



Universidade Federal  
de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL - UAEC

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APLICAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
NO AQUÍFERO ALUVIAL DA BACIA DO RIO SUCURU: CALIBRAÇÃO E  
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS.

MATEUS RODRIGUES DA COSTA

Campina Grande - PB

2018

MATEUS RODRIGUES DA COSTA

APLICAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
NO AQUÍFERO ALUVIAL DA BACIA DO RIO SUCURU: CALIBRAÇÃO E  
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC)  
da Universidade Federal de Campina Grande –  
UFCG, como um dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Janiro Costa Rêgo

Co-Orientadora: Msc. Bárbara Barbosa  
Tsuyuguchi.

Campina Grande - PB

2018

Dedico este trabalho à minha mãe, meu pai e a toda minha família. Sem o apoio de todos não chegaria tão longe.

## AGRADECIMENTOS

Ao SENHOR, meu Deus, que sempre Está comigo e É razão maior de tudo.

Ao Sr. Otom Rodrigues da Costa, meu Pai, à Sr.<sup>a</sup> Francisca Vanderlei da Costa, minha mãe, aos meus irmãos, Olga Benária, Max Rodrigo, Tatiany Rodrigues e Oana Angélica, e sobrinhos, Maria Clara, Abraão, Luiz Arthur, Diogo e Paulo Ricardo, este que representam meu alicerce de apoio e motivação.

A meus tios, José Neto e Crizelda, e primos, Rafaela, Ronyelly, Pablo, Laura, Pedro Miguel, e a Márcia Belizário, Hugo Oliveira e Vanessa, os quais foram minha segunda família aqui nessa cidade, e fizeram o meu dia a dia sempre mais fácil.

A todos os professores que muniram-me de aprendizado e lições preciosas durante esses anos.

Aos meus amigos e colegas, Matheus Leal, Lucas, Maria Luiza, Adriana, Anne, Moema, Osires, Ayllanderson, Ingrid, e tantos outros, os quais, sempre, nos momentos (fletores) mais difíceis estiveram ao meu lado.

Ao meu orientador Janiro Costa Rêgo, e minha coorientadora Bárbara Barbosa Tsuyuguchi, os quais sempre acreditaram na realização deste trabalho, e fizeram possível sua realização, e pelas longas horas de discussão e trabalho.

À mecânica e à elasticidade, que mantiveram-me em equilíbrio hiperestático, resistindo a todas as tensões internas, e as deformações impostas.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) *campus* sede, por todo o auxílio e recursos em mim investidos durante o período de graduação e elaboração desse trabalho.

Ao projeto BRAMAR, e o grupo de pesquisa do WP2, pelos dados e acolhimento fornecidos.

Cada um teve sua participação na realização deste trabalho, e, por isso, resguardo um local de profunda admiração e respeito meus por vocês nesse trabalho.

*“Tudo que fizerem, seja em palavra seja em ação, façam-no em nome do Senhor Jesus, dando por meio dele graças ao Pai” Colossenses 3:17*

## RESUMO

Este trabalho tem como área de estudo um trecho do aquífero aluvial do Rio Sucuru, visando calibração e aplicação de um modelo matemático de simulação como suporte a gestão de recursos hídricos. Para isso, foi realizado o aprimoramento, e calibração de modelo matemático previamente desenvolvido, utilizando o software *Feflow*, com dados de monitoramento de nível do lençol freático, de forma a obter melhores dados de condutividade para as subsequentes aplicações. Foram realizadas análises iniciais, calibração e simulação de cenários. Obteve-se significativos aprimoramentos nos dados topográficos, e na análise dos dados. Com as análises iniciais foi possível identificar rápidos padrões de recarga e menores de descarga. A calibração apresentou coeficientes de correlação superiores a 0,93, e a presença de zonas com alta variabilidade de condutividade, além de zonas melhores condutoras de comportamento similar, como as zonas 1 e 3, além de zonas piores condutoras cujo comportamento sugere diminuição da condutividade conforme aumento nos níveis, zonas 5. A análise dos cenários mostrou para o cenário 1 rebaixamento de 8,6% e volumes de 88,86 mil m<sup>3</sup> de evapotranspiração, e, para o cenário 2, rebaixamento de 13% com volumes de 90,4 mil m<sup>3</sup> de evapotranspiração, referentes aos primeiros 90 dias. Conclui-se, a partir do modelo calibrado, que o aquífero de Sumé é capaz de atender até 2 dois ciclos de cultivo referente as áreas dos lotes atuais, sem necessidade de recarga, no primeiro cenário; e garante pelo menos safra para uma reativação de 1/4 das áreas de milho e capim do antigo perímetro irrigado.

**Palavras chave:** Aquíferos Aluviais; Calibração; Gestão de Recursos Hídricos;

## ABSTRACT

This work has as study area a section of the alluvial aquifer of the Sucuru River, aiming at calibration and application of a mathematical model of simulation as support for the management of water resources. For this, the improvement, and calibration of a previously developed mathematical model was carried out, using Feflow software, with groundwater level monitoring data, in order to obtain better conductivity data for subsequent applications. Initial analyzes, calibration and simulation of scenarios were performed. Significant improvements were made to topographic data and data analysis. With the initial analyzes it was possible to identify fast recharge patterns and lower discharge rates. Calibration showed correlation coefficients higher than 0.93, and the presence of zones with high conductivity variability, as well as better conductive zones of similar behavior, such as zones 1 and 3, as well as worse conductive zones whose behavior suggests a decrease in conductivity according to the increase in levels, zones 5 The scenarios analysis showed for scenario 1 a decrease of 8.6% and volumes of 88.86 thousand m<sup>3</sup> of evapotranspiration, and for scenario 2, a decrease of 13% with volumes of 90.4 thousand m<sup>3</sup> of evapotranspiration, referring to the first 90 days. It is concluded from the calibrated model that the Sumé aquifer is able to meet up to two crop cycles referring to the areas of the current lots, without recharging, in the first scenario; and guarantees at least a harvest for a reactivation of 1/4 of the maize and grass areas of the former irrigated perimeter.

**Keywords:** Alluvial aquifers; Calibration; Water Resources Management;

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Ciclo hidrológico.....  | 14 |
| Figura 2 – Zonas de composição de aquíferos .....                                  | 16 |
| Figura 3 – Tipos de aquíferos, com respectivos níveis de pressão.....              | 17 |
| Figura 4 – Esquemática de um aquífero aluvial.....                                 | 18 |
| Figura 5 – Protocolos para Aplicação de Modelagem Matemática.....                  | 24 |
| Figura 6 – Fluxograma de execução metodológica do trabalho.....                    | 31 |
| Figura 7 – Mapa de Localização da Área de Estudo. ....                             | 33 |
| Figura 8 – Malha de elementos finitos da área de estudos. ....                     | 39 |
| Figura 9 – Mapa de espessuras e elevações do modelo.....                           | 40 |
| Figura 10 – Condições de Contorno (Regime Permanente) e Poços de Observação. ....  | 41 |
| Figura 11 – Mapa das áreas cultivadas na cidade de Sumé, em 2018. ....             | 43 |
| Figura 12 – Mapa das áreas cultivadas no antigo Perímetro Irrigado. ....           | 44 |
| Figura 13 – Nível Estático de Poço P21 de monitoramento.....                       | 46 |
| Figura 14 – Variação de níveis estáticos de poços ao longo do aquífero.....        | 47 |
| Figura 15 – Evolução do volume do aquífero. ....                                   | 48 |
| Figura 16 – Diagrama de Dispersão de cargas hidráulicas para datas calculadas..... | 49 |
| Figura 17 – Distribuição das condutividades calibradas em 26/03/2018. ....         | 51 |
| Figura 18 – a) Variação do nível estático do poço 21; b) Esquema Ilustrativo.....  | 51 |
| Figura 19 – Distribuição de espessuras do aquífero, em curva S.....                | 52 |
| Figura 20 – Cargas hidráulicas iniciais, para 1º e 2º ciclo.....                   | 54 |



## SUMÁRIO

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| <b>1</b>    | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.1</b>  | <b>JUSTIFICATIVA</b>   | <b>12</b> |
| <b>2</b>    | <b>OBJETIVOS</b>   | <b>13</b> |
| <b>2.1</b>  | <b>OBJETIVO GERAL</b>  | <b>13</b> |
| <b>2.2</b>  | <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>3</b>    | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                       | <b>14</b> |
| <b>3.1</b>  | <b>O CICLO HIDROLÓGICO</b>   | <b>14</b> |
| <b>3.2</b>  | <b>ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</b>  | <b>15</b> |
| <b>3.3</b>  | <b>AQUÍFEROS</b>   | <b>16</b> |
| <b>3.4</b>  | <b>AQUÍFEROS ALUVIAIS</b>  | <b>17</b> |
| <b>3.5</b>  | <b>PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS AQUÍFEROS</b>                    | <b>18</b> |
| 3.5.1       | Porosidade Total, Porosidade Efetiva e Retenção Específica         | 18        |
| 3.5.2       | Permeabilidade Intrínseca  | 19        |
| 3.5.3       | Condutividade Hidráulica   | 19        |
| 3.5.4       | Transmissividade   | 20        |
| 3.5.5       | Armazenamento Específico, Coeficiente de Armazenamento             | 20        |
| <b>3.6</b>  | <b>MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA</b>                                    | <b>20</b> |
| <b>3.7</b>  | <b>MODELO CONCEITUAL</b>   | <b>21</b> |
| <b>3.8</b>  | <b>MODELO MATEMÁTICO</b>   | <b>22</b> |
| <b>3.9</b>  | <b>MÉTODOS DE MODELAGEM NUMÉRICA</b>                               | <b>24</b> |
| <b>3.10</b> | <b>SOFTWARES PARA MODELAGEM</b>                                    | <b>25</b> |
| <b>3.11</b> | <b>PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</b> | <b>25</b> |
| 3.11.1      | Calibração manual Tentativa e Erro                                 | 26        |
| 3.11.2      | Calibração Automatizada  | 26        |
| 3.11.3      | Dados necessários para calibração                                  | 26        |
| 3.11.4      | Avaliação da Calibração  | 26        |
| <b>3.12</b> | <b>SOFTWARES DE CALIBRAÇÃO</b>                                     | <b>29</b> |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| <b>3.13</b> | <b>SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)</b> .....   | <b>30</b> |
| <b>4</b>    | <b>METODOLOGIA</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....  | <b>32</b> |
| <b>4.2</b>  | <b>OBTENÇÃO DE DADOS</b> .....   | <b>34</b> |
| 4.2.1       | Dados de elevação .....  | 34        |
| 4.2.2       | Litologia .....  | 34        |
| 4.2.3       | Dados de condutividade e porosidade .....  | 34        |
| 4.2.4       | Monitoramento de Nível Estático.....   | 35        |
| <b>4.3</b>  | <b>PROCESSAMENTO E REFINAMENTO DOS DADOS</b> .....   | <b>35</b> |
| <b>4.4</b>  | <b>MODELO CONCEITUAL</b> .....   | <b>36</b> |
| <b>4.5</b>  | <b>O MODELO UTILIZADO</b> .....  | <b>37</b> |
| <b>4.6</b>  | <b>DELIMITAÇÃO TEMPORAL</b> .....  | <b>37</b> |
| <b>4.7</b>  | <b>CALIBRAÇÃO DO MODELO</b> .....  | <b>41</b> |
| <b>4.8</b>  | <b>SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS</b> .....   | <b>42</b> |
| 4.8.1       | Definição das áreas e cálculo das vazões de bombeamento .....  | 42        |
| 4.8.2       | Condições de contorno .....  | 44        |
| <b>5</b>    | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | <b>46</b> |
| <b>5.1</b>  | <b>DISCUSSÕES ACERCA DOS NÍVEIS DO AQUÍFERO</b> .....  | <b>46</b> |
| <b>5.2</b>  | <b>ANÁLISES INICIAIS EM REGIME PERMANENTE</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>5.3</b>  | <b>CALIBRAÇÃO DO MODELO</b> .....  | <b>49</b> |
| <b>5.4</b>  | <b>SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS</b> .....   | <b>53</b> |
| 5.4.1       | Cenário 1: Continuidade do cultivo de capim e milho ao fim de estação chuvosa de elevada precipitação. ....  | 53        |
| 5.4.2       | Cenário 2: Demanda necessária a reativação de 1/4 do perímetro irrigado, para um ou mais ciclos de cultivo, em regime de seca, logo após alta nos níveis do aquífero. .... | 54        |
| <b>6</b>    | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | <b>56</b> |
| <b>7</b>    | <b>REFERENCIAS</b> .....   | <b>58</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O uso de águas subterrâneas é bastante disseminado mundialmente, principalmente para atendimento urbano e irrigação, e em regiões semiáridas, caracterizadas por alta variabilidade temporal e espacial de precipitação juntamente, com evaporação elevada, o uso de águas subterrâneas torna-se especialmente importante, diante do contexto de escassez hídrica, considerados em tais regiões, um recurso estratégico, dada a qualidade das águas, baixa evaporação e capacidade de armazenamento. (LIBANIO, 2010; GALVÃO, 2011)

O aproveitamento de pequenos aquíferos aluviais é prática comum com relevante papel na mitigação da escassez hídrica na região semiárida, e tem sua importância constatada em todo seu domínio, no qual a geologia é predominantemente impermeável, apresentando litologia, dimensão e características favoráveis para exploração. (ALBUQUERQUE, 1986; RÊGO *ET AL*, 1999)

Diante desse quadro, a gestão de recursos hídricos merece uma atenção devida, sobretudo em regiões como no semiárido, onde para o desenvolvimento da irrigação e mesmo para o abastecimento é fundamental o conhecimento acerca da disponibilidade de água em quantidade e qualidade, além do que devem ser propostas alternativas de uso e compartilhamento adequadas à realidade local.

No que diz respeito a gestão de recursos hídricos, a modelagem numérica de fluxo de água subterrânea é ferramenta imprescindível de suporte a decisões de gestão de recursos visto que fornece informações importantes para gerenciamento de poços, simulação de cenários futuros, e muitos outros (CARVALHO, 2013).

O uso de modelos matemáticos realiza a representação aproximada da realidade mediante a resolução das equações que descrevem o processo físico, sendo assim, uma vez que se obtenha um modelo que represente adequadamente um determinado fenômeno ou processo, este poderá ser empregado para simular diversos cenários. (GONÇALVES, 2013)

Assim, esta pesquisa vem complementar estudos realizados no aquífero aluvial do Rio Sucuru na cidade de Sumé – PB, tais como Vieira (2002), Rêgo *et al*(2013), Alves (2016), de forma a realizar aprimoramentos e aplicações de modelos iniciados, de modo a possibilitar a análise de cenários e respectivos impactos sobre as águas subterrâneas, fornecendo suporte à gestão integrada de recursos hídricos na região.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As regiões semiáridas estão entre as regiões que mais sofrem pela má distribuição de água no Brasil, as quais são submetidas a chuvas de distribuição irregular, no tempo e no espaço, caracterizando acentuados períodos de estiagem, aliado com os elevados índices de evapotranspiração, agrava substancialmente o déficit hídrico (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2012; GALVÃO, 2011)

Diversas foram as políticas adotadas para remediar tais quadros de escassez hídricas, dentre os quais é possível citar: a construção de açudes, perfuração de poços, construção de cisternas rurais, dessalinização e aproveitamento de água salobra, reaproveitamento de águas servidas, ou mesmo implantação de barragens subterrâneas, cujo foco é atender demanda difusa e pequenas comunidades rurais. (RÊGO *ET AL*, 2013)

Destas medidas uma delas apresenta especial importância na atenuação da crise hídrica na região semiárida, e diz respeito ao aproveitamento da água subterrânea, destacadamente a de pequenos aquíferos freáticos. Medida amplamente benquista pela população, possui facilidade de captação, adução e tratamento, dispendendo assim poucos recursos de implantação, além disso em certas regiões pode ser o único recurso disponível. (WREGGE, 1997)

A cidade de Sumé, semiárido paraibano, possui um sistema de recursos hídricos formado por um rio intermitente, o rio Sucuru, cujas margens no decorrer dos anos de processo de sedimentação constituíram um sistema aquífero aluvial de pequenas dimensões, o qual se estende por cerca de 40 km, a jusante do açude de Sumé, até o limite da bacia hidrográfica do Rio Sucuru. Compõe-se ainda de um reservatório de médio porte, Açude Sumé, com capacidade de 45 milhões m<sup>3</sup>. Destaca-se ainda a presença nesse sistema dos efluentes urbanos da cidade, os quais são despejados parte *in natura* e parte tratada por lagoas de estabilização.

Em Sumé, a adoção de medidas públicas alheias às técnicas adequadas de gestão provocou acentuação de quadros de escassez hídrica, as quais somadas com anos de baixa pluviosidade, findou na desativação do Perímetro Irrigado local bem como no esvaziamento progressivo do reservatório local. (VIEIRA, 2002).

A realização deste trabalho é justificada, pois, também na importância que a gestão de recursos hídricos possui em locais afetados diretamente pela escassez hídrica, como no caso da Cidade de Sumé. Com isso a continuidade de trabalho já desenvolvidos em etapas anteriores, aprimoramento de modelos já iniciados e aplicação destes na obtenção de resultados mais representativos do gerenciamento de recursos hídricos na região, fornecerão melhores quadros

e avaliação de novos cenários, os quais podem subsidiar o modelo de gestão aplicado, e com isso impactar a região estudada.

Esta pesquisa se desenvolve em uma das cinco áreas abordadas pelo projeto BRAMAR - Desenvolvimento de Estratégias e Tecnologias Inovadoras para Mitigação dos Efeitos da Escassez de Água no Nordeste Brasileiro, que diz respeito a uma rede de pesquisa multidisciplinar de abrangência regional, conta com cooperação de universidades e empresas alemãs e dispõe de financiamento aprovado do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT. O projeto teve início em novembro de 2014 e estende-se até dezembro de 2018.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Aplicar um modelo matemático de fluxo de água subterrânea no aquífero aluvial do Rio Sucuru na cidade de Sumé/PB, de modo a oferecer suporte a gestão de recursos hídricos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aprimorar o modelo conceitual e matemático já existente;
- Calibrar a condutividade hidráulica a partir da exploração litológica e monitoramento do lençol freático;
- Analisar a exploração do aquífero a partir da concepção de cenários de uso do solo;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

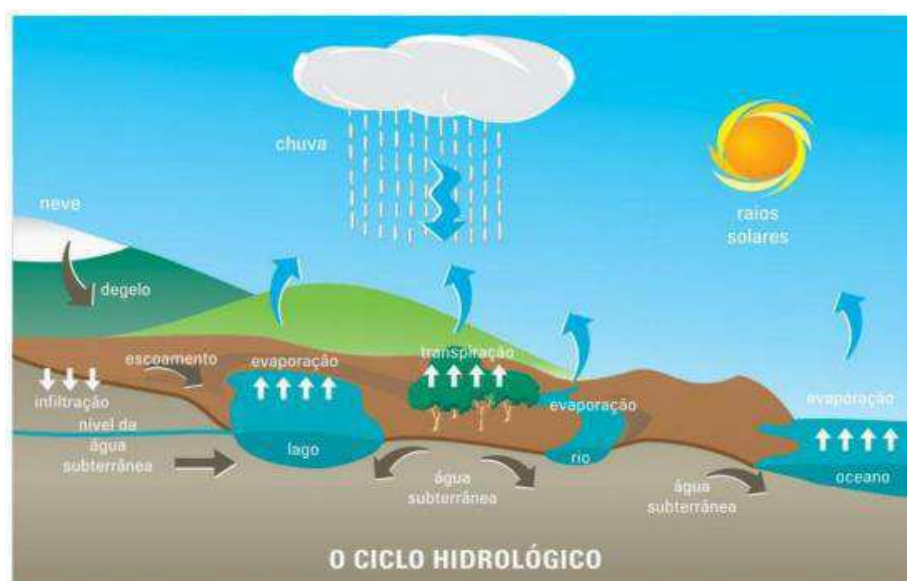
#### 3.1 O CICLO HIDROLÓGICO

Em se tratando de água subterrânea é necessário abordar a respeito do ciclo hidrológico como conceito introdutório complementar. Segundo Feitosa (2008), o ciclo hidrológico é o sistema pelo qual a natureza faz circular a água do oceano para a atmosfera e depois para os continentes, de onde retorna superficial ou subterraneamente ao oceano. No ciclo hidrológico o movimento contínuo de água pode ser classificado em algumas etapas:

- *Escoamento*, o qual diz respeito a água não infiltrada pelo solo que assume o percurso natural de rios e outros;
- *Evaporação*, tal etapa faz com que a água retorne a atmosfera. Aliado a essa soma-se a água que retorna a atmosfera mediante transpiração das plantas, dá-se o nome de evapotranspiração;
- *Congelamento*, a água fica retida na forma de montanhas de gelo e geleiras;
- *Infiltração*, diz respeito a água que penetra no solo, percolando solo ou rochas e se depositando para formar aquíferos; ressurgir na superfície, ou alimentar nascentes, fontes, rios e lagos;
- *Precipitação*, em que o vapor de água condensa ao atingir temperatura e volume adequados.

A Figura 1 ilustra o desenvolvimento do ciclo hidrológico, conforme descrito.

Figura 1 – Ciclo hidrológico.



Fonte: Mendonça, 2009.

### 3.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Águas subterrâneas, ou águas subsuperficiais, é o termo usado para denotar toda a água que se encontra abaixo da superfície do terreno, a qual se armazena nos poros entre os grãos minerais, em fraturas ou em feições cársticas do maciço rochoso. Geralmente provenientes de precipitação ou derretimento de neve, esta infiltra-se no solo até ficar localizada em camadas subjacentes. (DE LA CRUZ, 2014)

As águas subterrâneas representam a parcela mais lenta do ciclo hidrológico e constitui a principal reserva de água disponível, ocorrendo em volumes superiores aos encontrados em superfícies (VIEIRA, 2002).

A água que se encontra no subsolo pode ser classificada em zona de aeração e zona de saturação:

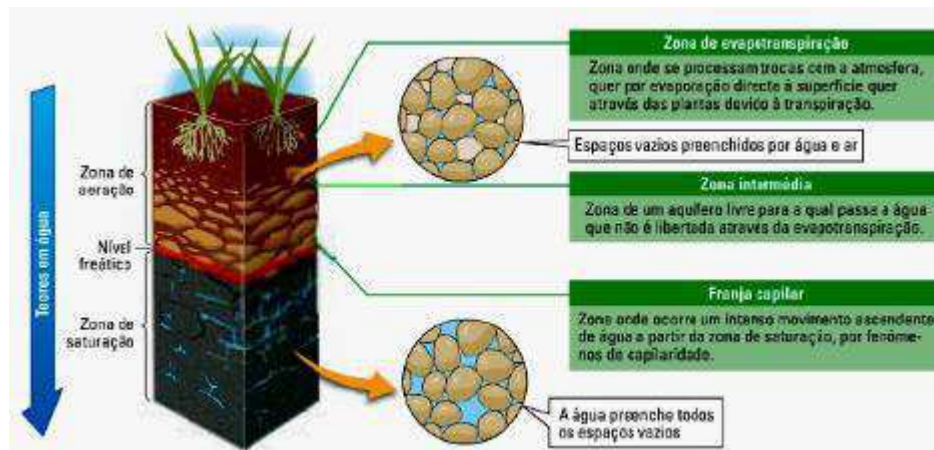
*Zona de aeração ou zona não saturada* é a parte do solo que se encontra apenas parcialmente preenchida por água, há também presença de ar nos vazios. Nesta zona a água ocorre aderida aos grãos de solo como películas. Para solos finos a umidade tende a ser maior que em solos grosseiros, por haver mais superfícies de grãos, permitindo retenção de água por adesão. Dentro da zona de aeração destacam-se três regiões distintas:

- *Zona de umidade do solo*, é a mais superficial, onde há a intensa perda de água aderida para atmosfera. Em alguns casos os sais precipitados formados pela evaporação da água se acumulam dando origem aos solos salinizados ou a crostas ferruginosas ou lateríticas;
- *Franja de capilaridade* é a zona mais próxima do lençol freático, onde a umidade é elevada devido a proximidade da água; e
- *Zona intermediária* se encontra compreendida entre as duas anteriores, apresenta umidade menor que a franja de capilaridade e maior que a zona de umidade do solo.

Já a *zona de saturação* é a região abaixo do lençol freático (nível freático) onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchido por água. Na Figura 2 tem-se o exemplo de tais zonas de composição.

Vale lembrar que a espessura e predominância destas são variáveis: em solos muito finos a franja de capilaridade pode apresentar-se maior, e em áreas onde o lençol encontra-se próximo da superfície do terreno a zona intermediária pode não existir devido a franja de capilaridade estender-se até a superfície.

Figura 2 – Zonas de composição de aquíferos



Fonte: Correia, 2012.

### 3.3 AQUÍFEROS

Aquífero é uma formação geológica com permeabilidade e porosidade interconectada o suficiente para armazenar e transmitir água em quantidades significativas, sob gradientes hidráulicos naturais. Aos aquíferos comumente são associados aos meios geológicos de areias e cascalhos inconsolidados, arenitos friáveis ou não, basaltos e outras rochas cristalinas fraturadas, e outros (CLEARY, 2007).

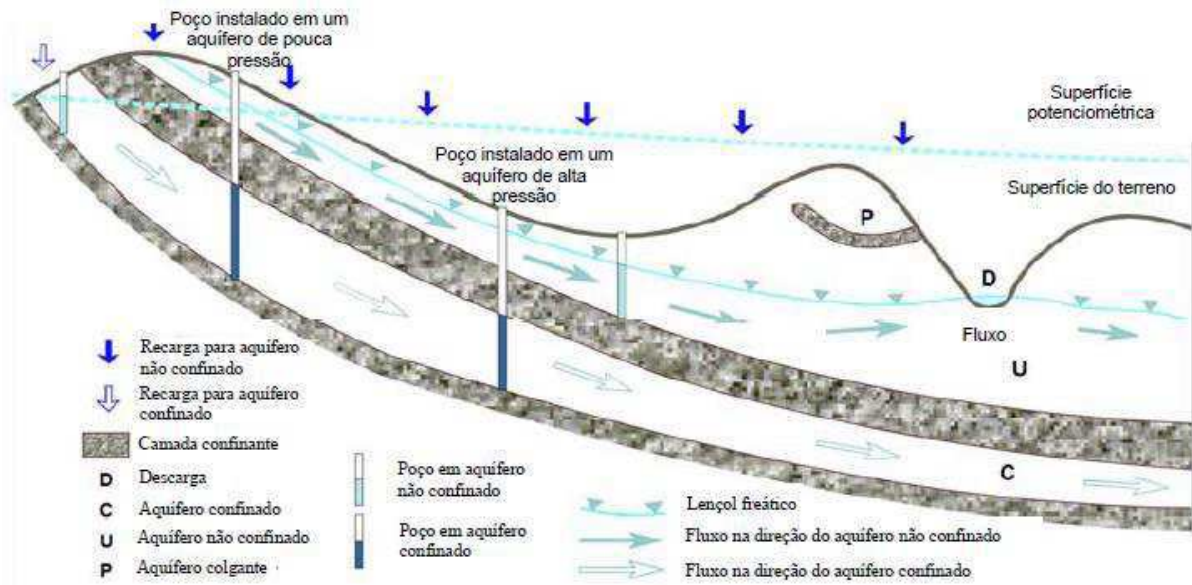
Classificam-se tradicionalmente três tipos de aquíferos, a saber:

- Aquífero confinado – Trata-se de uma formação geológica permeável confinada entre duas camadas impermeáveis, caracterizando uma pressão interior sempre maior do que a pressão atmosférica. Possuem grande extensão e produção.
- Aquífero semipermeável – É um aquífero localizado entre duas camadas semipermeáveis e consideravelmente delgadas. Considera-se possível o fluxo de água do aquífero e para o aquífero a depender da diferença de potencial hidráulico.
- Aquífero livre (ou freático) – Possui a superfície freática como fronteira superior, estando, pois, sujeito sempre a pressão atmosférica. São os aquíferos mais comuns e os mais exploráveis pela população, apresentando, devido à vulnerabilidade, maiores problemas com contaminação.

A Figura 3, apresenta uma ilustração esquemática de um sistema de águas subterrâneas mostrando áreas de recarga e descarga, aquífero confinado, não confinado e em repouso, nível do lençol freático, superfície potenciométrica, camadas confinantes e a direção do fluxo das águas subterrâneas.



Figura 3 – Tipos de aquíferos, com respectivos níveis de pressão.



Fonte: Best, 1998.

Outras formações geológicas citadas pela literatura são aquífugo, aquíclude e aquítarde. Segundo Tucci (1993), *aquítarde* são formações semipermeáveis delimitadas no topo e/ou na base por camadas de maior permeabilidade, as quais transmitem água a uma taxa muito baixa em relação a do aquífero.

Feitosa et al. (2008) define que *aquíclude* são formações que podem conter água (até mesmo em grande quantidade), mas transmitem uma quantidade irrisória em condições naturais, como exemplo tem-se algumas formações impermeáveis, como camadas de argila.

Já *aquífugos* são formações impermeáveis que armazenam ou transmitem quantidade desprezível de água. (FEITOSA & MANOEL FILHO, 2000).

### 3.4 AQUÍFEROS ALUVIAIS

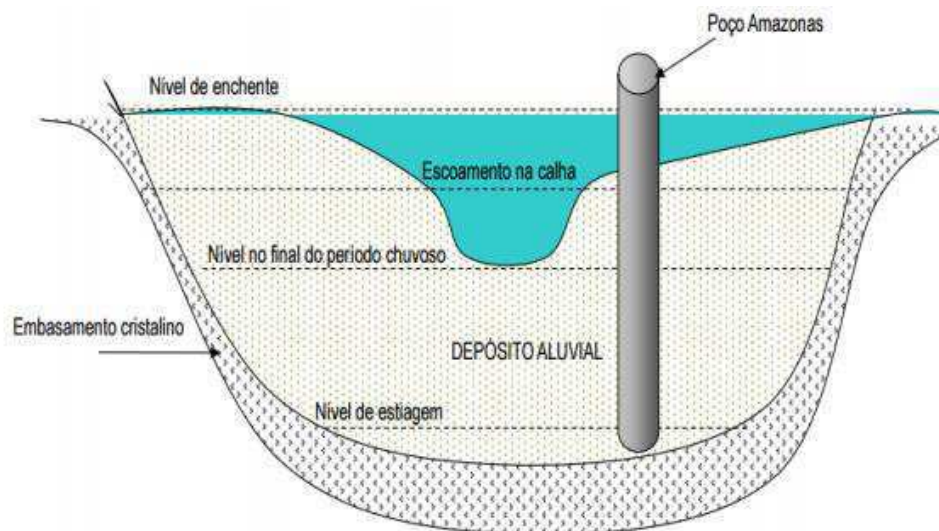
Segundo Costa (1986) depósitos aluviais podem ser constituídos de detritos das mais variadas frações granulométricas, desde seixos até argilas, com predomínio majoritário de frações arenosas. Tais aquíferos são de origem recente (quaternária), os quais estão relacionados diretamente com o desenvolvimento dos rios e riachos, cuja origem dá-se por diversos processos que atuam na superfície da bacia hidrográfica, conforme ilustrado na Figura 4. Assim, tais aquíferos podem ser definidos como pacotes de sedimentos dendríticos, formados de cascalho, areia, silte e argilas.

Bem conhecidos como aluviões, estes iniciam-se com a erosão das rochas, provocada por processos de variação de temperatura e ação de agentes químicos e biológicos, seguidos por

transporte pela água, e, finalmente, de sedimentação ou deposição desse material no próprio leito, um pouco abaixo das fontes de erosão.

Os aluviões possuem papel de destaque no que diz respeito a mitigar o impacto da estiagem em regiões semiáridas. Uma alternativa bastante utilizada diz respeito a perfuração de poços de grandes diâmetros (conhecidos como poços amazonas, ou “cacimbões”) em vales aluviais de rios ou riachos intermitentes. Além disso, o papel da perfuração de poços em leitos aluviais para irrigação de pequena escala e dessedentação animal é bastante destacado (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2012).

Figura 4 – Esquemática de um aquífero aluvial



Fonte: ABAS, 2015.

### 3.5 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS AQUÍFEROS

Os parâmetros que afetam o armazenamento e definem um aquífero são porosidade, porosidade efetiva, retenção específica, armazenamento específico, coeficiente de armazenamento e rendimento específico, conforme definidos em Alves (2016).

#### 3.5.1 Porosidade Total, Porosidade Efetiva e Retenção Específica

A porosidade ( $\eta$ ) é a razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume total ( $V_t$ ) do material sólido ou rocha, conforme a Equação 1

Equação 1

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}$$

Já a porosidade efetiva ( $\eta_e$ ) é dada pela razão entre o volume de água liberado dos vazios, por gravidade, ( $V_g$ ), e o volume total ( $V_t$ ) do material sólido ou rocha, sendo assim dado conforme Equação 2.

Equação 2

$$\eta_e = \frac{V_g}{V_t}$$

A retenção específica diz respeito a quantidade de água retida na superfície dos grãos ( $V_r$ ) a partir das forças de atração molecular entre a água e essa superfície, forças essas maiores que as de gravidade, dividida pelo volume total ( $V_t$ ) do material sólido ou rocha, ou seja, é a diferença entre a porosidade ( $\eta$ ) e a porosidade específica ( $\eta_e$ ), conforme Equação 3.

Equação 3

$$S_r = \eta - \eta_e$$

### 3.5.2 Permeabilidade Intrínseca

A permeabilidade intrínseca ( $k$ ) de uma rocha ou solo definem a sua habilidade em transmitir um fluido. Essa propriedade depende unicamente do meio, e é independente do fluido. Pode ser determinada pelo ensaio de permeabilidade, conforme Lei de Darcy. Onde  $Q$  é a vazão,  $L$  é extensão,  $A$  é a área da seção transversal de escoamento, e  $\Delta h$  corresponde ao gradiente hidráulico que move o escoamento, assim como ilustra Equação 4.

Equação 4

$$k = \frac{Q \times L}{(A \times \Delta h)}$$

### 3.5.3 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica descreve a habilidade do aquífero em transportar um fluido. Expressa a facilidade com que um fluido é transportado através do meio poroso. (SOUSA, 2008).

A condutividade ( $K$ ) pode ser expressa em função das características do meio e do fluido, conforme abaixo. Onde  $k$  é a permeabilidade intrínseca do meio poroso,  $\rho$  é a massa específica,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\mu$  é a viscosidade absoluta, e  $\nu$  é a viscosidade cinemática. Assim como é mostrado na Equação 5.

Equação 5

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{\nu}$$

### 3.5.4 Transmissividade

A transmissividade (T) corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Esta pode ser conceituada como uma taxa de escoamento através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária, submetida a um gradiente hidráulico também unitário.

Para aquíferos confinados a transmissividade é dada pela expressão abaixo. Onde K corresponde a permeabilidade, e b a espessura saturada, assim como mostra a Equação 6.

Equação 6

$$T = k \times b$$

Para aquíferos livres a espessura muda com o tempo, conforme o próprio nível freático.

### 3.5.5 Armazenamento Específico, Coeficiente de Armazenamento

O armazenamento específico (Se) de um aquífero saturado é o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica (Equação 7).

Equação 7

$$Se = \frac{\Delta V_{liberado}}{V \times \Delta h}$$

O coeficiente de armazenamento (S) é o parâmetro adimensional definido pela equação abaixo. Onde b é a espessura da camada do aquífero (Equação 8).

Equação 8

$$S = Se \times b$$

## 3.6 MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA

É crescente o uso de modelos de simulação de fluxo de águas subterrâneas, se justificando pelos vários objetivos associados ao uso desta fonte de recursos. A previsão de

efeitos causados pela concentração de poços e vazões bombeadas é geralmente o que mais se procura (CIRILO & CABRAL, 1989).

Um modelo matemático trata-se de uma representação simplificada de uma situação real, através de equações matemáticas, no caso da hidrogeologia, tem-se o uso das equações que regem o fluxo subterrâneo.

Os modelos podem ser divididos em modelos de fluxo, os quais simulam o escoamento de água considerando os fluxos naturais dos aquíferos, suas recargas e seus bombeamentos; e modelos de transporte de massa, os quais se interessam no transporte e difusão de uma determinada substância poluente. A modelagem de aquífero envolve diversas etapas em que a simulação computacional é apenas uma dentre estas.

Anterior a simulação computacional temos a definição de objetivos, formulação de modelo conceitual, matemático e analítico/numérico (o uso de modelos numéricos prevalece pela impossibilidade de obtenção de solução analítica) com escolha de pacote computacional (GONÇALVES, 2013).

### 3.7 MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual objetiva a representação e simplificação do problema, de forma a esquematizar as camadas confinantes, recargas e descargas, conexões hidráulicas, bem como definir quais são as implicações do uso desta simplificação, ou seja, relação causa-consequência. É importante ressaltar que busca-se conciliar a representação da realidade do aquífero juntamente à descrição do comportamento deste.

Para a elaboração de um modelo conceitual adequado, Cabral & Demétrio (2008) enumeram alguns pontos importantes a serem considerados:

- Identificação de sistemas aquíferos;
- Identificação das fronteiras do modelo;
- Identificação das condições de contorno;
- Levantamento de parâmetros hidrogeológicos; e
- Levantamento de entradas e saídas hídricas (recargas e descargas).

Cabral e Demétrio (2008), destacam ainda que na elaboração deste modelo são necessárias informações sobre determinados parâmetros, a saber:

- Geometria: cotas de base e do topo e identificação dos limites;
- Variáveis externas: recargas, condições iniciais e de contorno, carga piezométrica e vazões dos poços;

- Variáveis de estado: velocidade, concentração, temperatura, transmissividade, coeficiente de armazenamento, área de recarga e descarga, conectividade com água superficial e outros aquíferos;
- Parâmetros: condutividade hidráulica, viscosidade, capacidade de infiltração, resistência hidráulica (camada confinante);
- Constantes: massa específica, coeficiente de compressibilidade, aceleração da gravidade

### 3.8 MODELO MATEMÁTICO

Um modelo matemático apresenta-se estruturado em equações governantes, condições de contorno, e condições iniciais (para o caso de regimes não-permanentes). As equações governantes que representam o fluxo de água subterrânea são derivadas da combinação da Lei de Darcy com a Lei de Conservação da Massa.

Segundo Anderson e Woessner (1992) as condições de contorno explicitam as interações do aquífero com o meio externo. Enunciados sob expressões matemáticas garantem a unicidade de solução do modelo de equações, o qual, a princípio, possuiria infinitas soluções. Há matematicamente três tipos de condições de contorno em problemas de simulação de fluxo de água subterrâneas, a saber:

1. **Condição de Dirichlet:** No caso de *contorno de carga constante* representa uma carga hidráulica que não muda com o tempo e que não é afetada pelo sistema simulado, representa grandes corpos de água, como lagos, rios. Pode ainda se apresentar como *contorno de carga específica* que representa uma carga hidráulica que pode variar no tempo e no espaço.

Equação 9

$$h = h(x, y, z, t)$$

2. **Condição de Neumann:** *Condição de fluxo especificado*, em que apenas o fluxo é especificado no contorno do modelo, sendo fixo ou não, assim a carga hidráulica também é uma incógnita e deve ser determinada pelo sistema. Normalmente aplica-se quando a fronteira do domínio coincide com um divisor de águas subterrâneas ( $q_n=0$ ); se ao longo de todo o contorno a condição é do tipo Neumann, será necessário especificar pelo menos um ponto com carga hidráulica conhecida para que o problema torne-se determinado (WENDLANDER, 2003)

Equação 10

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial n}$$

3. **Condição de Cauchy:** *Condição de fluxo dependente da carga* consiste de uma combinação linear da carga hidráulica e do fluxo, empregado em situações de contorno semipermeável. O fluxo é calculado com base na diferença entre a carga hidráulica calculada e a especificada.

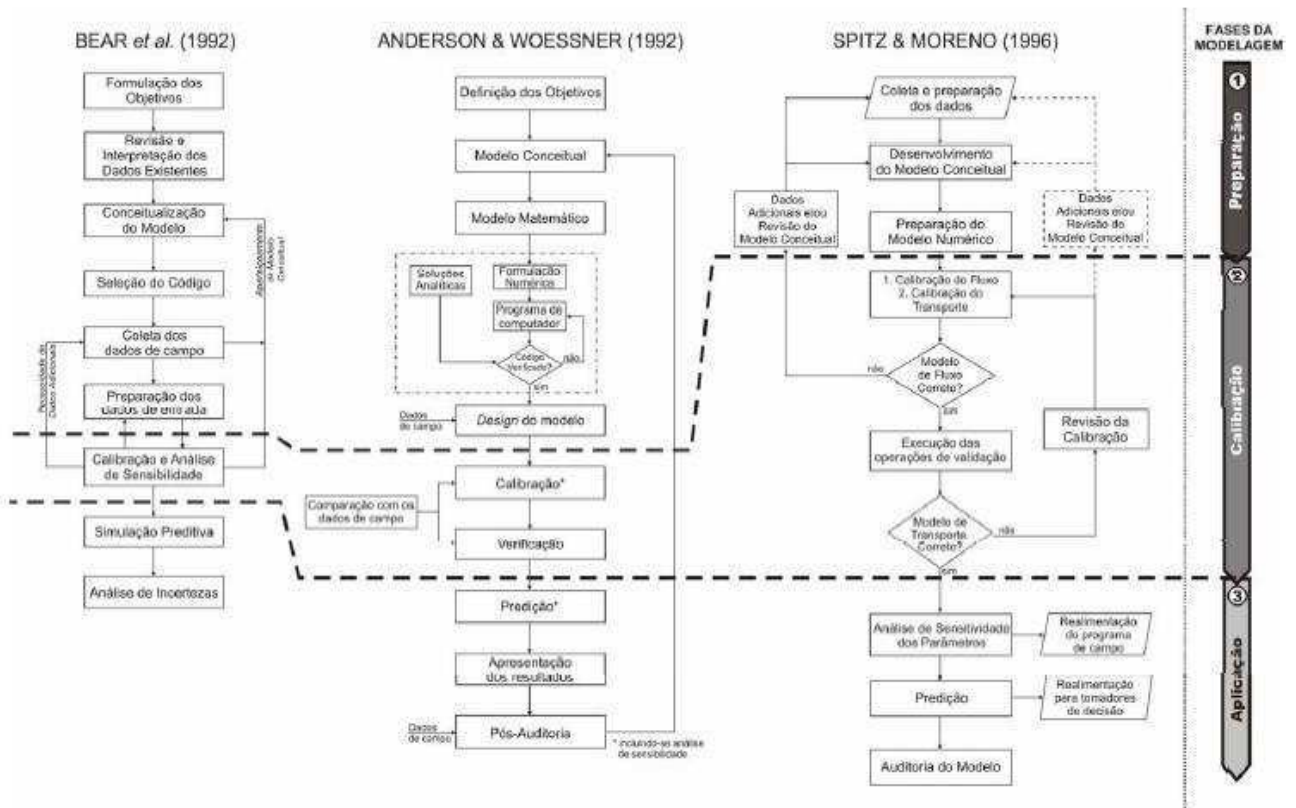
Equação 11

$$a.q_n - b.h = c$$

Condições iniciais são indispensáveis em simulações de modelos não-permanentes, principalmente quando estes estão associados ao transporte de massa. A simulação desse tipo de regime solicita inicialmente valores de cargas hidráulicas, visto que os valores das cargas calculadas em determinado espaço de tempo, dependem dos valores anteriores. É comum obtenção de condições iniciais utilizando a simulação em regime permanente.

Para a adequada simulação de fluxo de água subterrânea, Alberto (2005) menciona um fluxograma denominado Protocolos para Aplicação de Métodos Matemáticos, que pode ser observado na Figura 5, o qual descreve o esboço metodológico e as etapas contidas no processo de simulação matemática, elaborado por vários autores.

Figura 5 – Protocolos para Aplicação de Modelagem Matemática.



Fonte: Alberto, 2005.

### 3.9 MÉTODOS DE MODELAGEM NUMÉRICA

Os dois principais métodos de solução numérica são os métodos de diferenças finitas e de elementos finitos. No método de elementos finitos a equação de fluxo é aproximada por integração, enquanto que no método de diferenças finitas a aproximação é feita mediante diferenciação. (ANDERSON & WOESSNER, 1992)

As principais diferenças entre os supracitados métodos dizem respeito a forma de discretização do domínio do modelo. Enquanto que o método de diferenças finitas tem sua discretização efetuada em malha retangular, com linhas sempre ortogonais umas às outras, no método de elementos finitos a discretização se dá através de malhas diversas, regulares ou irregulares, triangulares ou quadrangulares, o que permite uma melhor adequação da malha ao contorno hidrogeológico e às condições hidráulicas.

Como diferença entre tais métodos, pode-se ainda mencionar que no método de diferenças finitas os valores dos parâmetros calculados para o nó, que é o elemento principal, são extrapolados para as células que estes representam, enquanto que no método de elementos



finitos os valores das células são calculados por interpolação dos nós que a circundam. (ALBERTO, 2005)

### 3.10 SOFTWARES PARA MODELAGEM

Entre os softwares de modelagem de águas subterrâneas amplamente utilizados estão o MODFLOW e o FEFLOW, que empregam o método de diferenças finitas e o método de elementos finitos, respectivamente. Muitos são os trabalhos nos quais é possível destacar o uso de tais softwares, como, por exemplo, Gonçalves (2013), utilizou Feflow para estudos na bacia do Rio Grande, enquanto que De La Cruz (2014) utilizou tal software para realizar controle de águas na mineração. O Modflow por sua vez, diz respeito a um pacote mais clássico, com várias aplicações, tais como Carvalho (2013), Vieira (2002), Alves (2016).

Anderson e Woessner (2002) destacam o Feflow como modelo numérico de elementos finitos mais adequado para fluxo de água subterrânea, visto sua versatilidade de trabalhar com geometrias complicadas, contornos irregulares, condições de contorno internas ao domínio, bem como, conforme destacado por Barreto (2010) suporta muito bem malhas pesadas com grande número de elementos, necessário aos problemas de modelagem de bacias.

Além disso, ressalta-se a vasta utilização do programa computacional MODFLOW (que utiliza diferenças finitas) em trabalhos anteriores realizados na mesma área de estudo como Vieira (2002), obtendo resultados sempre satisfatórios. Com isso, o uso de software diferente enriquece o banco de dados da área de estudo, bem como fomenta comparações entre dados atuais e anteriormente obtidos.

### 3.11 PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

De forma a garantir a precisão dos resultados fornecidos pela simulação, bem como sua concordância com os resultados de campo é de extrema importância a etapa de calibração. Tal etapa consiste basicamente em ajustar os valores das cargas computadas com as cargas reais medidas em campo (WANG & ANDERSON, 1982).

Dessa forma atribui-se ao modelo os valores de parâmetros hidrodinâmicos incertos ou não disponíveis, tais como condutividades hidráulicas ou transmissividade, ou mesmo as próprias condições de contorno (ALBERTO, 2005). A etapa de calibração pode ser feita manual ou automaticamente usando algum critério de ajustamento, um exemplo destes é o da minimização dos erros quadráticos (CLEARY, 2007).

A calibração por ser realizada pelos métodos: tentativa e erro, métodos automatizados, ou por combinação de ambos. (DE LA CRUZ, 2014)

### **3.11.1 Calibração manual Tentativa e Erro**

Tal método consiste em trocar os parâmetros de entrada no modelo manualmente, de forma a atingir o melhoramento entre a relação entre os parâmetros de saída do modelo com os valores dos parâmetros obtidos em campo. A principal vantagem que este método possui diz respeito a sensibilidade/percepção que o modelador adquire com relação aos dados do modelo.

### **3.11.2 Calibração Automatizada**

A estimativa de parâmetros automatizada envolve o uso de um ou mais códigos computacionais especialmente desenvolvidos para realizar a calibração do modelo, os quais já resolvem o problema inverso. Atualmente, existem diversos códigos consagrados capazes de resolver esses métodos. Um dos softwares mais utilizados para a calibração de modelos de águas subterrâneas é o PEST, o qual já possui interface interativa com diversos modeladores modernos, como o FEFLOW.

### **3.11.3 Dados necessários para calibração**

Para a realização de uma calibração adequada é necessária uma quantidade adequada de dados de níveis (observados) os quais devem estar idealmente distribuídos por todo o modelo, e no caso da calibração em regime transiente, uma distribuição espacial e temporal se faz necessário.

Para compensar o efeito do acréscimo de não singularidade durante a calibração, devido ao fato de que diferentes conjuntos de parâmetros podem produzir saídas aproximadamente idênticas, a adição de um parâmetro de controle é indicada, tais como fluxos de saída ou pressões conhecidas no campo.

### **3.11.4 Avaliação da Calibração**

#### **3.11.4.1 Avaliação Qualitativa**

Conforme a ASTM (D5490-93) (2002) uma avaliação qualitativa deve considerar alguns aspectos, tais como:

- a) *As características gerais do fluxo*

Tal avaliação consiste em usar distribuições espaciais dos padrões de fluxo de águas subterrâneas baseados em planos potenciométricos e compará-los com o campo de fluxo obtido após o processo de simulação, verificando, portanto, o aparecimento de incoerências.

*b) Condições hidrogeológicas*

A identificação de diferentes condições hidrológicas representadas pelos dados disponíveis é necessária. Escolher um conjunto de dados a partir de cada condições hidrológica a ser usada na calibração, e usar o restante na sua verificação.

Conforme a ASTM (D5490-93), 2002, quando só um conjunto de dados é disponível não é aconselhável separar artificialmente dados para calibração e para verificação. Nesse caso é mais importante calibrar os dados de cargas piezométricas que abrangiam todo o modelo.

### 3.11.4.2 Avaliação quantitativa

Existem muitos métodos para avaliação quantitativa a respeito do ajuste entre parâmetros medidos e modelados. A seguir encontram-se algumas avaliações estatísticas mínimas, recomendadas pela ASTM (D5490-93), 2002, as quais devem ser desenvolvidas em um modelo hidrogeológico.

*c) Carga Potenciométrica Residual*

Diz respeito aos residuais (diferenças) entre as cargas medidas e as cargas observadas, conforme Equação 12.

Equação 12

$$r_i = h_c - h_m$$

Onde  $r_i$  é o residual,  $h_m$  é carga hidráulica medida e  $h_c$  é a carga hidráulica calculada.

*d) Erro Médio (ME)*

É a média ponderada entre a carga hidráulica medida ( $h_m$ ) e a carga hidráulica calculada ( $h_c$ ), onde  $W_i$  corresponde aos pesos atribuídos pelo modelador e  $n$  corresponde ao número total de dados comparados, conforme Equação 13.

Equação 13

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i (h_m - h_c)_i$$

e) Erro Médio Absoluto (MAE)

É a ponderação dos residuais absolutos, ou seja, o módulo da diferença entre carga hidráulica medida ( $h_m$ ) e a carga hidráulica calculada ( $h_c$ ), atribuídos os pesos  $W_i$  para as  $n$  amostras totais.

Equação 14

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W_i(h_m - h_c)_i|$$

f) Raiz do Erro Médio Quadrático (RMS)

É a raiz quadrada das médias das diferenças entre os valores comparados e valores medidos, ao quadrado, destacado na Equação 15.

Equação 15

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [W_i(h_m - h_c)_i]^2}$$

g) Coeficiente de correlação (R)

O coeficiente de correlação R é uma medida da correlação do conjunto de dados, e  $R^2$  é o coeficiente de determinação. O cálculo de R requer a média e o desvio padrão das cargas hidráulicas calculadas e medidas.

h) Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

Uma das formas de avaliar a qualidade do ajuste do modelo é através do coeficiente de determinação. Basicamente, este coeficiente indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados. O coeficiente de determinação é dado pela Equação 16.

Equação 16

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})Y_i}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})Y_i \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})Y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})Y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

### 3.12 SOFTWARES DE CALIBRAÇÃO

PEST é um software livre, desenvolvido por John Doherty (Watermark Numerical Computing), o qual é largamente usado na modelagem ambiental para calibração de modelos, determinar a incerteza associada a parâmetros e previsões, e atividades afins. Atualmente, o PEST é provavelmente o software mais usado para a calibração de modelos de águas subterrâneas.

Entretanto, o PEST fornece muito mais do que a calibração. Além de auxiliar o modelador em tarefas de calibração clássica, ele implementa métodos que abordam a não unicidade dos resultados da calibração, dado que a previsão dada por um modelo calibrado é apenas uma dentre muitas possibilidades. (DIERSCH, 2009)

Em vez de fornecer apenas um modelo calibrado, o PEST visa analisar o espectro de possíveis soluções e, conseqüentemente, a faixa de incerteza associada a parâmetros e previsões. Naturalmente, esses métodos (tanto para a calibração tradicional quanto para análise de incertezas) devem ser aprendidos e compreendidos antes que possam ser aplicados com sucesso.

Em um nível mais técnico, o PEST pode ser visto como uma caixa de ferramentas de diferentes programas para configurar, executar e avaliar os resultados de uma tarefa específica (por exemplo, calibração).

A extensão FePEST diz respeito a uma extensão do software FEFLOW a qual permite a interação entre o modelo e o PEST com uma interface bastante simples. Com o FePEST é possível usar uma variedade de funcionalidades PEST sem a necessidade de aprender a sintaxe de suas várias ferramentas de linha de comando e arquivos de configuração, e adaptar manualmente os arquivos de modelo do FEFLOW para uso em PEST. Dentre algumas funcionalidades estão:

- a) Calibração do modelo;
- b) Métodos de subespaço;
- c) Paralelização (localmente e / ou usando servidores remotos, incluindo transferência de arquivos);
- d) Análise de sensibilidade linear;
- e) Análise preditiva (avaliação de pior / melhor caso);

### 3.13 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um conjunto de ferramentas computacionais capaz de capturar, armazenar, manipular e analisar informação geográfica (BURROUGH, 1998). Um aspecto muito importante de se trabalhar com SIG diz respeito à facilidade e efetiva manipulação, bem como análise de dados associados a fenômenos geográficos. A produção de informação, utilizando dados já existentes através de combinação de comandos e funções constitui o modelo básico de funcionamento de um SIG (OGC, 1996).

Em um software SIG é possível trabalhar com informações provenientes de sensoriamento remoto, de GPS e de geoprocessamento, o que permite extrair uma diversidade de informações com muitas aplicabilidades. Os trabalhos com mapas digitais têm fundamental importância no que diz respeito a projetos multidisciplinares, tanto para caracterização da área de estudo, como para compilação de dados de interesse que podem ser usados em outros programas, a exemplo do projeto em questão, no qual através de ambiente SIG, é possível gerar e visualizar informações em mapas para diversos usos, dentre eles a modelagem numérica.

## 4 METODOLOGIA

A construção do modelo matemático aplicada ao caso de estudo já fora anteriormente iniciada em projeto de iniciação científica (COSTA & RÉGO, 2017), sendo o presente projeto a etapa seguinte no que diz respeito à modelagem, destacada a importância.

A fase inicial para o cumprimento do escopo deste trabalho refere-se à etapa de revisão bibliográfica, em que foram realizadas pesquisas em diversos livros, revistas, artigos, dissertações, de forma a obter familiarização com o tema de hidrogeologia, modelagem e aquíferos aluviais, bem como coletar/processar dados obtidos através do Projeto Bramar e em pesquisas anteriores acerca da área de estudo.

Com base nisso, com intuito de aprimorar o modelo já iniciado, foram adicionados novos parâmetros, como a taxa de evapotranspiração, contemplando a espacialização da variação de parâmetros já adicionados, como condutividade, antes atribuída com valor constante. Alterações na malha e parâmetros de elevação também demandaram ajustes.

Após isso, foi feita a revisão do modelo conceitual que melhor representa o sistema aquífero físico, e com isso, necessariamente, as condições de contorno. Essa etapa foi realizada em consonância com os cenários a serem analisados. Em seguida, realizou-se a etapa de calibração do modelo, em que é feito o ajuste de parâmetros hidrogeológicos do modelo (condutividade), de forma a ajustar os resultados de níveis calculados pelo programa, com os dados medidos nas campanhas de monitoramento.

Finalmente, após a calibração, foi desenvolvida a simulação de cenários representativos de condições encontradas em campo, de forma a obter resultados reais, bem como foram simulados também cenários hipotéticos passíveis de execução no âmbito da gestão de recursos hídricos, permitindo assim previsões acerca de alternativas de manejo.

Figura 6 – Fluxograma de execução metodológica do trabalho.

|  |  |
|--|--|
| Aprimoramento do modelo existente                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Melhoramento de dados topográficos e sondagens;</li> <li>•Melhoramentos da malha;</li> </ul> |
| Revisão de modelo conceitual e condições de contorno | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Definição de modelo transiente e permanente;</li> </ul>                                      |
| Calibração   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Realizada para 3 datas;</li> <li>•Níveis médios, baixos e altos;</li> </ul>                  |
| Simulação de Cenário                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Cenário 1 (2 ciclos simulados)</li> <li>•Canário 2 (1 ciclo simulado)</li> </ul>             |

Fonte: Alberto, 2005.

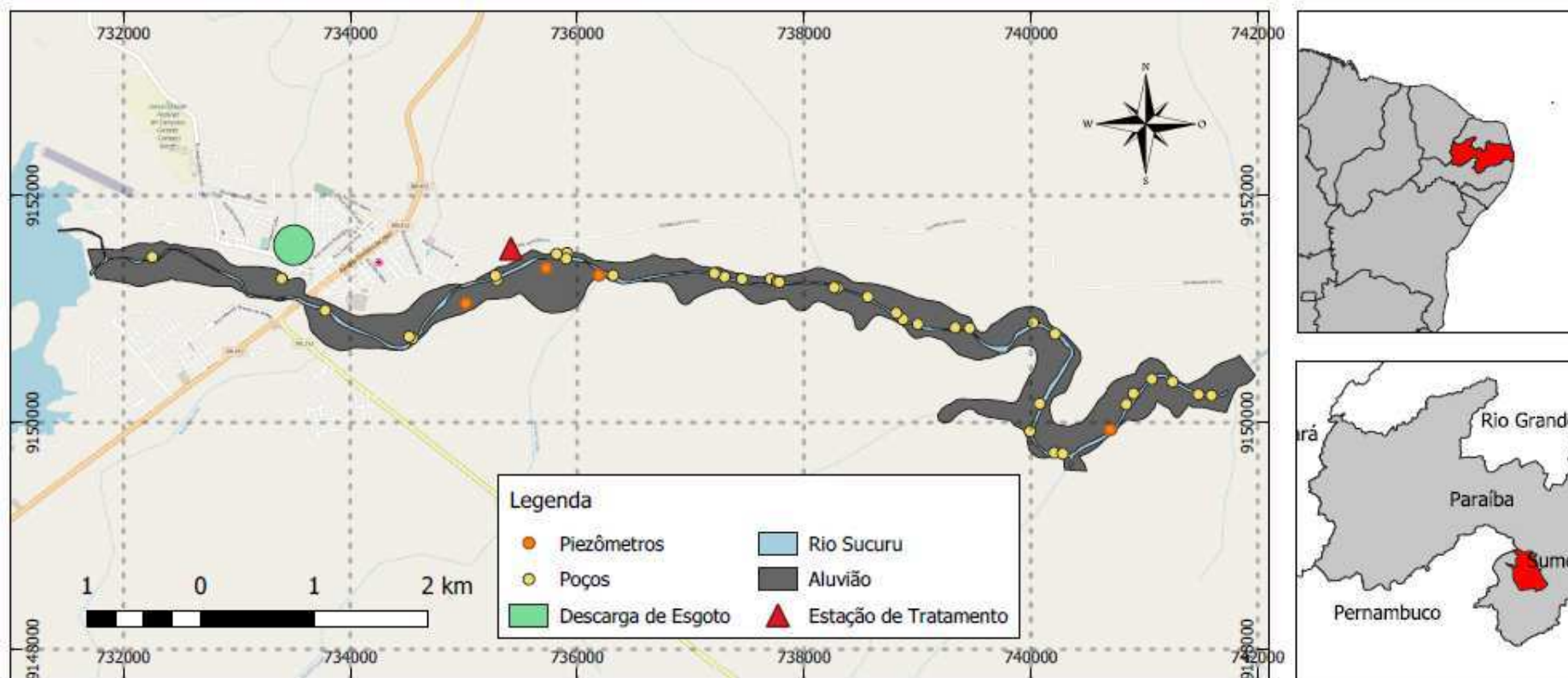
#### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 7) encontra-se na microrregião dos Cariris Velhos do Estado da Paraíba, diz respeito ao pacote aluvial que se estende desde a jusante do reservatório de Sumé, até o limite do Perímetro Irrigado, a qual compreende maior número de dados de monitoramento de nível de água, dados cartográficos, e inclusive número de locais de exploração ativos.

Em se tratando de suas características dimensionais, a porção do aquífero que compreende o perímetro irrigado possui área de 3,52 km<sup>2</sup>, extensão de aproximadamente 14 km e perímetro de 27,84 km. Neste trecho encontram-se 42 poços, dos quais a grande maioria encontra-se ativa, 16 piezômetros (sendo 2 destes equipados com medidores automáticos), 3 barragens subterrâneas, uma estação de tratamento de esgoto que lança seu efluentes sobre o rio, além de uma descarga de esgoto não tratado próximo à barragem municipal.



Figura 7 – Mapa de Localização da Área de Estudo.



Fonte: (O Autor, 2018)

## 4.2 OBTENÇÃO DE DADOS

A aquisição e melhoramento dos dados é etapa imprescindível para a realização qualquer simulação, de forma que é necessário que os dados representem fielmente o comportamento de campo, quando utilizadas no modelo.

Tendo em vista que o modelo já se encontra construído e parametrizado, os dados serão utilizados em seu refinamento e na calibração do modelo, essencialmente dados de níveis de poços, os quais foram coletados através do projeto BRAMAR.

### 4.2.1 Dados de elevação

Os dados de elevação, ou dados topográficos são provenientes de levantamentos realizados pelo departamento nacional de combate a secas, disponibilizados em curvas de nível de metro a metro da região de estudo. Tais dados foram tratados em ambientes SIG, e validados mediante novos levantamentos realizados com uso de GPS geodésico.

A partir disso, foi gerado um modelo numérico de terreno para a elevação, a partir do qual foi possível obter os dados topográficos de todos os poços, piezômetros e sondagens, bem como a definição da topografia de todo o aquífero na região de estudo.

### 4.2.2 Litologia

Os dados de litologia são provenientes de sondagens realizadas por Vieira (2002), bem como sondagens recentes realizadas pelo projeto Bramar. A partir de tais dados foi realizada interpolação no próprio software de modelagem, para a obtenção da superfície correspondente à base de contato com a formação impermeável.

### 4.2.3 Dados de condutividade e porosidade

Os dados de condutividade utilizados na parametrização inicial do modelo são provenientes de teste de bombeamento realizados por Vieira (2002), a partir dos quais foi possível a determinação de características do aquífero, assumidas, portanto para todo o aquífero, em primeira análise, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros hidráulico médios obtidos em teste de bombeamento.

| Condutividade Hidráulica K<br>(m/s) | Porosidade Eficaz S | Transmissibilidade T (m <sup>2</sup> /s) |
|-------------------------------------|---------------------|--|
| $7,87 \times 10^{-4}$               | 10%                 | $4,76 \times 10^{-3}$                    |

Fonte: Vieira (2002).

#### 4.2.4 Monitoramento de Nível Estático

Visando verificar o comportamento do aquífero, bem como monitorar a evolução temporal no nível freático, vem sendo realizada a medição do nível estático em 42 poços da área e em 16 piezômetros perfurados pelo projeto BRAMAR. As leituras são realizadas a cada 15 dias, desde de abril de 2015, e três dos piezômetros tem dados registrados a cada 30 minutos, através de medidores automáticos, desde novembro de 2015. Os dados de nível estático são importantes ainda para o balanço hídrico e para etapa de calibração.

Dada sua importância, realizou-se, pois, uma análise inicial para reconhecimento e apropriação dos dados, com a qual foi possível idealizar o comportamento do aquífero, desde recargas, estiagens e outros. Além disso, essa etapa foi fundamental para identificação de erros, possibilitando a correção e validação destes dados. Os erros encontrados no monitoramento vão desde erros de medição do nível pelo operador, bombeamento no horário da medição, aumento da altura útil do poço, erros na profundidade do poço, dentre outros.

#### 4.3 PROCESSAMENTO E REFINAMENTO DOS DADOS

De forma a aprimorar o modelo já existente, foi realizada tratamento dos dados de níveis estáticos, os quais seriam utilizados como condições de contorno, assim como pontos de observação. Esses dados foram estudados, de forma que foi possível identificar erros provenientes da coleta (manual ou automática) dos dados, assim como comportamentos atípicos do aquífero, e com isso foi realizado o procedimento manual de preenchimento e correção de falhas aos dados de nível.

Ao fim, foram selecionados os poços que obtiveram os melhores comportamento no decorrer das séries temporais, bem como as datas que obtinham maiores percentuais de dados, de forma a não comprometer os resultados.

Para o trabalho com o modelo, foi necessário inserir melhores dados topográficos, estes ainda provenientes de curvas de níveis fornecidas pelo DNOCS, porém agora validados em

campo com uso de GPS geodésico, que corresponde a uma importante etapa da parametrização do modelo. Além disso, foram inseridos mais alguns dados de sondagens, provindos de levantamentos realizados pelo projeto BRAMAR.

#### 4.4 MODELO CONCEITUAL

As hipóteses descritas são corroboradas por estudos anteriores, que envolvem pesquisa bibliográfica, bem como campanhas de visitas de campo com perfuração de poços e recolhimento de dados. Assim, tal etapa visa obter, de forma simplificada, as condições e formulações que regem o comportamento do sistema aquífero, para garantir respostas adequadas aos propósitos do trabalho. Menciona-se ainda que tais condições são tomadas como iniciais, entretanto passíveis de reformulações conforme o desenvolvimento do projeto.

- a) O pacote aluvial simulado será o de maior capacidade, compreendido na área em torno do curso d'água principal;
- b) O sistema a ser considerado é composto por um aquífero aluvial que se estende desde o reservatório de Sumé, até o limite do perímetro irrigado, uma vez que há maior quantidade de dados;
- c) Admite-se a continuidade do pacote aluvial, sendo considerado, portanto, o limite de jusante da área simulada representado por condição de carga hidráulica variável, permitindo a interação com parte restante do aquífero, não simulado.
- d) Admite-se que a camada abaixo do sistema aquífero do Rio Sucuru é impermeável, atestado pela presença de formação cristalinas. Isso implica uma condição fluxo vertical nulo, caracterizando simulação 2D horizontal;
- e) O aquífero é do tipo livre, ou freático, em toda sua extensão, não havendo camadas confinantes registradas.

#### 4.5 O MODELO UTILIZADO

O modelo que será utilizado, foi desenvolvido por Costa (2017), e encontra-se ilustrado na Figura 8. Este modelo foi desenvolvido no software FEFLOW, e já foi parametrizado para alguns dados, como os de condutividade em camada única de simulação, porém ainda não se encontra calibrado.

O modelo de interesse conta com uma malha de pouco mais de 10 mil elementos finitos (triângulos irregulares), com 5530 nós iterativos, conforme Figura 8. Há um maior refinamento nos locais onde serão simulados os poços e piezômetros de forma a permitir uma correta atribuição de parâmetros, bem como verificação de resultados. Não há elementos que possuam ângulo obtuso maior que 120°, e apenas 14,7% possuem ângulo acima de 90°, caracterizando uma malha de boa qualidade, conforme Gonçalves (2013) afirma.

Os modelos de elevação e espessura das camadas, representados na Figura 9, se mostraram bem representados e condizentes com os dados já obtidos. O modelo apresentou uma espessura média de 5,21 m.

A capacidade volumétrica de armazenamento, obtida a partir dos elementos do modelo, como sendo o produto do volume do pacote aluvial pela porosidade eficaz do aquífero (10%), foi de 1,846 milhões de m<sup>3</sup>, que corresponde a cerca de 4,14% da capacidade do reservatório de Sumé, o qual conta com 44,6 milhões de m<sup>3</sup>. Isso caracteriza um aquífero de pequenas dimensões, em comparação com aquíferos regionais.

#### 4.6 DELIMITAÇÃO TEMPORAL

Com intuito de fornecer a melhor compreensão dos passos que são seguidos no modelo, aqui encontram-se as definições temporais utilizadas no modelo.

No que diz respeito aos dados coletados de níveis estáticos, tem-se este constam desde 22 de abril de 2015, e vão até 09 de abril de 2018, com medições a cada 15 dias.

Com relação a simulação em regime permanente foram utilizados dados mensais desta série, de forma a obter a conformação de volumes e condições iniciais do regime permanente mês a mês.

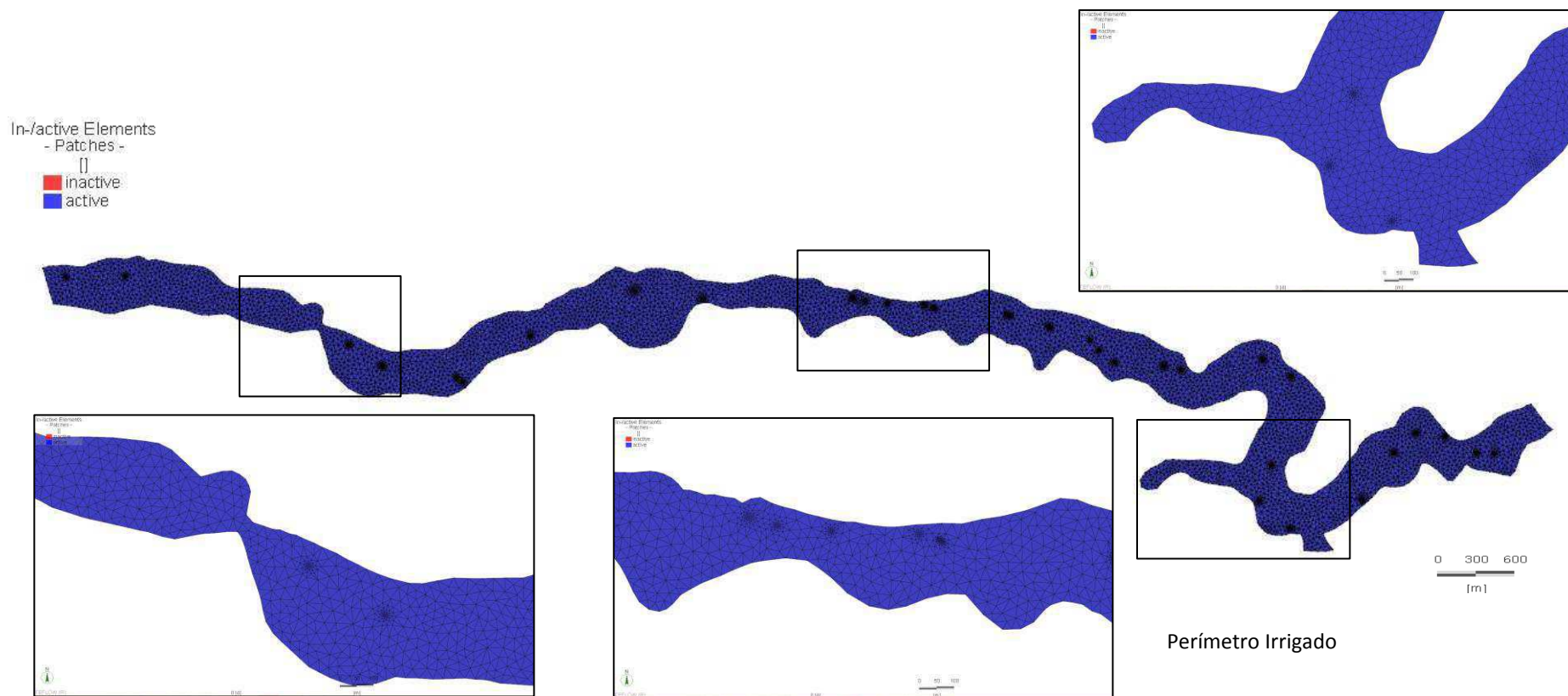
Para realização da calibração foram selecionadas 3 das datas mencionadas acima, conforme destacada em tópico específico.

Em se tratando da simulação de cenários, tem-se que esta dá continuidade a série de dados coletados, dessa forma a data inicial, bem como as condições iniciais de carga na simulação de

cenários correspondem a data 09 de abril de 2018, onde os níveis encontram-se altos. A partir dessa data foram simulados 1 ou 2 ciclos (de 3 meses) para cada um dos cenários, conforme necessidade. Dessa forma, os períodos de simulação correspondem a Maio, Junho e Julho para o primeiro ciclo de simulação, e Agosto, Setembro e Outubro para o segundo, quando realizado.

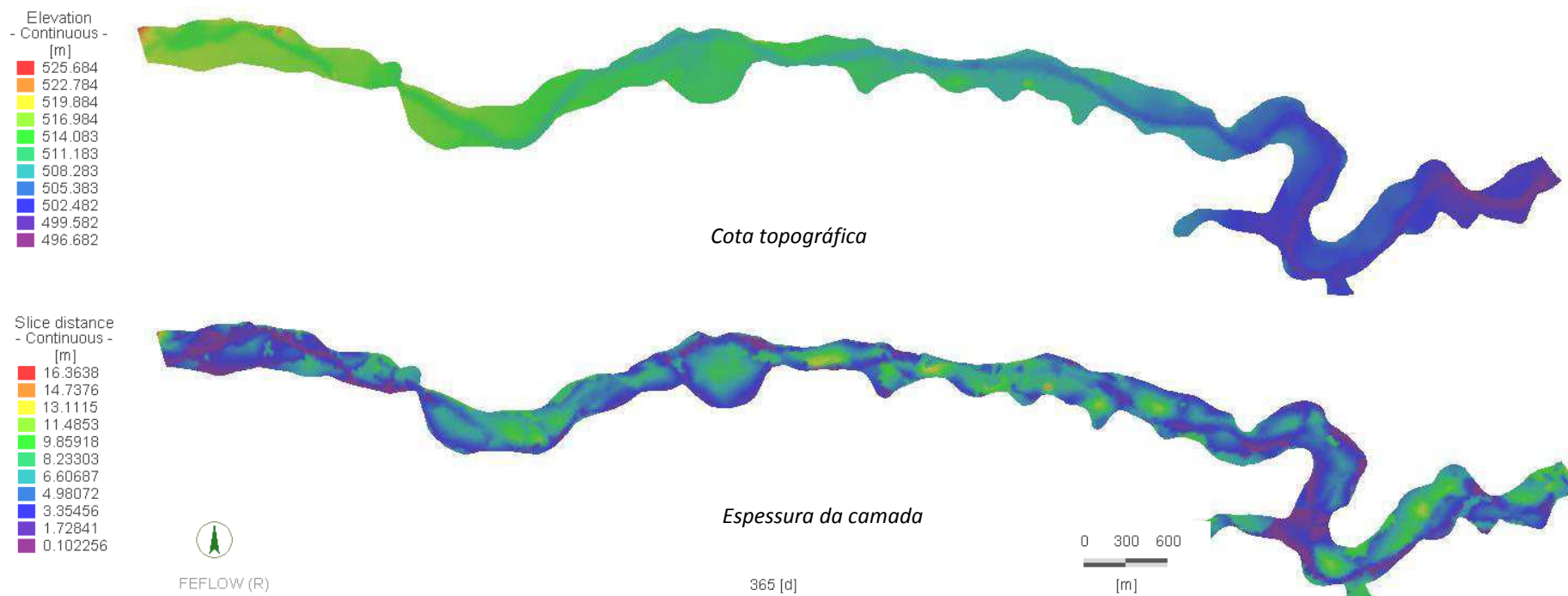
Os ciclos de cultivo são períodos onde por literatura é possível realizar a plantação e colheita das culturas de milho e capim, e correspondem a um período de 3 meses, ou 90 dias. Diante disso, foram simulados cenário de prática de apenas um ou até dois ciclos de cultivo, partindo da data inicial.

Figura 8 – Malha de elementos finitos da área de estudos.



Fonte: (O Autor, 2018)

Figura 9 – Mapa de espessuras e elevações do modelo.



Fonte: (O Autor, 2018)



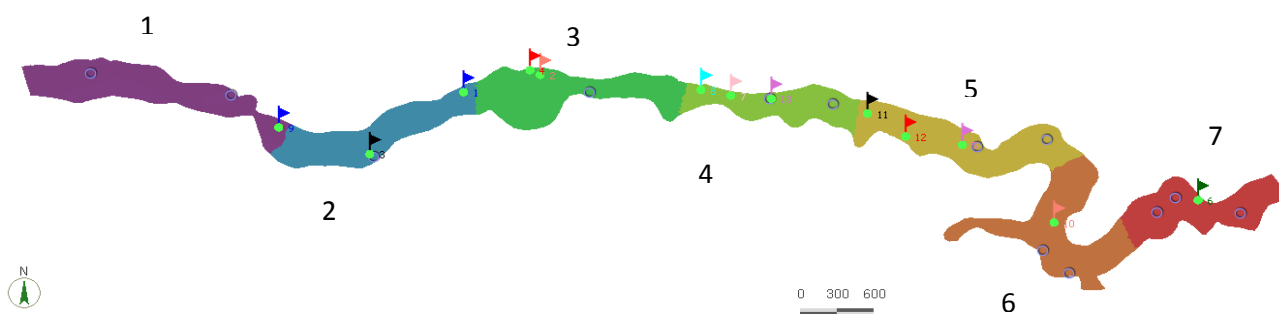
#### 4.7 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Nas análises iniciais, foram realizadas simulações em regime permanente a partir da informação das cargas hidráulicas medidas especificadas, de forma a obter para diferentes datas a distribuição de carga hidráulica, assim como dados de volume armazenado, condições de carga hidráulica permanente, e outros. É importante mencionar que tais análises foram importantes para compreensão do sistema e definição das condições iniciais, condições de contorno e dos cenários.

A calibração da condutividade é feita em regime permanente. Em relação ao modelo, foram adicionadas 07 zonas de condutividade, as quais foram definidas com bases nos perfis litográficos da área de estudo, em que foram identificadas áreas com características litográficas semelhantes baseadas nos perfis de sondagens. Tais zonas foram usadas também por Tsuyuguchi et al. (2017), e serão utilizadas para a calibração do modelo.

Foram definidas como condição de contorno, cargas especificadas em 13 poços, as quais seriam fixas na simulação. Foram adicionadas também para cada data 13 poços de observação, conforme definidos. Na Figura 10 ilustram-se as condições de contorno e poços de observação usadas.

Figura 10 – Condições de Contorno (Regime Permanente) e Poços de Observação.



Fonte: (O Autor, 2018)

Os dados mencionados foram levados para ambiente FePEST, interface FEFLOW que permite acesso ao pacote de algoritmos de calibração PEST, onde foram configurados em condições padrão, de forma a obter o melhor ajuste dos dados.

Para a calibração foram utilizadas as zonas de condutividade descritas, cujo valor inicial adotado foi a condutividade destacada por Vieira (2002), utilizadas as cargas e condições de contorno do modelo em estado permanente, assim como os dados dos postos de observação, para cada data, conforme Figura 10.

Esta etapa foi realizada para três diferentes instantes do aquífero, os quais correspondem a diferentes condições de níveis do aquífero, assim como também de diferentes situações de distribuição, recarga e exploração registrada, visando obter padrões de variação e condutividades, as três diferentes datas, a saber:

- a) 07/11/2016, que corresponde a um percentual de 49,77% do volume, e diz respeito a uma situação com níveis intermediários;
- b) 23/06/2017, correspondente a um volume 39,19% do volume, e representa situação de níveis já bastante baixos;
- c) 26/03/2018, correspondente a níveis já elevados do aquífero em período chuvoso, 57% do volume.

#### 4.8 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

A simulação de cenários foi realizada em regime transiente, visando obter respostas do modelo para o regime de exploração do aquífero, diante de possibilidades de demanda.

Os dois cenários simulados são descritos:

- a) Demandas para continuidade do cultivo de capim e milho ao fim de estação chuvosa de elevada precipitação por um ou mais ciclos
- b) Demanda necessária à reativação de 1/4 do perímetro irrigado, para um ou mais ciclos de cultivo, em regime de seca, logo após alta nos níveis do aquífero.

A simulação de cenários será realizada em regime transiente, com passos de tempo de sete dias, que correspondem a metade do período de coleta de dados de nível, e realizando simulações totais múltiplas de 3 meses, uma vez que este valor corresponde ao ciclo de cultivo de algumas culturas utilizadas no perímetro.

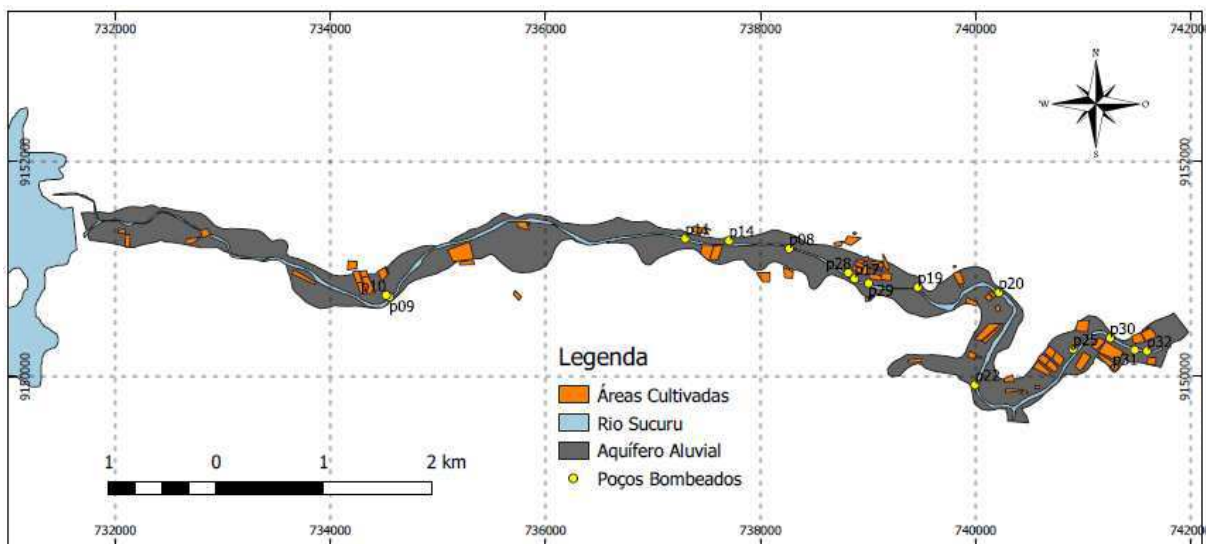
##### 4.8.1 Definição das áreas e cálculo das vazões de bombeamento

As vazões utilizadas atendem a demanda do cultivo de algumas culturas no aquífero aluvial. Para o primeiro cenário, foram calculadas vazões de forma a atender as áreas atualmente irrigadas na área de estudo, conforme consta levantamento realizado pelo projeto BRAMAR no início do ano de 2018, em que tem-se catalogados os lotes nos quais há produção agrícola registrada, bem como sua área, e quais as culturas praticadas.

No cenário 1, serão consideradas as áreas que cultivavam cultura de milho ou capim, dado a importância dessas em períodos de seca para criação de animais, e consumo próprio,

possuindo cultivo majoritário, as áreas consideradas correspondem a maiorias das áreas destacadas na Figura 11.

Figura 11 – Mapa das áreas cultivadas na cidade de Sumé, em 2018.



Fonte: BRAMAR (2018).

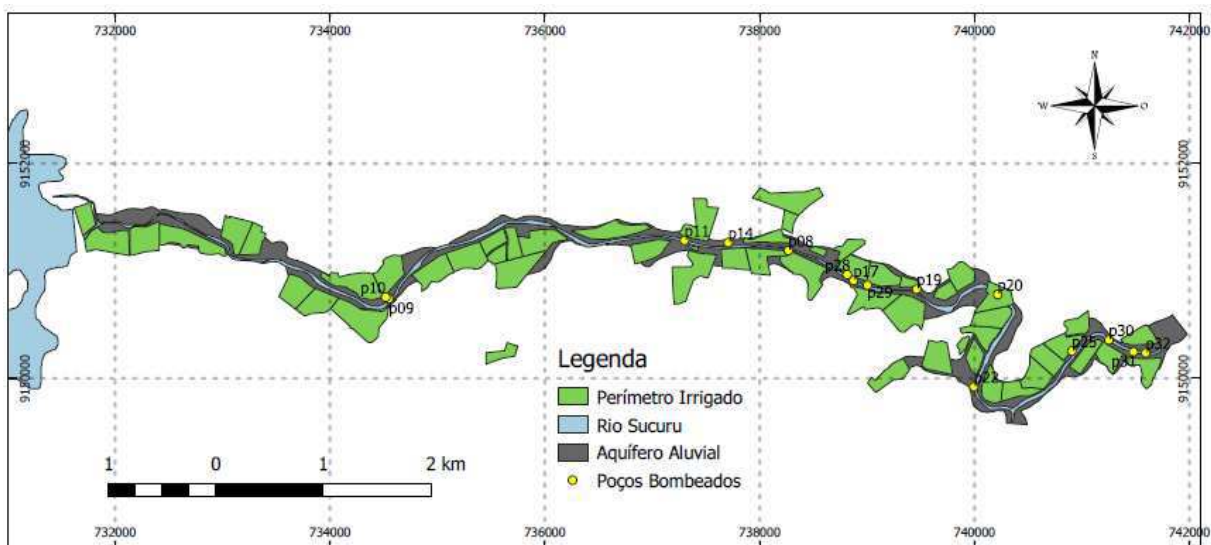
Tais áreas foram levantadas em ambiente SIG, e associadas aos poços respectivos presentes nos lotes, e a partir daí foi realizado o cálculo com base no consumo de água para as culturas, utilizou-se um consumo de 2,24 l/dia/m<sup>2</sup> de área cultivada de milho ou capim, conforme indicado por Vieira & Rêgo (2015), que apresentam consumo similar. Na Tabela 2, destacam-se as vazões utilizadas.

De maneira geral, tem-se consumo total diário de 650 m<sup>3</sup>/dia, para o primeiro cenário.

Para o segundo cenário, de forma análoga, foram coletadas as áreas de todo o antigo perímetro irrigado delimitado pelo DNOCS que praticavam culturas de capim e milho, objetivando uma análise de viabilidade de reativação, ainda que parcial, dado que constam-se muitas áreas, conforme.

Uma vez coletadas, foram calculadas as vazões com o mesmo consumo, e relacionadas também com os poços do cenários anterior, obtendo uma área total de 287,2 ha, e uma área de 71,8 ha (1/4 da área total), em que já fora realizado o cultivo de milho e capim, caracterizando uma vazão de 110 m<sup>3</sup>/dia para todos os poços.

Figura 12 – Mapa das áreas cultivadas no antigo Perímetro Irrigado.



Fonte: BRAMAR (2018).

Tabela 2 – Poços e vazão de consumo de culturas, para primeiro cenário.

| POÇOS        | VAZÃO<br>(m <sup>3</sup> /dia) | ÁREA<br>(ha) |
|--------------|--------------------------------|--------------|
| P09          | 42,74                          | 1,91         |
| P10          | 34,82                          | 1,55         |
| P11          | 49,16                          | 2,19         |
| P14          | 36,91                          | 1,65         |
| P08          | 41,48                          | 1,85         |
| P28          | 31,22                          | 1,39         |
| P29          | 68,93                          | 3,08         |
| P17          | 29,56                          | 1,32         |
| P22          | 25,50                          | 1,14         |
| P20          | 33,20                          | 1,48         |
| P19          | 40,90                          | 1,83         |
| P25          | 29,54                          | 1,32         |
| P30          | 89,52                          | 4,00         |
| P31          | 34,02                          | 1,52         |
| P32          | 63,95                          | 2,85         |
| <b>TOTAL</b> | <b>651,46</b>                  | <b>29,08</b> |

Fonte: (O Autor, 2018)

#### 4.8.2 Condições de contorno

As condições de contorno atribuídas foram definidas de forma a garantir as premissas assumidas no modelo conceitual, bem como agregar as contribuições de calibração do modelo executadas.

O modelo transiente foi concebido para simular um cenário correspondente a continuidade do período chuvoso ocorrido na cidade de Sumé no ano de 2018, onde o aquífero atingiu bons níveis. Com base nisso, como condições iniciais de carga hidráulica, foi tomada a distribuição correspondente a simulação do dia 09/04/2018, em regime permanente, a partir de quando houve decréscimo do nível.

Vale lembrar que não serão consideradas entradas no modelo, uma vez que o objetivo do trabalho é verificar o comportamento do modelo para atendimento às demandas impostas, sem contribuição da precipitação.

Foram utilizados os dados de condutividade obtidos pela calibração da data correspondente aos níveis elevados, dia 26/03/2018, de forma a trabalhar com valores mais ajustados.

Não foram assumidas recargas nos períodos simulados, uma vez que o objetivo é verificar o comportamento do aquífero no período de estiagem, onde a pouca pluviometria é característica da região.

Em se tratando das condições de contorno em específico, as laterais do modelo foram tomadas definidas conforme o contato entre aluvião e cristalino, assumindo, portanto, condição de fluxo nulo, assim como a camada de base. A fronteira de montante foi tomada também como não contribuinte em fluxo para o modelo, uma vez que no período analisado não há recargas consideráveis. Já por outro lado a fronteira jusante, foi tomada como carga hidráulica variável com o tempo, cuja taxa de variação foi definida conforme taxas obtidas nos levantamentos em campo para períodos de seca similares, com isso garantindo a continuidade do fluxo para o aquífero a jusante.

Foram atribuídas ainda as condições de bombeamento nos poços situados nos respectivos lotes com cultivo, conforme os dados obtidos, como sendo vazões constantes e definidas para os dois cenários verificados.

Os dados de evapotranspiração real (EVP) são função da evapotranspiração potencial (ETP). Uma vez que a evapotranspiração real é função da umidade do solo, tem-se que esta assume o valor máximo equivalente a ETP quando no solo se dá a umidade de saturação, quando toda a camada encontra-se saturada, bem como assume valores irrisórios para uma certa distância da superfície, cerca de 2m. Dessa forma, os dados de EVP foram implementados por meio de uma função linear, onde esta assume valores cheio equivalentes a ETP, quando os níveis estáticos coincidirem com os de elevação, e decresce linearmente até 0, quando o níveis distam mais que 2m da superfície. Os dados de ETP usados para os meses de Maio, Junho e

Julho, foram destacados por Vieira & Rêgo (2015), os quais foram respectivamente, 79,2; 65,66; e 62,27 mm/mês.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

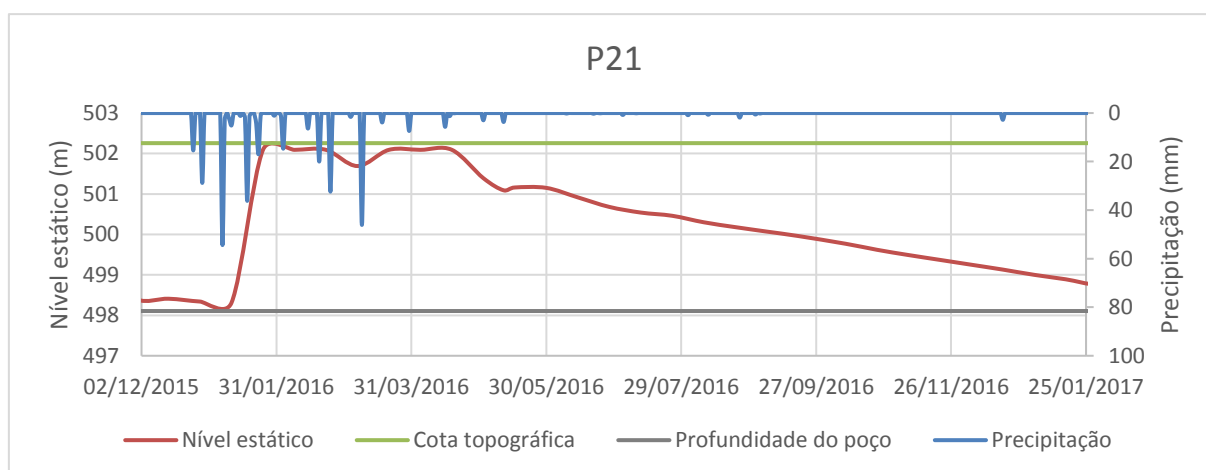
Os resultados encontrados com a realização deste trabalho vão desde os incrementos e aperfeiçoamentos no modelo já existente, passando pela calibração, simulações iniciais e aplicação deste modelo. E não só, serão apresentadas análises relativas aos próprios dados, tanto de níveis quanto de condutividade, conforme abaixo.

### 5.1 DISCUSSÕES ACERCA DOS NÍVEIS DO AQUÍFERO

O nível do aquífero freático é refletido diretamente no comportamento dos poços, quando cessado o bombeamento por tempo suficiente para estabilização, dessa forma as medições dos níveis estáticos correspondem a uma amostra pontual do comportamento do aquífero. Sendo assim, a importância em se ter uma base de dados consistente e confiável é fundamental para o estudo da dinâmica de águas subterrâneas.

Um exemplo bem elucidativo do comportamento do aquífero freático em questão diz respeito ao gráfico do poço P21, conforme Figura 13, o qual exhibe claramente a dinâmica do aquífero, ao iniciar com níveis muito baixos, e logo depois secos, oriundos de um período de estiagem, em seguida é notória uma cheia de tal poço em resposta a um período de precipitação. É possível notar ainda o esvaziamento progressivo durante um longo período de seca, marcado tanto pela exploração da água do aquífero, quanto pela falta de precipitação

Figura 13 – Nível Estático de Poço P21 de monitoramento.



Fonte: BRAMAR (2018).

Uma análise semelhante foi feita por Pontes Filho (2018), que ao analisar poços na área de estudo pôde relacionar os níveis do aquífero com a dinâmica de exploração do aquífero, ainda que qualitativamente. É possível destacar ainda, em encontro com o que apresenta Pontes Filho (2018), que o potencial de recarga com a precipitação é considerável dada a facilidade de infiltração decorrente da litologia da região.

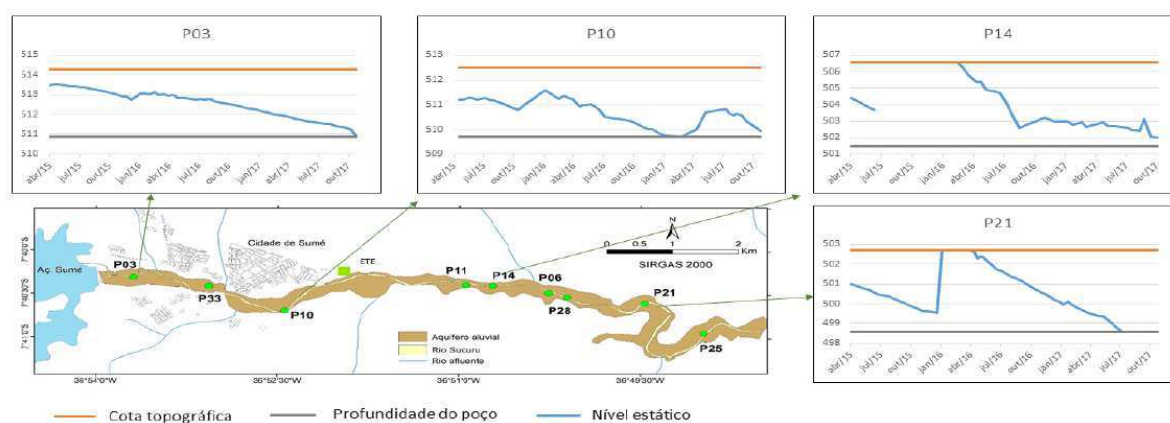
Outro aspecto fundamental na discussão do comportamento do aquífero, diz respeito a espacialização dos resultados, dado que o poço diz respeito a uma amostra pontual, com topografia, litologia, diferentes de outros pontos do aquífero. Sendo assim, a análise do comportamento deve ser dada tanto temporalmente, quanto espacialmente, uma vez que diversos fatores podem alterar o comportamento do aquífero.

A Figura 14, descreve bem o parágrafo supracitado, em que poços em diferentes locais apresentaram diferentes distribuições e comportamentos para a precipitação na área.

Nota-se, portanto, que cada poço possui uma resposta singular aos eventos de precipitação, podendo assim apresentar rápidas respostas de recargas frente às chuvas, caracterizada por uma maior variação dos níveis.

Tal comportamento variável em cada poço está também relacionado a aspectos topográficos e a contribuição de afluentes e recargas de esgotos.

Figura 14 – Variação de níveis estáticos de poços ao longo do aquífero.



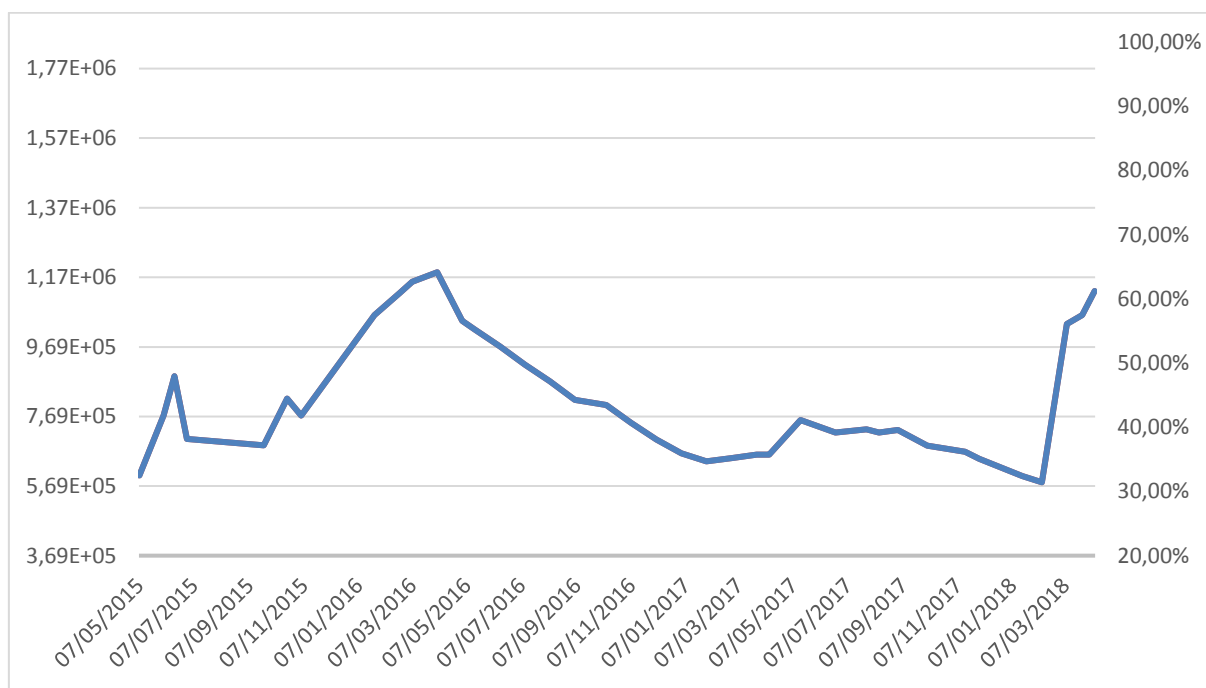
Fonte: Pontes Filho, 2018.

## 5.2 ANÁLISES INICIAIS EM REGIME PERMANENTE

As análises em regime permanente foram realizadas como sendo análises iniciais para verificação do comportamento do aquífero, em datas determinadas. Foram realizadas análises para diversas datas durante o período analisado, permitindo ter ideia do comportamento da descarga ao longo do tempo, e sua distribuição espacial.

Em termos quantitativos destaca-se a evolução do volume de água armazenado no aquífero, ao longo do tempo, em que é possível notar um decréscimo do volume, condizente com o período do longa estiagem, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Evolução do volume do aquífero.



Fonte: Autor (2018).

É possível perceber ainda na Figura 14, que os níveis registrados correspondem a cerca de 65% da capacidade total do aquífero, provenientes de um período de precipitação sazonal abaixo da média. Além disso, é possível destacar a rápida resposta do aquífero tanto a precipitação, quanto aos períodos de estiagem, característico de aquíferos aluviais, os quais apresentam pequena dimensão e, litologia propícia.

Entretanto o que se nota é uma resposta um pouco mais rápida aos estímulos de precipitação, visto que no período analisado, ele recuperou níveis de 34% a 65% da capacidade em um período de 5 meses de precipitações ainda abaixo da média no ano de 2015, enquanto que para o período de estiagem o aquífero que tinha 65% da capacidade de armazenamento preenchida com água, passou para 37% em cerca de 10 meses, no ano de 2016, e de 41% a 30% em 9 meses.

A partir da análise do modelo em regime permanente, várias outras análises puderam ser realizadas, tais como verificação da espacialização dos níveis, e ao analisar vários instantes torna-se possível a identificação do comportamento temporal destes.

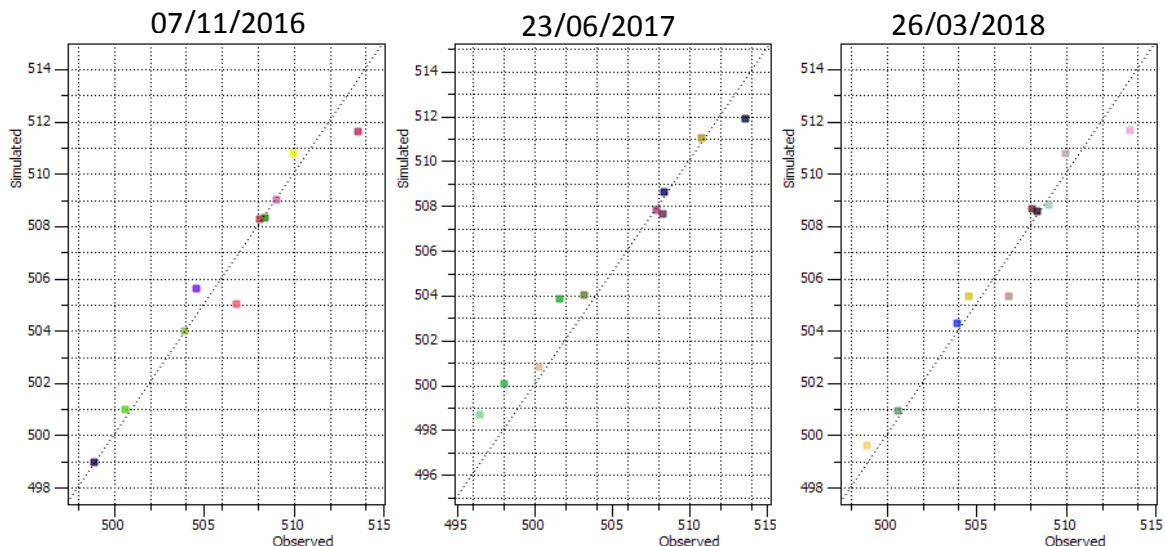


### 5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração apresentou resultados satisfatórios, de forma que foi possível a obtenção de coeficientes de correlação da ordem acima de 0,93 para as datas analisadas, caracterizando uma boa representação dos dados simulados aos observados. Além disso, apresentou NRMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado) baixos valores, da ordem de 10%.

Conforme Figura 16, é possível notar a grande correspondência dos dados estimados com os dados simulados, para as condições de contorno apresentadas, havendo também alguns valores com diferenças superiores a 1m, mas que não afetaram de maneira significativa os coeficientes de correlação. A data de 07/11/2016 foi a que melhor correlacionou os dados observados com os simulados.

Figura 16 – Diagrama de Dispersão de cargas hidráulicas para datas calculadas.



Fonte: O Autor (2018).

As datas representam diferentes instantes da série de dados de nível coletada, e a partir disso é possível discutir a respeito da composição de cada zona em consonância com as condutividades envolvidas.

Tabela 3 – Condutividades hidráulicas obtidas na calibração automática.

|                            | 07/11/2016 | 23/06/2017 | 26/03/2018 | Média  | Desvio |
|----------------------------|------------|------------|------------|--------|--------|
| Zona 1                     | 68,06      | 76,48      | 67,92      | 70,82  | 4,90   |
| Zona 2                     | 28,55      | 12,33      | 6,95       | 15,94  | 11,24  |
| Zona 3                     | 43,19      | 51,16      | 53,43      | 49,26  | 5,38   |
| Zona 4                     | 200,00     | 14,58      | 200,00     | 138,19 | 107,05 |
| Zona 5                     | 24,19      | 31,39      | 18,21      | 24,60  | 6,60   |
| Zona 6                     | 193,45     | 200,00     | 159,50     | 184,32 | 21,74  |
| Zona 7                     | 2,00       | 15,14      | 83,91      | 33,68  | 43,99  |
| RMSE                       | 0,9988     | 1,1158     | 1,4030     |        |        |
| NRMSE (%)                  | 5,984%     | 6,532%     | 9,584%     |        |        |
| MAE (m)                    | 0,7977     | 0,8799     | 1,0701     |        |        |
| Coefficiente de correlação | 0,9881     | 0,9811     | 0,9333     |        |        |

Fonte: O Autor (2018).

A partir da Tabela 3 é possível observar o comportamento característico da zona 01, a qual se apresenta de forma regular com valores próximos aos valores sugeridos por Vieira (2002) em teste de bombeamento, inclusive sendo bem representada pela média das datas.

A Zona 02, também apresenta comportamento característico para todas as datas calibradas, apresentando sempre condutividades reduzidas, em comparação com as demais zonas, sendo também bem representada pela média de valores.

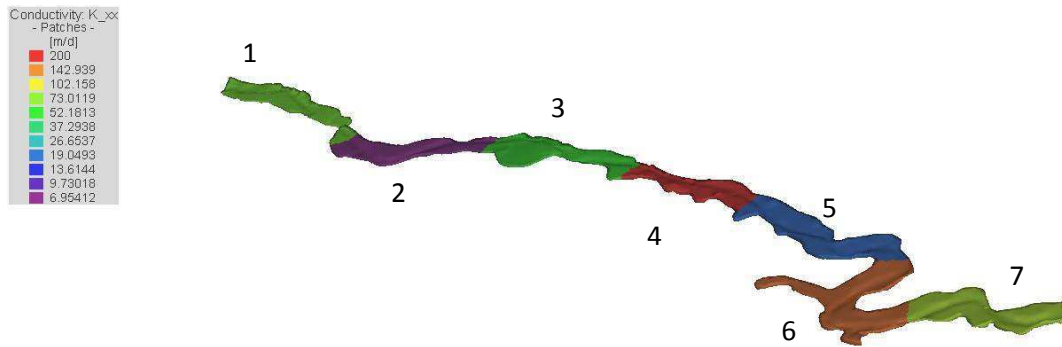
A Zona 03, não apresentou variações de níveis substanciais, mas apresentou a tendência de diminuição da condutividade hidráulica conforme os níveis mais altos. Tal comportamento pode ser reflexo direto da presença de silte e lentes de argila em porções intermediárias das camadas, o que explica um decréscimo na condutividade para a data correspondente aos níveis intermediárias.

Em relação a zona 04, tem-se que esta apresentou uma elevada condutividade para os níveis maiores, e uma baixa condutividade para níveis baixos, o que pode demonstrar um padrão reflexo das camadas litológicas, dado que esta é a zona com maior profundidade (Tabela 4), nas camadas inferiores, apresentando ainda lentes de argila próximas ao contato com o substrato cristalino, enquanto na superfície provavelmente solos mais arenosos.

As zonas 5 e 6 apresentam comportamento similar de decréscimo/acrécimo de condutividade conforme aumento dos níveis, porém em relação às condutividades notam-se diferenças nas ordens de grandeza dos valores apresentados, de forma que é notória a passagem de uma zona de baixa condutividade (zona 5) para uma de maior condutividade (zona 6).

O comportamento espacial das condutividades é dado conforme Figura 17, e nota-se que a zona 5 apresenta uma baixa condutividade entre duas zonas de condutividade elevadas, as zonas 4 e zona 6, aspecto esse que necessita de investigação, de forma a validar os dados de condutividade da zona 05.

Figura 17 – Distribuição das condutividades calibradas em 26/03/2018.

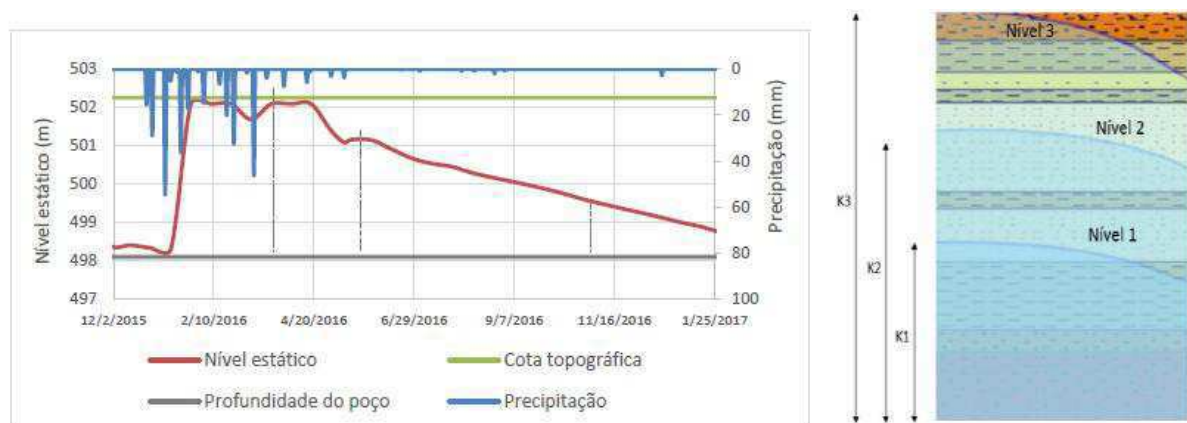


Fonte: O Autor (2018).

Por último, destaca-se a zona 7 como uma zona que apresentou grande variabilidade nas suas condutividades, mostrando um padrão de aumento de condutividade conforme aumento dos níveis. Contudo, esta zona apresentou um comportamento destoante para níveis intermediários, aumentando sobremaneira a variabilidade desta camada.

É importante destacar que os dados de condutividade possuem variação espacial, bem como sazonal, uma vez que depende das parcelas lito-estratigráficas que compõem as camadas de solo. Sendo assim, para aquíferos de pequenas dimensões onde a variação de níveis sazonalmente implica que em diferentes proporções destas camadas, caracteriza, portanto, condutividades diferentes conforme a evolução dos níveis. Esse comportamento é destacado por Tsuyuguchi et al. (2017), e pode ser ilustrado na Figura 18

Figura 18 – a) Variação do nível estático do poço 21; b) Esquema Ilustrativo.



Fonte: Tsuyuguchi et al (2018).

Outro resultado fornecido pelo modelo, a partir da inserção das sondagens, diz respeito às espessuras características das seções transversais. A Tabela 4 ilustra as espessuras médias do aquífero por camadas, permitindo assim análises pontuais correlacionando com as discussões já levantadas.

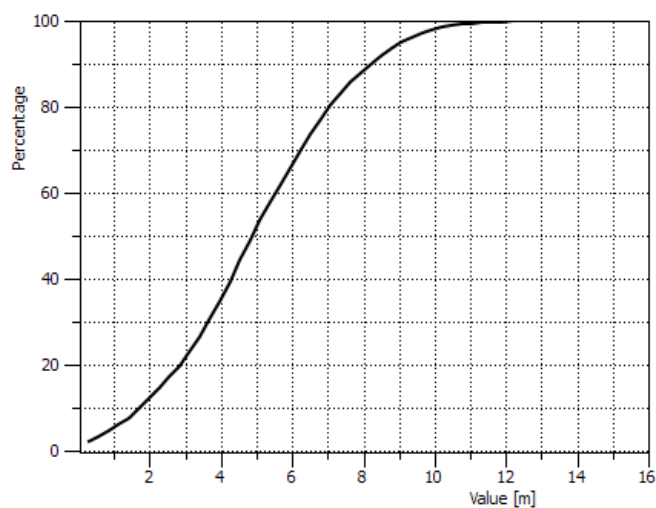
Tabela 4 – Espessuras médias das camadas de calibração.

|          | Espessura média (m) | Desvio (m) | CV (%) | Máx (m) | Mínimo (m) |
|----------|---------------------|------------|--------|---------|------------|
| Aquífero | 5,258               | 2,423      | 46,1   | 14,459  | 0,282      |
| Zona 1   | 4,197               | 2,278      | 54,3%  | 14,459  | 0,325      |
| Zona 2   | 5,706               | 1,840      | 32,2%  | 10,730  | 0,660      |
| Zona 3   | 5,457               | 2,198      | 40,3%  | 12,930  | 0,370      |
| Zona 4   | 6,663               | 1,887      | 28,3%  | 13,189  | 0,965      |
| Zona 5   | 5,024               | 2,214      | 44,1%  | 11,764  | 0,429      |
| Zona 6   | 4,193               | 2,667      | 63,6%  | 11,248  | 0,313      |
| Zona 7   | 5,989               | 2,641      | 44,1%  | 12,248  | 0,282      |

Fonte: O Autor (2018).

Conforme a Figura 19 é possível observar que apenas 12% das espessuras são abaixo de 2m, e que apenas 11% são maiores que 8m de profundidade.

Figura 19 – Distribuição de espessuras do aquífero, em curva S.



Fonte: O Autor (2018).

Entretanto, discussões acerca da relação entre as espessuras e litotipos diretamente com a condutividade ainda são iniciais, uma vez que as considerações retiradas a partir do modelo são interpolações realizadas no ambiente do próprio software, e, além disso, se faz necessário

maior quantidade de dados de sondagem, bem como tratamento adequado de forma a especializar para todo o perímetro irrigado as informações dos litotipos e percentuais constituintes, o que não faz parte do escopo deste trabalho de conclusão de curso.

#### 5.4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

De uma maneira geral, as simulações mostraram como o aquífero se apresenta diante da situação de bombeamento.

##### **5.4.1 Cenário 1: Continuidade do cultivo de capim e milho ao fim de estação chuvosa de elevada precipitação.**

Nesse cenário foi simulada inicialmente a situação do aquífero para um ciclo de cultivo de culturas de capim e milho, que dura aproximadamente 3 meses.

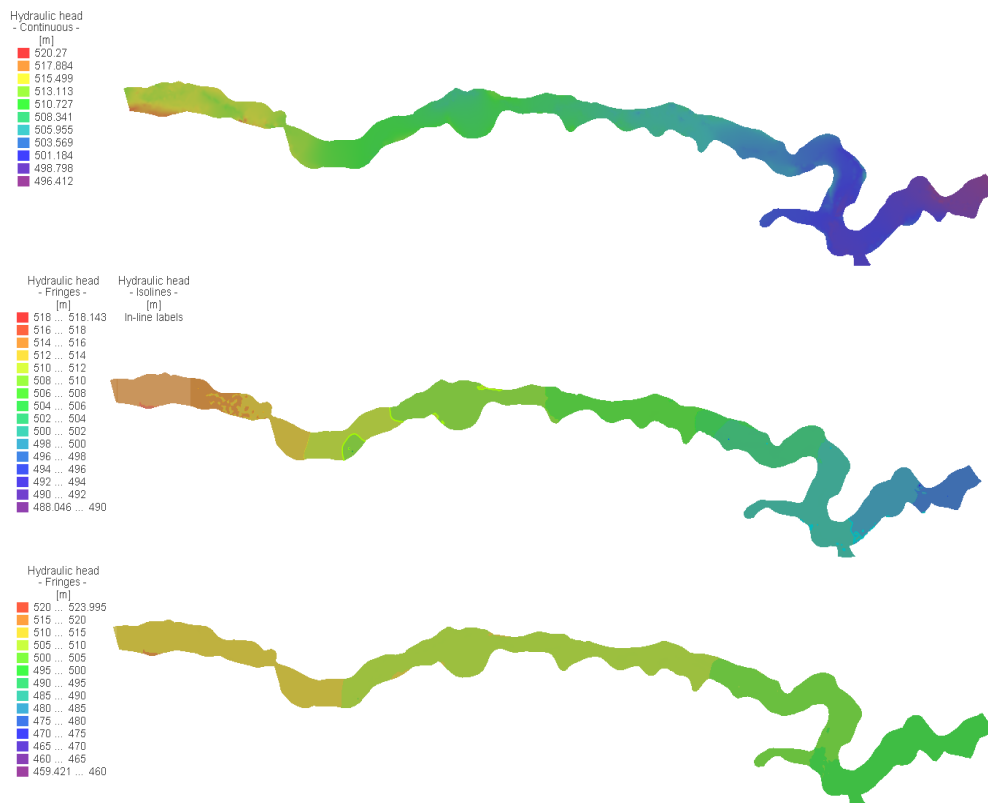
O modelo matemático se comportou bem, e ao fim dos 3 meses foi notória uma baixa significativa de aproximadamente 8,6% da capacidade, caracterizando uma redução de 160 mil m<sup>3</sup>, que se mostra um valor considerável para o período. Parte desse valor é parcela do próprio bombeamento que está sendo executado, que consomem 58 m<sup>3</sup>, e não só, o modelo mostra parcela considerável de perdas por evapotranspiração, cerca de 88,86 m<sup>3</sup>.

A exploração dessa vazão, como esperado, já foi suficiente para promover alterações na distribuição geral das cargas hidráulicas, conforme é possível notar na Figura 20.

Sendo assim, o modelo já indica que, de fato, pelo menos um ciclo de cultivo das culturas de milho e capim, pode ser realizado com segurança no aquífero em questão, de forma a não comprometer os demais usuários além do perímetro irrigado, tampouco a aceleração do processo de secagem do aquífero.

Diante do quadro, foi realizada uma simulação em continuação para mais 3 meses, de forma a verificar a possibilidade de garantia de um segundo ciclo dessas culturas. Em se tratando de um segundo ciclo de cultivo, e sob as mesmas condições, o modelo mostra que a queda do volume foi um pouco menor que a primeira, de 6,7%, correspondendo a uma baixa de 124 mil m<sup>3</sup>. Uma vez que a vazão de exploração é praticamente constante, nota-se uma baixa nos volumes disponibilizados para evapotranspiração, o que já era esperado, visto que os níveis se encontram mais baixos. Ainda assim o suporte para uma segunda safra é garantido.

Figura 20 – Cargas hidráulicas iniciais, para 1º e 2º ciclo..



Fonte: O Autor (2018).

Porém nessa segunda etapa tem-se que a vazão antes escoada à jusante começa a ser solicitada pelo regime de bombeamento, atingindo valores muito baixos. Ao fim do segundo ciclo de cultura, em termos volumétricos o aquífero ainda possui boa capacidade volumétrica, cerca de 47% da capacidade total, o que parece satisfatório, mas demanda uma análise mais detalha de fluxo e de vazões.

O modelo indica, portanto, que após período chuvoso com elevada precipitação, o aquífero encontra-se em condição de atender à demanda das duas culturas por um período de seis meses, o que é significativo para a economia local.

#### 5.4.2 Cenário 2: Demanda necessária a reativação de 1/4 do perímetro irrigado, para um ou mais ciclos de cultivo, em regime de seca, logo após alta nos níveis do aquífero.

Esse cenário visava verificar se o aquífero seria capaz de abastecer zonas que antes correspondiam ao antigo perímetro irrigado, para um ou mais ciclo de cultivo.

A análise inicial dos valores de demanda, mostrou um quadro pouco otimista diante da enorme área a ser atendida correspondente às áreas irrigadas definidas para pleno funcionamento do perímetro irrigado, de aproximadamente 287ha, resultando em uma vazão demandada na ordem de 6400 m<sup>3</sup>/dia. Diante disso, após tentativas e aplicações no modelo chegou-se ao cenário mais realista de tentar atender 1/4 das áreas do antigo perímetro irrigado.

O modelo mostra que para tal cenário, ao fim do período de cultivo, devido ao alto regime de regime de exploração e a evapotranspiração, houve uma redução do volume do aquífero de aproximadamente 240 mil m<sup>3</sup>, que correspondem a 13% da capacidade total, e uma redução de 20% no volume em relação ao volume inicial de 1,16 milhão de m<sup>3</sup>.

O balanço realizado, mostra que desse volume cerca de 144 mil m<sup>3</sup> é referente ao bombeamento atribuído aos poços, e 90,4 mil m<sup>3</sup> correspondentes às perdas por evapotranspiração, bem como um vazão de 5,6 mil m<sup>3</sup> que sai pela fronteira do modelo para jusante. Tais valores representam na fronteira de jusante uma vazão de 62,22 m<sup>3</sup>/dia, e, conseqüentemente, uma velocidade de fluxo de 0,044 m/dia.

É possível notar ainda que tais valores correspondem a um maior estresse do aquífero, se comparados com o primeiro cenário, mas que, entretanto, os dados mostram que seria possível uma reativação de 1/4 dos lotes de milho e capim correspondentes ao antigo perímetro irrigado.

De forma análoga, realizou-se no modelo simulação subsequente objetivando verificar a disponibilidade de uma segunda safra nestas áreas, entretanto, não foi possível constatar o atendimento dessa disponibilidade. Além do elevado rebaixamento volumétrico, próximo aos valores limites mínimos registrados, expressos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, no ano de 2017 quando as áreas irrigadas reduziram drasticamente devido à impossibilidade de captação. Tais fatos foram considerados como decisivos, uma vez que tais condições implicam na não sustentabilidade da exploração, visto que interfere no fluxo de águas subterrâneas, sob risco de esvaziamento.

Diante do quadro apresentado, nota-se a significância e aplicabilidade de modelos matemáticos na obtenção de dados que fomentam a gestão de recursos hídricos. Em se tratando do aquífero aluvial do rio Sucuru, mesmo apresentando pequenas dimensões, é campo direto de aplicação de tais ferramentas, de forma que os cenários podem ser ajustados conforme as necessidades locais e do planejamento municipal.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final, tem-se que foram atingidos os objetivos deste trabalho de forma satisfatória, realizadas várias incrementos no modelo, como melhoramento de dados topográficos, maior tratamento dos dados, além da calibração realizada. O modelo se mostrou uma ferramenta bastante aplicável e útil de subsidiar a gestão, permitindo análises de cenários.

Conforme as descrições apresentadas, destaca-se, portanto, que a construção de um modelo de simulação contempla diversas etapas qualitativas e quantitativas, inclusive o levantamento e tratamento de diversos dados de campo. Dentro de tais etapas envolvem-se incertezas metodológicas e simplificações diversas, caracterizando um processo constante de aperfeiçoamento e reformulação das hipóteses, sempre se adequando à realidade de campo.

Em se tratando da calibração, notou-se definido comportamento heterogêneo do aquífero com relação às zonas de condutividade, apresentando valores variáveis espacial e temporalmente, correlacionados com aumentos e decréscimos nos nível, ou não. Nota-se presença de zonas com condutividades mais elevadas e regulares para as três simulações, como a zona 1 e 3 com condutividades próxima a sugerida por Vieira (2002), além de zonas menos condutoras, e com padrão de condutividade diminuindo conforme aumentam-se os níveis, que é o caso da zona 5.

A simulação de cenários mostrou uma que para atender a demanda de até dois períodos de cultivo de culturas como milho e capim, o aquífero se mostra bastante eficaz. Por outro lado, para o atendimento de três ou mais ciclos a influência no fluxo a jusante deve ser melhor analisada, considerando-se ainda a ocorrência de secas plurianuais.

Ao final tem-se que os resultados alertam para a significância das perdas por evapotranspiração, que é um fenômeno especialmente influente para regiões semiáridas, e que nos cenários simulados foi superior ou equiparada ao próprio bombeamento, de modo que tais valores devem ser melhores investigados.

Destaca-se ainda a importância da criação de modelos matemáticos como alternativa para simular o comportamento de pequenos aquíferos, visando subsidiar diversas aplicações, dentre as quais a gestão integrada de recursos hídricos.

A principais dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho consistiram no fato de o aquífero possuir pequenas dimensões, e alta sensibilidade a todos os parâmetros envolvidos, desde variações topográficas, sondagens, levantamento de níveis, e outros, necessitando de um maior rigor no tratamento inicial dos dados, bem como demandando maior atenção na análise dos resultados envolvidos.



Dentro dessa temática, diversos estudos ainda podem ser realizados, bem como várias aplicações, as quais fogem do escopo deste trabalho, e serão deixadas como sugestão para trabalhos futuros:

- a) Realização de estudos que abordem a espacialização dos litotipos presentes nas sondagens da área de estudo, de forma relacionar de forma mais direta e acurada a relação entre a condutividade e as camadas do aluvião.
- b) Continuidade da parametrização, a calibração e aplicações em regime transiente, uma vez que se terá à disposição uma maior série de dados observados;
- c) Realizar simulações de outros cenários, de forma a investigar mais profundamente a influência da evapotranspiração com os regimes de exploração, bem como definir valores mais representativos conforme a situação dos níveis.

## 7 REFERENCIAS

ALBERTO, Marcio Costa. **Fluxo de água subterrânea em sistema de encosta-rio, município de Paulina (SP): caracterização hidrogeológica e simulação numérica.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2005.

ALBUQUERQUE, J. do P. T. **Sistema Aquífero Aluvial do Estado da Paraíba.** IV Congresso Brasileiro de Águas subterrâneas. Brasília – DF: Anais do IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. P273-274, 1986.

ALVES, E. J. C. **Potencialidade e manejo dos recursos hídricos do aquífero aluvial em Sumé – PB.** Dissertação (2016). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, 2016.

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

BARRETO, A. B. C. **Avaliação de recarga e de sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos de uma microbacia cristalina através de modelagem numérica.** Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Best, M. **Introduction to groundwater aquifers.** Publicações digitais para a Municipality of Central Saanich Resource Atlas. 1998.  
[http://www.centrialsaanich.ca/Assets/Central+Saanich/Publications/CS+Resource+](http://www.centrialsaanich.ca/Assets/Central+Saanich/Publications/CS+Resource+Atlas/Groundwater+Aquifers.pdf?method=1)

[Atlas/Groundwater+Aquifers.pdf?method=1](http://www.centrialsaanich.ca/Assets/Central+Saanich/Publications/CS+Resource+Atlas/Groundwater+Aquifers.pdf?method=1)

BURROUGH, P.A.; MC DONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems.** Oxford: Oxford University Press, 1998.

CARVALHO, Ana Maciel de. **Modelagem numérica como ferramenta para gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto (SP).** Dissertação (mestrado): IGc / USP. São Paulo, 2013.

CIRILO, J. A.; CABRAL, J. J. S. P. **Modelos de água subterrânea.** In: SILVA, Rui Vieira da (Ed.). Métodos numéricos em Recursos Hídricos. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. p. 303-379. (Métodos numéricos em recursos hídricos, 1).

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas.** Clean Environment Brasil, Princeton Groundwater Inc, ABRH, 112 p., 2007.

CORREIA, N. **Recursos Geológicos – Recursos Hídricos.** Apresentação. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/nunocorreia/geo-24-recursos-geologicos-recursos-hdricos>

COSTA, Q. D. **O Aquífero Aluvial E Sua Exploração Racional.** Revista Águas Subterrâneas, 1986.

COSTA, M. R; RÊGO; J. C. **Avaliação das condições de fluxo e armazenamento de água subterrânea em um aquífero aluvial com emprego de um modelo matemático de**

**simulação.** XIV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

DE LA CRUZ, Hugo David Ninanya. **Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

DIERSCH, H.J.G. **FEFLOW: Reference Manual, Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System** Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. DHI-WASY GmbH, Berlin: Springer, 2009.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** In: Feitosa, F. A. C. et al. (2ª Ed.). Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 2000. 391 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** In: Feitosa, F. A. C. et al. (3ª Ed.). Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 2008. 812 p.

GALVÃO, C. O. (Org.) et al. **Recursos hídricos para a convivência com o semiárido: abordagens por pesquisadores no Brasil, Portugal, Cabo Verde, Estados Unidos e Argentina.** 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. v. 1. 590p.

GONÇALVES, Roger Dias. **Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas na bacia do Rio Grande (BA).** Trabalho de conclusão de curso (Geologia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** Alinea. São Paulo, 2010.

MENDONÇA, A. S. F. **Hidrologia.** Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental. p. 45. 2009.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, **Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido.** Brasília – DF: MMA, 2007

MONTENEGRO, Abelardo A. A.; MONTENEGRO, Suzana M. G. L. **Olhares sobre as políticas de recursos hídricos para o semiárido. Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: Estudos e Aplicações. Campina Grande, PB:** Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012.

OGC. **The OpenGIS Abstract Specification: an Object Model for Interoperable Geoprocessing,** Open GIS Consortium, Revision 1, OpenGIS Project Document, 96-001, 1996.

OLIVEIRA, J. N. 2002. 111p. **Ferramenta de Gestão de Águas Subterrâneas para a cidade de São José do Rio Preto, SP.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2002.

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: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 1999.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; LUCENA, Z. M. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; SOUZA, J. A. **Atribuições E Responsabilidades Na Gestão Dos Recursos Hídricos – O Caso Do Açude Epitácio Pessoa/Boqueirão No Cariri Paraibano.** XX Simpósio Brasil de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves/RS, 2013.

SOUZA, C. D. de; LEAL JÚNIOR, C. R. M.; CASTRO, M. A. H. **Simulação computacional do fluxo hídrico subterrâneo na região do cariri e estimativa de parâmetros a partir dos dados de cargas hidráulicas observadas.** In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, 2008, Natal – RN.

VIEIRA, L. J. S.; RÊGO, J. C.; SRINIVASAN, V. S. **Aplicação de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exploração de um aquífero aluvial.** In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2002. Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. v. Unico. p. 55., 2002.

VIEIRA, J. B. A.; RÊGO, J.C. **Construção de um modelo matemático para a simulação de fluxo subterrâneo no aquífero aluvial do rio Sucuru em Sumé – PB.** XII Congresso de iniciação científica da universidade federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, 2015.

WANG, H. F. e ANDERSON, M. P. **Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods.** San Diego, California, USA: Academic Press. 237 p., 1982

WREGE, M. **Termos Hidrogeológicos Básicos.** Caderno Técnico da associação Brasileira Águas Subterrâneas, nº 4, 1997.