte: BRAMAR, 2017

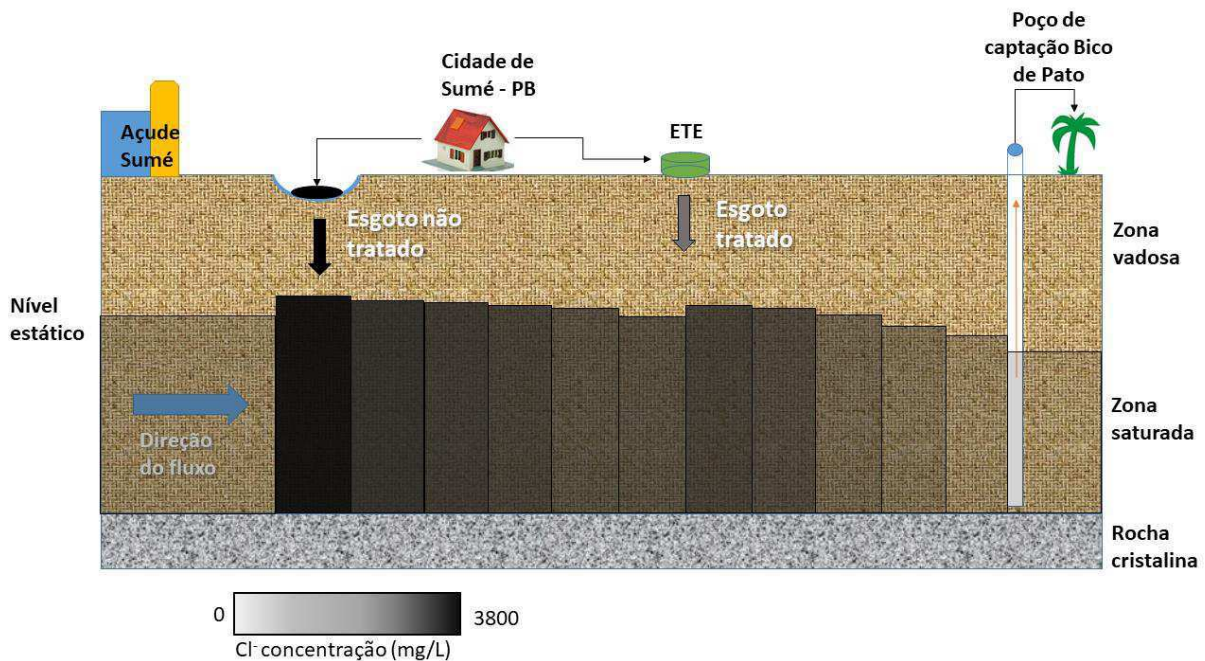
A liberação de águas do Açude Sumé com o intuito de recarregar o aquífero aluvial já ocorreu antes. Esta prática esbarra em barreiras institucionais e de governança, envolvidas no processo de permissão e nos conflitos existentes pelo uso desse recurso e requer análises

técnicas de alocação das águas para mitigar tais conflitos. A operação desta descarga é um desafio que exige o planejamento da quantidade a ser liberada a partir da observação das demandas e processos físicos envolvidos, de modo a evitar o desperdício de água, o que é dificultado pela falta de informações e de comunicação entre os órgãos gestores e os usuários.

Exemplo desse árduo processo foi percebido durante o período de realização desse estudo, quando a região vivia uma seca que já perdurava seis anos, tendo sido iniciada em 2012. Apesar dos impactos na quantidade e qualidade das águas subterrâneas decorrentes desta seca e do novo fornecimento de água para abastecimento da cidade por meio de obra de transposição de bacias através do Projeto de Integração do Rio São Francisco, que retirava tal demanda do Açude Sumé, a solicitação dos irrigantes para liberação dessas águas para fins de recarga do aquífero foi negada pela ANA, órgão gestor desse reservatório.

Diante do exposto, a Figura 19 mostra o modelo conceitual esquemático da região estudada, indicando a existência das fontes de recarga por esgoto, tanto bruto quanto tratado, e a extração das águas para uso na irrigação. A carga de sais inserida no sistema, dada pelo produto da vazão com a concentração, é maior na região de deposição do efluente bruto que naquela relacionada com o esgoto tratado devido à ineficiência do esgotamento sanitário, implicando em maior impacto no aquífero nessa região.

Figura 19: Modelo conceitual esquemático representando a área de estudo



Fonte: Autor, 2018

Os valores de concentração de cloreto foram baseados no comportamento observado através das análises de qualidade realizadas na região. A captação de água para irrigação, representada por um único poço no esquema ilustrativo, ocorre, na realidade, ao longo de todo o trecho estudado, desde regiões mais próximas das áreas com maior influência da RNGA, até regiões mais afastadas.

Considerando os resultados das análises de qualidade apresentadas e o inevitável despejo do esgoto no leito aluvial, condição intrínseca de regiões semiáridas com intermitência de rios, o modelo conceitual de RNGA apresentado não deve ser entendido como um problema a ser evitado, e sim como uma fonte de recurso hídrico a ser considerada. A utilização do esgoto tratado como medida de RGA poderia gerar rejeição por parte da população. No entanto, o cenário de escassez de água e a já existente RNGA poderão contribuir para que o sistema proposto seja aceito.

### 4.3 RECARGA GERENCIADA

Com base no conhecimento adquirido pela extensiva caracterização da área, a estratégia de RGA proposta é baseada na gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, levando em consideração aspectos quantitativos e qualitativos.

Assim, foram estabelecidas as seguintes medidas: (i) infiltração do esgoto tratado a nível secundário; (ii) infiltração do esgoto tratado a nível primário; (iii) liberação das águas do açude; (iv) bacias de percolação para incrementar a recarga do escoamento superficial. As duas primeiras atuam no aproveitamento quantitativo do esgoto e em seu reuso, essencial em regiões de escassez hídrica. As duas últimas atuam no sentido tanto quantitativo quanto qualitativo, uma vez que as águas a serem introduzidas no aquífero possuem melhor qualidade, além de evitar perdas por evaporação das águas armazenadas superficialmente, contribuindo, conseqüentemente, para aumento da disponibilidade hídrica para a região.

#### 4.3.1 RGA utilizando esgoto como fonte

A primeira medida de recarga atua na infiltração do esgoto previamente tratado pela ETE. Para promover sua recarga, lagoas de infiltração devem ser construídas, aproveitando que não existe restrição física de espaço nessa região, já que é afastada do centro urbano. O excedente do esgoto tratado que não conseguir ser infiltrado poderá ser canalizado para ser

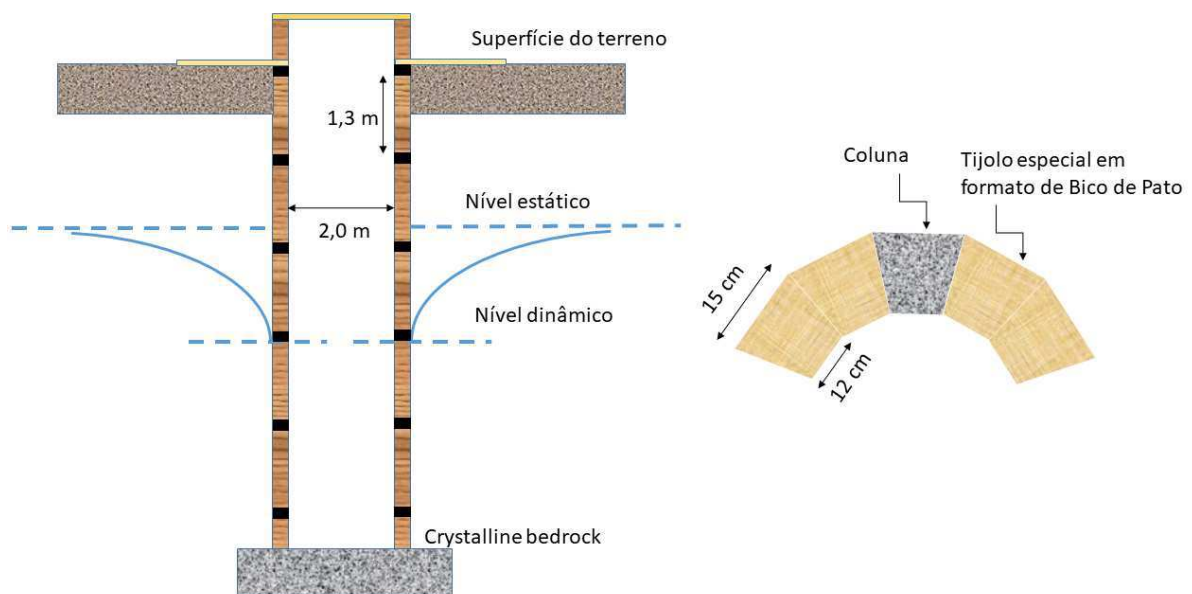


infiltrado em local propício, à jusante da estação de tratamento, utilizando o poço do tipo Bico de Pato.

O poço Bico de Pato foi desenvolvido considerando as características locais do aquífero e aspectos sociais para aumentar a sua produção (REGO et al., 2014) e é apresentado na Figura 20. Os tipos de tijolos e suas dimensões foram escolhidas para permitir o fluxo de água por toda a extensão das paredes do poço. Como não existe argamassa entre os tijolos, a cada 1,2 m elementos estruturais são colocados, assim como três colunas verticais para suportar a estrutura. Essas características provam que ele também é hidráulicamente vantajoso para ser usado como poço de injeção.

A segunda medida foi planejada baseada na dificuldade que diversos municípios do SAB possuem em implementar seus sistemas de coleta de esgoto e na capacidade de melhoria da qualidade da água por sua passagem pelo solo. Para fornecer um sistema energeticamente eficiente, nos exutórios das bacias de drenagem, locais onde deveriam existir estações elevatórias de esgoto, sugere-se instalar pequenas estações de tratamento primário seguidas por sistemas de RGA/TSA, novamente utilizando poços Bico de Pato. Esse poço é mais interessante que a utilização de bacias de infiltração devido à restrição de espaço físico, uma vez que esses sistemas RGA estarão situados dentro do perímetro urbano. A utilização do poço Bico de Pato para injetar esgoto no aquífero se enquadra na categoria ASTR, uma vez permite trânsito do líquido injetado no interior do aquífero para ser captado em outro poço.

Figura 20: Poço Bico de Pato em representação esquemática.



Fonte: Adaptado de (REGO et al., 2014)

A recarga utilizando efluente primário é aplicável, especialmente em países em desenvolvimento, conforme visto por Abel (2014). Sharma e Kennedy (2016), ao analisar as eficiências de remoção de diferentes poluentes em várias fontes de literatura e compará-las em relação ao nível de tratamento prévio, mostraram que existe pouca diferença entre os resultados encontrados para os esgotos tratados a níveis primário, secundário e terciário.

Apesar da operação ser facilitada com a melhor qualidade da fonte influente, essa proposta de utilizar apenas o tratamento primário como tratamento prévio possui relevância do ponto de vista financeiro, social e ambiental, especialmente como medida de curto prazo diante da capacidade tampão do solo. Tal medida promoveria a infiltração descentralizada do esgoto, que, além de facilitar o processo de diluição com a mistura com as águas subterrâneas, ainda amplia o número de usuários beneficiados pela recarga, favorecendo diferentes regiões ao longo do aquífero aluvial.

A localização desses poços deve ser definida a partir de sondagens que encontrem profundidades do aquífero elevadas. Sharma e Kennedy (2016) definem como inviável a localização de sistemas TSA com profundidade da zona vadosa inferior a 5m. No entanto, as características locais de aquífero raso não permitem a existência de camada não saturada tão profunda, impossibilitando a operação da RGA para tal profundidade. Além disso, a região deve ser sinalizada e cercada para evitar furto de esgoto diante da elevada necessidade hídrica na região.

Uma análise do poço que recebe maior influência da infiltração do esgoto pode apontar respostas para essa questão da profundidade. O poço P33, além de ser o que apresenta maiores concentrações de cloreto, também é o de menor variação do nível estático ao longo do período de monitoramento, justamente devido à recarga não gerenciada constante, e apresentou uma zona vadosa média para o período cheio com espessura de 3m. Como há uma indicação de melhoria da qualidade da água resultante após passagem por essa região, o estabelecimento de um limite mínimo de 3 metros de zona vadosa mostra-se coerente para permitir seu efetivo tratamento.

#### **4.3.2 RGA utilizando recursos hídricos superficiais como fonte**

A terceira medida, recarga com água liberada pela barragem, será realizada utilizando também o poço bico de pato. O volume de água a ser liberado deve considerar uma restrição, comentada acima, de existência mínima de 3m para a zona vadosa. Essa restrição, além de

garantir o tratamento do esgoto infiltrado, também evita perdas por evapotranspiração e consequente salinização decorrente da ocorrência de franja capilar.

Sua operação dependerá da quantidade e qualidade da água existente no aquífero e deverá ser executada após o período chuvoso, conforme proposto por Billib et al (1991), a fim de garantir a recarga natural com a água da chuva, que possui qualidade superior à do açude. A interrupção dessa recarga deve ocorrer até um mês antes do início das chuvas para que ocorra rebaixamento do lençol freático, permitindo o incremento das recargas naturais.

As bacias de percolação, que constituem a quarta medida proposta, deverão ser construídas preferencialmente à montante das regiões com sistemas de recarga de esgoto, a fim de assegurar maior infiltração da precipitação e lixiviação dos sais ali acumulados. Cuidados especiais na construção dessas trincheiras devem ser tomados para assegurar que a região possua pouca incidência das lentes de argila, conforme verificado nas sondagens na região, pois isso restringiria a taxa de infiltração, provocando maior acúmulo superficial e consequentemente perdas por evaporação e salinização do solo.

### 4.3.3 Discussão

A estratégia de RGA utilizando os recursos hídricos existentes visa aumentar a oferta de recursos hídricos para a região. Um resumo das principais características das medidas propostas, assim como dos impactos de sua implementação, pode ser visualizado na Quadro 1.

Quadro 1: Estratégia de RGA proposta para o caso Sumé

<b>Medida</b>	<b>Esgoto tratado (nível secundário)</b>	<b>Esgoto tratado (nível primário)</b>	<b>Liberção de águas do açude Sumé</b>	<b>Bacias de percolação</b>
Função	Possibilitar reuso de águas servidas	Possibilitar reuso de águas servidas	Diluição da concentração de sais	Incrementar a recarga do aquífero
Aspecto	Controlar a recarga de esgoto para o aquífero	Diminuir custos de implantação de sistema de coleta de esgoto	Diminuição das perdas por evaporação	Melhoria da qualidade da água do aquífero

Consequência	Aumento da disponibilidade de recursos hídricos	Aumento da disponibilidade de recursos hídricos	Aumento da disponibilidade de recursos hídricos e melhoria da qualidade	Aumento da disponibilidade de recursos hídricos e melhoria da qualidade
Desafio	Aumentar responsabilidade da concessionária responsável pelo tratamento do esgoto	Operação de sistemas descentralizados	Alocação da água do açude	Considerar usuários a jusante

Fonte: Autor, 2018

As duas primeiras medidas dessa estratégia objetivam possibilitar o reuso das águas servidas. A utilização de esgoto tratado a nível primário pode permitir a redução dos custos de implantação de sistema de coleta de esgoto, já a medida de recarga utilizando o esgoto tratado a nível secundário atinge uma necessidade de controlar seu processo de recarga, que atualmente não existe.

As medidas de infiltração do esgoto, tanto a primeira como a segunda, podem esbarrar na vontade da concessionária responsável pelo seu tratamento, que pode entender o sistema de RGA proposto como aumento de suas responsabilidades e alegar dificuldades operacionais para operar sistemas descentralizados, no caso da primeira medida. No entanto, essas questões podem ser mitigadas caso exista pressão de órgãos como o Ministério Público, agências reguladoras e da sociedade em geral, no sentido de promover o reuso de águas servidas em regiões com elevada demanda hídrica e evitar o descontrole do despejo de esgoto nos leitos secos dos rios.

A função primária da liberação de águas do açude é de diluir a concentração de cloreto nas águas do aquífero, porém, um aspecto dessa ação seria a diminuição das perdas por evaporação das águas armazenadas superficialmente. Porém, conflitos quanto à alocação desse recurso hídrico podem se estabelecer em relação à liberação dessas águas entre os usuários do aquífero aluvial, situados à jusante da barragem, com os usuários localizados à montante, de modo que estudos visando à otimização de tais usos devem ser realizados.

As bacias de percolação devem atuar no incremento da recarga do aquífero e, quando localizadas à montante dos sistemas de recarga de esgoto, podem possibilitar a melhoria da qualidade da água subterrânea naquela região, que, como visto pelos resultados do poço P33, podem ser bem sensíveis à elevação da concentração de cloreto. Apesar disso, tais barramentos podem restringir o escoamento superficial que naturalmente ocorreria na calha do rio, o que pode comprometer a situação hídrica dos usuários mais afastados dos sistemas RGA estabelecidos.

Para comprovar o impacto que a estratégia de uso conjunto das águas do açude com as águas do esgoto pode provocar na qualidade da água subterrânea resultante, análises dessas fontes foram realizadas e seus resultados comprovam a existência de acentuada diferença na concentração de cloreto entre as águas do açude e as do aquífero, de maneira que a recarga utilizando tal fonte poderia atuar na diluição das concentrações de cloreto das águas subterrâneas, como mostra a Tabela 1, segundo a qual o número de amostras variou devido à ocorrência de poços secos e, ainda, a comportamentos anômalos, os quais foram excluídas.

Ademais, apesar das águas do aquífero possuírem concentração média de cloreto foi superior à do efluente da ETE, essa recarga de esgoto ainda consiste em piora da qualidade das águas subterrâneas, uma vez que existem poços com concentrações inferiores a essas, m o P28.

Tabela 1: Concentrações médias de cloreto para as fontes de recursos hídricos existentes na região

<b>Fonte</b>	<b>Nº de Amostras válidas</b>	<b>Concentração Cl<sup>-</sup> (mg/L)</b>
Açude	1	20,7
Aquífero	92	753,5
Efluente da ETE	12	385,8
P33 (poço de maior valor)	11	3.743,5
P28 (poço de menor valor)	10	74,8

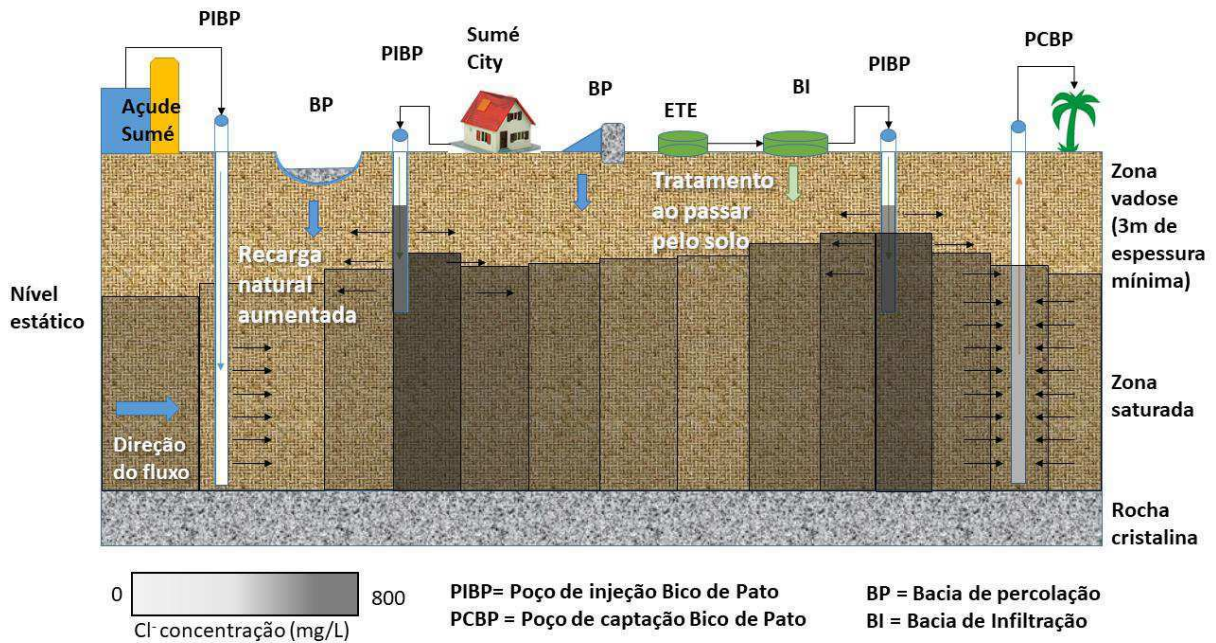
Fonte: Autor, 2018

A Figura 21 apresenta de forma esquemática a estratégia proposta para a realização da RGA no aquífero aluvial de Sumé. As quatro medidas são representadas junto com seus possíveis impactos na qualidade resultante das águas subterrâneas.

Os poços de injeção do esgoto não são completamente penetrantes, de modo a aumentar a passagem do líquido pelo solo e sua consequente melhoria da qualidade da água. Já

o poço destinado à injeção de água do açude, como também os destinados à captação, devem ser completamente penetrantes, visando a aumentar a eficiência hidráulica.

Figura 21: Modelo conceitual de RGA proposta para a área de estudo



Fonte: Autor, 2018

Com a introdução da água do açude de menor concentração de sais, busca-se manter a concentração de cloreto resultante no aquífero não ultrapassando o limite de 800mg/L na região de valores mais elevados para evitar salinização do solo, e um valor médio de 250mg/L, valor máximo permitido para água potável pela Portaria N° 2914/2011, uma vez que essas águas também podem servir para fins de abastecimento humano.

A consequência dessa estratégia de RGA deve ser a elevação dos níveis estáticos do aquífero e sua manutenção ao longo do período de estiagem, além da melhoria da qualidade resultante, promovendo, assim, maior eficiência no uso da água local.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma situação de RNGA devido ao despejo de esgoto doméstico que ocorre tipicamente nos aquíferos aluviais do SAB, os quais, muitas vezes, funcionam como a única fonte de fornecimento hídrico para a região, e buscou, de maneira inovadora, estabelecer um modelo conceitual de gestão integrada dos recursos hídricos disponíveis com o emprego de estratégia de RGA baseada em uso conjunto de águas superficiais com o esgoto.

A partir da análise de um caso representativo, localizado no município de Sumé-PB, notou-se a tendência de haver superexploração do aquífero diante do rápido rebaixamento dos seus níveis durante o período seco, assim como piora da qualidade de água armazenada no aquífero.

Com o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, foi possível perceber que a RNGA está degradando sua qualidade, especialmente na região mais próxima da zona urbana, em termos de elevação na concentração de cloreto. No entanto, essa concentração é atenuada ao longo do aquífero devido aos processos de diluição. Essa atenuação também é percebida na amplitude dos resultados ao longo do tempo para um mesmo poço. Esse resultado indica a capacidade natural do aquífero de reduzir a influência do esgoto em sua qualidade final. Observou-se também a eficácia da técnica TSA no sentido de melhorar a qualidade do esgoto, notadamente quando comparada aos valores obtidos pelo tratamento convencional obtido na ETE.

O levantamento dos dados permitiu ainda observar que a litologia do aquífero é heterogênea, porém, composta majoritariamente por areia, condição típica de aquíferos aluviais do SAB, fato que permite que esses aquíferos sejam bastante sensíveis à recarga natural, o que foi verificado com a rápida elevação dos níveis estáticos durante o período chuvoso. Essa recarga natural atua ainda na melhoria da qualidade da água subterrânea ao diminuir as concentrações de cloreto.

Diante do conhecimento adquirido pela caracterização desse aquífero, a estratégia de RGA proposta buscou considerar todo o potencial de recarga existente na região e tentar os enfrentar desafios legais, institucionais, financeiros e culturais relacionados à utilização do esgoto e de águas superficiais. Assim, foram estabelecidas quatro medidas, duas para utilização do esgoto tratado e duas para águas superficiais. Tais medidas propostas para o caso de estudo podem ser facilmente replicadas em localidades semelhantes por terem sido baseadas em condições pré-existentes no SAB.

Os benefícios que podem ser obtidos com tais medidas são o aumento da disponibilidade de recursos hídricos e a melhoria da qualidade da água subterrânea resultante. Os desafios operacionais de tais medidas podem residir em dificuldade operacional dos sistemas RGA, na falta de comunicação entre os atores e na aceitação da população em estabelecer sistema de reuso de esgoto.

De maneira geral, percebeu-se o elevado potencial de utilização do esgoto como fonte de recarga para aquíferos aluviais do SAB. Para isso, mostrou-se fundamental o uso conjunto e devidamente planejado das três diferentes fontes de recursos hídricos da região: o esgoto e as águas superficiais e subterrâneas, promovendo, assim, a gestão integrada dos recursos hídricos da região e contribuindo para atingir os objetivos do desenvolvimento sustentável.



## **6 RECOMENDAÇÕES**

A partir do modelo conceitual de RGA proposto, a viabilidade e eficiência das estratégias levantadas devem ser melhor investigadas através de estudos complementares utilizando, por exemplo, técnicas de modelagem, para avançar em questões como a vazão da água do açude a ser liberada para manter as condições propostas por esta dissertação, tempo de residência, e distâncias para retirada da água com qualidade suficiente para usos previstos. Para tanto, recomenda-se a continuação do monitoramento quali-quantitativo da água do aquífero e das possíveis fontes de recarga.

Além disso, um modelo institucional e de alocação de águas para esses aquíferos aluviais deve ser planejado e discutido com os tomadores de decisões, afim de garantir seu uso sustentável e a efetividade da estratégia de RGA que vier a ser implementada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, C. D. T. **Soil Aquifer Treatment: assessment and applicability of primary effluent reuse in developing countries.** PhD thesis at UNESCO-IHE, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: 2013.** Brasília: ANA, 2013.

ALBUQUERQUE, C. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. **Recarga de Aquífero Aluvial sob Uso Agrícola.** Águas Subterrâneas, 2015.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas/Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.** Brasília, 2017a.

\_\_\_\_\_, Agência Nacional de Águas. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação.** Anexo A. Brasília. P. 103, 2017b.

ANDRADE, E. M.; LOPES, F. B.; PALÁCIO, H. A. Q.; AQUINO, D. N.; ALEXANDRE, D. M. B. **Land use and groundwater quality: The case of Baixo Acaraú Irrigated Perimeter, Brazil.** Revista Ciência Agronômica. ISSN 1806-6690, 2010.

ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. B. **Estimation of Alluvial Recharge In The Semiarid.** Engenharia Agrícola, 34, no. 2: 211-221, 2014.

ATECEL. **Estudo de aluviões em um trecho do Rio Sucuru para irrigação do Perímetro de Sumé, Relatório Final.** Campina Grande, p. 54, 1999.

BILLIB, M.; BOOCHS, P. T.; RÊGO, J. C. **Management of an Artificial Underground Reservoir for Irrigation.** In: Third Chinese-German Symposium on Hydrology and Coastal Engineering, Nanjing. Third Chinese-German Symposium on Hydrology and Coastal Engineering, 1991.

BRAMAR. **Estudos de sondagem no aluvião do Rio Sucuru, PB.** Relatório. Campina Grande, 2017.

BRASIL, **Constituição Federal de 1988.**

\_\_\_\_\_, **Lei Federal nº 9.433/97.**

\_\_\_\_\_, Ministério da Integração Nacional; Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil.** Convênio nº 00535/2005. Brasília: MI: FUNCENE, 2008.

BURTE, J. D. P. **Os pequenos aquíferos aluviais nas áreas cristalinas semi-áridas: funcionamento e estratégias de gestão.** Estudo de caso no Nordeste brasileiro. PhD Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, 2008.

BURTE, J.; COUDRAIN, A.; CHAFFAUT, I.; KOSUTH, P. **Human impacts on components of hydrological balance in an alluvial aquifer in the semiarid Northeast, Brazil.** In: *Hydrological Sciences Journal*, v. 50, p. 95-110, 2005.

BURTE, J. D. P., COUDRAIN, A., MARLET, S. **Use of water from small alluvial aquifers for irrigation in semi-arid regions.** *Revista Ciência Agronômica*, 42, no. 3: 635-643, 2011.

CLARK, R.; Gonzalez, D.; Dillon, P.; Charles, S.; Cresswell, D.; Naumann, B. **Reliability of water supply from stormwater harvesting and managed aquifer recharge with a brackish aquifer in an urbanising catchment and changing climate.** *Environmental Modelling & Software*, 2015.

CNRH, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, **Resolução 15/01.**

\_\_\_\_\_, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, **Resolução 153/13.**

\_\_\_\_\_, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, **Resolução 22/02.**

\_\_\_\_\_, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, **Resolução 91/08.**

\_\_\_\_\_, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, **Resolução 92/08.**

\_\_\_\_\_, Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução 420/09.**

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução 396/08.**

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 153**, de 17 de dezembro de 2013. Brasil.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 420**, de 28 de dezembro de 2009. Brasil.

DE STEFANO, L., & LÓPEZ-GUNN, E. **Unauthorized groundwater use: Institutional, social and ethical considerations.** *Water Policy*, 14, 147–160, 2012.

DILLON, P., GALE, I., CONTRERAS, S., PAVELIC, P., EVANS, R., WARD, J. **Managing aquifer recharge and discharge to sustain irrigation livelihoods under water scarcity and climate change.** In: *Improving Integrated Surface and Groundwater Resources Management in a Vulnerable and Changing World (Proc. of JS.3 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India. IAHS Publ. 330, 2009.*

EL-RAWY, M., ZLOTNIK, V. A., AL-RAGGAD, M., AL-MAKTOUMI, A., KACIMOV, A., ABDALLA, O. **Conjunctive use of groundwater and surface water resources with aquifer recharge by treated wastewater: evaluation of management scenarios in the Zarqa River Basin, Jordan.** *Environmental Earth Science*, 75: 1146, 2016.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Fortaleza: CPRM, p. 389, 2000.

GALE, I. **Strategies for managed aquifer recharge (MAR) in semi-arid areas.** Paris, Unesco, 2005.

HEATH, R. C. **Hidrologia básica de água subterrânea.** Porto Alegre: UFRGS - Tradução do U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2220, 85 p., 1983.

HEM, J.D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water** (2d ed.): U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1473, p 363, 1970.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **Abastecimento urbano de água: panorama para o semiárido brasileiro**. Salomão de Souza Medeiros et al. 93 p., Campina Grande, 2014.

JOHNSON, T. A. **Ground Water Recharge Using Recycled Municipal Waste Water in Los Angeles County and the California Department of Public Health's Draft Regulations on Aquifer Retention Time**. *Groundwater*, 47, no. 4: 496 – 499, 2009.

KREMER, S, MIOTLINSKI, K., BARRY, K., DILLON, P., LEVETT, K. **Revised Flow and Solute Transport Modelling for ASTR Operations, South Australia**. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship. 78p. ISSN: 1835-095X, 2010.

LEONETI, A. B., PRADO, E. L., OLIVEIRA, S. V. W. B. **Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI**. *Revista de Administração Pública*. ISSN: 0034-7612, 2011.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3.ed. rev. e ampl. Campinas: Átomo, 2010.

MALIVA, R.G., and T.M. MISSIMER. **Aquifer Storage and Recovery and Managed Aquifer Recharge Using Wells: Planning, Hydrogeology, Design, and Operation**. Houston, Texas, USA: Schlumberger Water Services, Methods in Water Resources Evaluation Series No. 2, 578p, 2010.

MEDEIROS, S. S.; CAVALCANTE, A. M. B.; PEREZ-MARIN, A. M.; TINÔCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H.; PINTO, T. F. **Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro**. Campina Grande: INSA, 103p, 2012.

MEDEIROS, S. S.; SALCEDO, I. H.; SANTOS, D. B.; BATISTA, R. O.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; LIMA, R. C. C.; PEREZ-MARIN, A.M. **Esgotamento Sanitário: Panorama para o Semiárido Brasileiro**. Campina Grande: INSA, 64p, 2014.

MELLO, F. M. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, p. 524, 2011.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, **Portaria 2914**, de 12 de dezembro de 2011.

MISSIMER, T. M., DREWES, J. E., AMY, G., MALIVA, R. G. KELLER, S. **Restoration of Wadi Aquifers by Artificial Recharge with Treated Waste Water**. *Groundwater*, 50, no. 4: 514 – 527, 2012.

MONTENEGRO, A. A. A. ; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. In: **Recursos hídricos em regiões semiáridas: Estudos e aplicações**. Edited by: Gheyi, H. R., Paz, V. P. S., Medeiros, S. S., Galvão, C. O. ISBN 978-85-64265-03-5, 2012.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2006.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; MACKAY, R.; DE OLIVEIRA, A. S. C. **Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semiárida.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.8, n.2, 85-92, 2003.

OLIVEIRA, F. R.; CARDOSO, F. B. F.; VARELLA NETO, P. L. **Panorama da gestão integrada água subterrânea/superficial no Brasil.** XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, 2007.

PONTES FILHO, J. D. A. **Public policies for creation of water infrastructure in the state of Paraíba - Brazil.** II Workshop Internacional de Águas no Semiárido, 2015.

RÊGO, J. C., ALBUQUERQUE, J. P. T., PEREIRA, I. J. **Poço Bico de Pato. In Tecnologias Adaptadas para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro.** Edited by: Furtado, D. A., Baracuhy, J. G. V., Francisco, P. R. M., Fernandes Neto, S., Sousa, V. A. 1ªed. Campina Grande: Eprgraf, 2014, v. 2, p. 250-255, 2014.

RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T. ; VIEIRA, L. J. S. **Reativação de perímetros de irrigação através da exploração de aquíferos aluviais - o caso de Sumé.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999, Belo Horizonte. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999.

RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; BOOCHS, P. T. **Modelo de fluxo e de manejo de um aquífero aluvial da região semi-árida paraibano.** In: VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1989, Porto Alegre. VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1989.

SALGADO, J. P. **Influência do lançamento de esgotos na qualidade das águas do aquífero aluvial do rio Sucurú, no município de Sumé – PB.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SANTIAGO, M. F., FRISCHKORN, H., NETO, P. S. AND FILHO, J. M. **The Recharge Mechanisms in an Alluvial Aquifer Zone in Northeast Brazil.** Ground Water, 39: 18–23. doi:10.1111/j.1745-6584.2001.tb00347.x, 2001.

SANTOS, M. R. P., SANTIAGO, M. M. F., MENDONÇA, M. R. P., FRISCHKORN, H., MENDES FILHO, J. **Modelagem do transporte de cloreto proveniente de esgoto urbano em um aquífero sedimentar usando MT3D: o caso da bateria de poços de Juazeiro do Norte (CE).** Engenharia Sanitária e Ambiental. 283-292, 2014.

SARMA, D. & XU, Y. **The recharge process in alluvial strip aquifers in arid Namibia and implication for artificial recharge.** Hydrogeology Journal 25: 123, 2017.

SCANLON, B. R., REEDY, R.C., FAUNT, C. C., POOL, D., UHLMAN, K. **Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona.** Environmental Research Letters, 11.3, 2016.

SHARMA, S. K., HARUN, C. M., AMYM G. **Framework for assessment of performance of soil aquifer treatment systems.** Water Science and Technology, 57.6, 941-946, 2008.

SHARMA, S. K., KENNEDY, M. D. **Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse.** Internation Biotereriation and Biodegradation, 19: 671 – 677, 2016.

SHARMA, S.K., HUSSEN, M., AMY, G.. **Soil aquifer treatment using advanced primary effluent.** Water Sci. Technol. 64, 640-646, 2011.

SIDHU, J. P. S. ; TOZE, S., HODGERS, L., BARRY,K., PAGE, D., LI, Y., DILLON, P. **Pathogen Decay during Managed Aquifer Recharge at Four Sites with Different Geochemical Characteristics and Recharge Water Sources.** Journal of Environmental Quality 44, 1402-1412, 2015.

TSUYUGUCHI, B. B.; BRAGA, A. C. R.; PONTES FILHO, J. D. A.; COSTA, M. R. ; REGO, J. C. ; GALVAO, C. O. **ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.** In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017.


VIEIRA, L. J. S. **Emprego de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exploração de um aquífero aluvial.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

VILLA, M. A. **Vida e morte no sertão: história das secas no Nordeste nos séculos XIX e XX.** São Paulo: Ática, 2001

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Volume 1 de Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Universidade Federal de Minas Gerais, edição 3, 243p, 1996.


## APÊNDICE 1

Dados dos nove poços com monitoramento de qualidade.


Código do Poço	P03			Latit. (°):	36° 53' 40.4"
Localidade:	LOTE 02			Long (°):	7° 40' 17.2"
Profundidade (m)	3,44	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	514,303
Diâmetro (m)	3	Material das paredes	Tijolo	Finalidade	Irrigação e dessedentação de animais
Altura do Poço (m)	0,23	Tampado	Não	Situação	Abandonado
					

Código do Poço	P33			Latit. (°):	36° 53' 03.0"
Localidade:	LOTE 32			Long (°):	07° 40' 23.1"
Profundidade (m)	4,4	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	515,75
Diâmetro (m)	2,56	Material das paredes	Anéis de concreto	Finalidade	Irrigação
Altura do Poço (m)	1,03	Tampado	Não	Situação	Abandonado
					


Código do Poço	P10			Latit. (°):	36° 52' 25.3"
Localidade:	LOTE 09			Long (°):	07° 40' 40.0"
Profundidade (m)	2,4	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	512,49
Diâmetro (m)	3	Material das paredes	Tijolo Bico de Pato	Finalidade	Irrigação
Altura do Poço (m)	0,62	Tampado	Não	Situação	Em uso
					

Código do Poço	P11			Latit. (°):	36° 52' 25.3"
Localidade:	LOTE 17			Long (°):	07° 40' 40.0"
Profundidade (m)	9,5	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	508,72
Diâmetro (m)	2	Material das paredes	Tijolo Bico de Pato	Finalidade	Irrigação e dessedentação animal
Altura do Poço (m)	0,45	Tampado	Sim	Situação	Em uso
					



Código do Poço	P14			Latit. (°):	36° 50' 42.2"
Localidade:	LOTE 20			Long (°):	07° 40' 22.5"
Profundidade (m)	5,1	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	506,56
Diâmetro (m)	2	Material das paredes	Aneis de concreto	Finalidade	Irrigação
Altura do Poço (m)	0,00	Tampado	Sim	Situação	Em uso
					

Código do Poço	P06			Latit. (°):	36° 50' 14.5"
Localidade:	LOTE 25			Long (°):	07° 40' 27
Profundidade (m)	3,8	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	505,84
Diâmetro (m)	4	Material das paredes	Aneis de concreto	Finalidade	Irrigação
Altura do Poço (m)	0,55	Tampado	Não	Situação	Abandonado
					

Código do Poço	P28			Latit. (°):	36° 50' 06.3"
Localidade:	LOTE 27			Long (°):	07° 40' 32.1"
Profundidade (m)	4,36	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	504,87
Diâmetro (m)	3	Material das paredes	Aneis de concreto	Finalidade	Irrigação
Altura do Poço (m)	1,15	Tampado	Não	Situação	Em uso
					

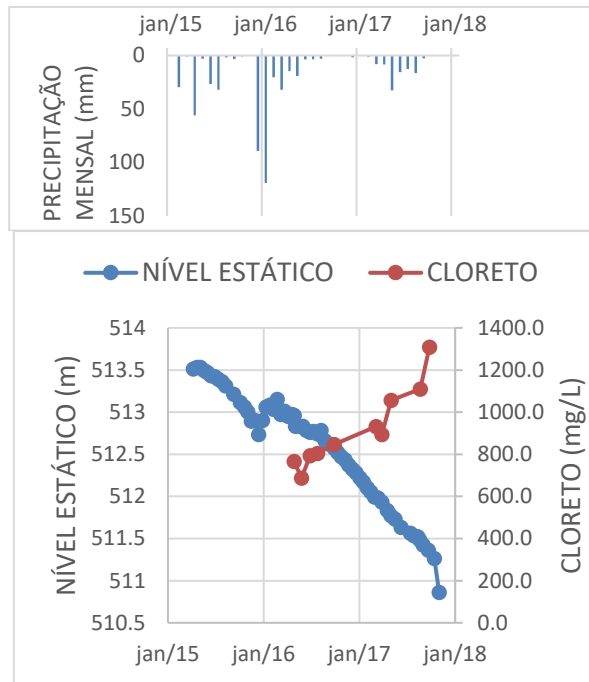
Código do Poço	P21			Latit. (°):	36° 49' 26.9"
Localidade:	LOTE 41			Long (°):	07° 40' 34.4"
Profundidade (m)	4,36	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	502,70
Diâmetro (m)	3	Material das paredes	Tijolo	Finalidade	Irrigação e dessedentação animal
Altura do Poço (m)	1,15	Tampado	Não	Situação	Em uso
					

Código do Poço	P25			Latit. (°):	36° 48' 57.6''
Localidade:	LOTE 46			Long (°):	07° 40' 54.9''
Profundidade (m)	8,4	Uso da água:	Privado	Altitude (m):	502,57
Diâmetro (m)	2	Material das paredes	Tijolo Bico de Pato	Finalidade	Irrigação e dessedentação animal
Altura do Poço (m)	0,80	Tampado	Não	Situação	Em uso

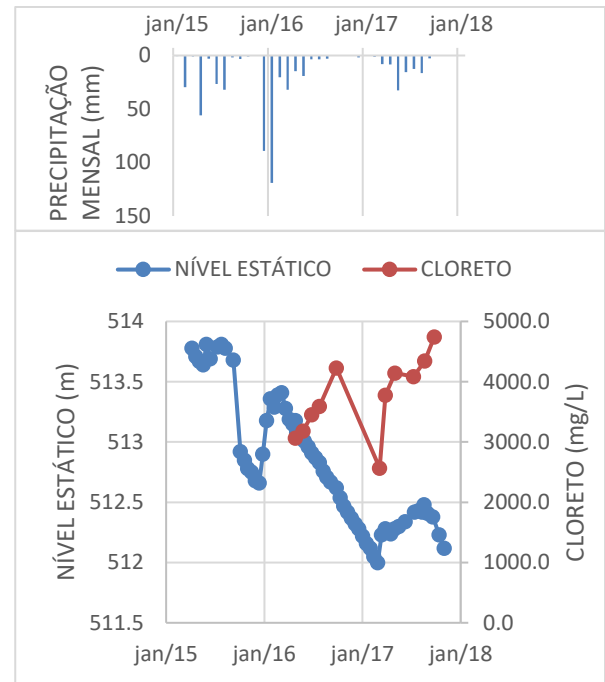


## APÊNDICE 2

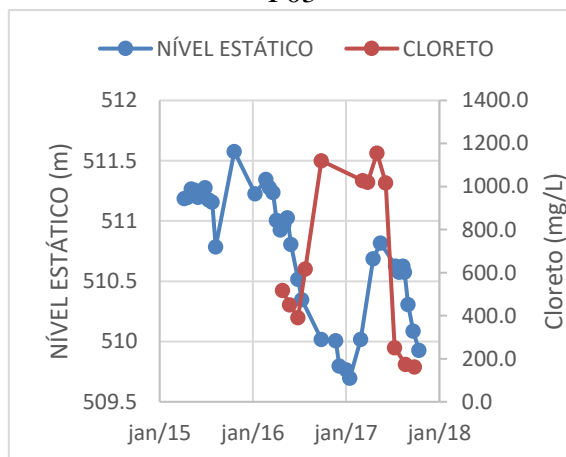
Dados dos nove poços referentes ao comportamento entre o nível estático, a concentração de cloreto a influência da precipitação.



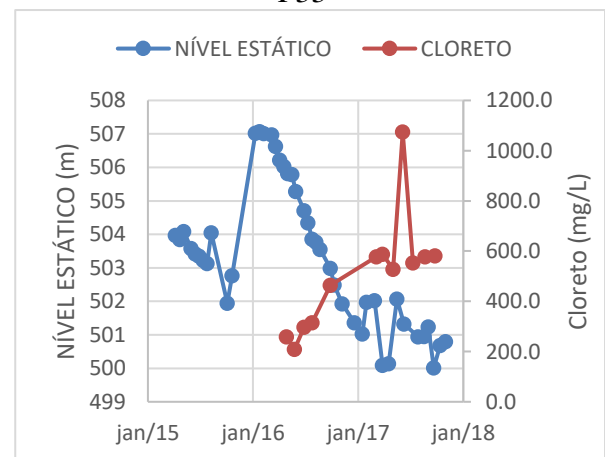
P03



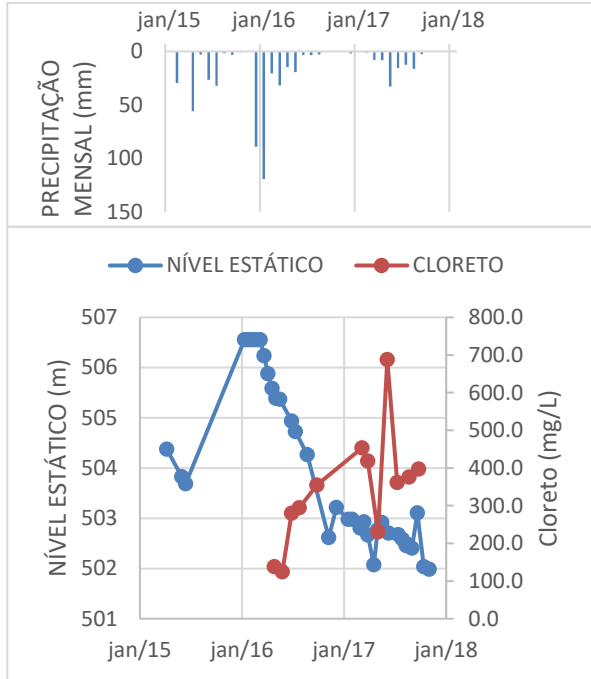
P33



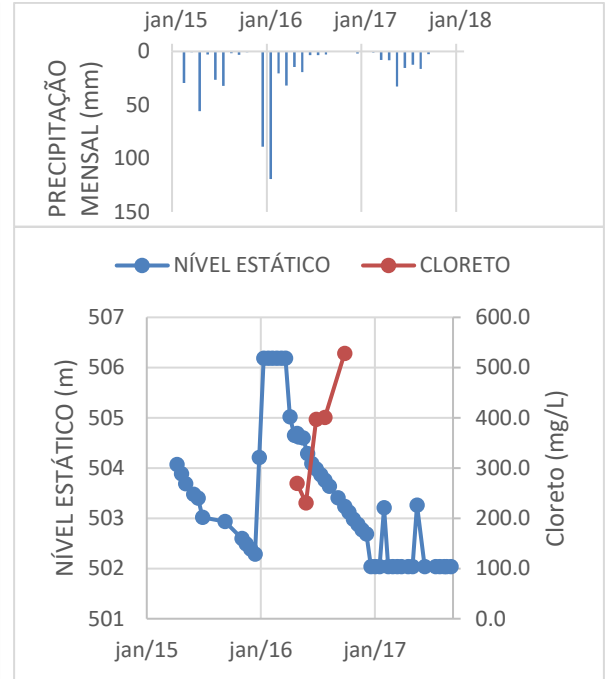
P10



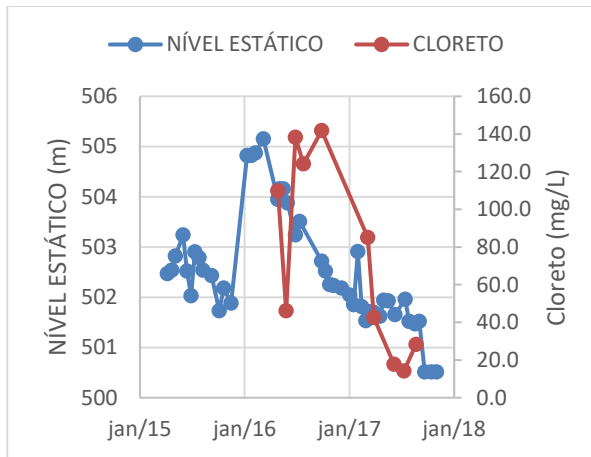
P11



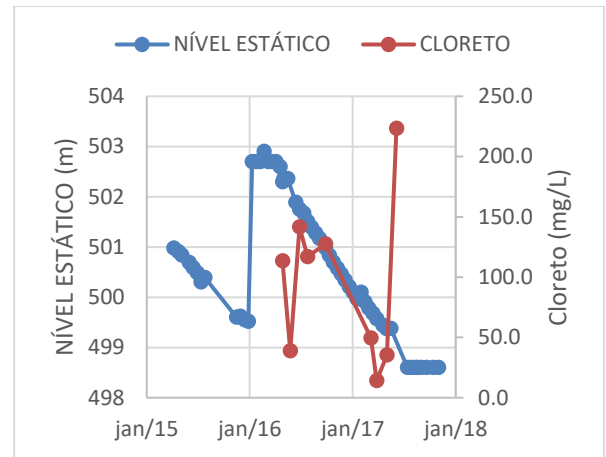
P14



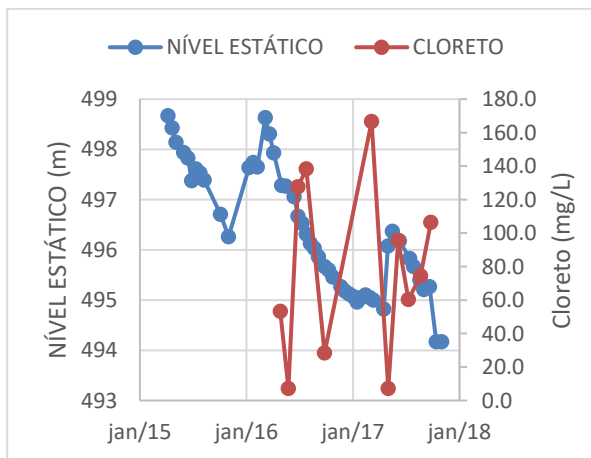
P06



P28



P21



P25

