



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PÉTRUS EDUARDO FELICIANO DE SÁ**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO  
MODIFICADO PELO MÉTODO DE BUSCA PARA A CALIBRAÇÃO DA  
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA HORIZONTAL DE AQUÍFERO DA BACIA  
SEDIMENTAR DO ARARIPE COM AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE SECA 2010-  
2016**

**FORTALEZA-CE**

**2018**

PÉTRUS EDUARDO FELICIANO DE SÁ

APLICAÇÃO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO  
MODIFICADO PELO MÉTODO DE BUSCA PARA A CALIBRAÇÃO DA  
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA HORIZONTAL DE AQUÍFERO DA BACIA  
SEDIMENTAR DO ARARIPE COM AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE SECA 2010-  
2016

Dissertação de mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, como requisito parcial  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Civil. Área de concentração:  
Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto  
Lacerda Tavares

FORTALEZA-CE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S114a Sá, Pétrus Eduardo Feliciano de.  
Aplicação do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico modificado pelo Método de Busca para a calibração da condutividade hidráulica horizontal de aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe com avaliação do período de seca 2010-2016. / Pétrus Eduardo Feliciano de Sá. – 2018.  
101 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares.

1. Calibração. 2. MIGH. 3. Condutividade hidráulica horizontal. 4. UFC-FLOW. I. Título.

CDD 627

---

PÉTRUS EDUARDO FELICIANO DE SÁ

APLICAÇÃO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO  
MODIFICADO PELO MÉTODO DE BUSCA PARA A CALIBRAÇÃO DA  
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA HORIZONTAL DE AQUÍFERO DA BACIA  
SEDIMENTAR DO ARARIPE COM AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE SECA 2010-  
2016

Dissertação de mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, como requisito parcial  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Civil. Área de concentração:  
Recursos Hídricos.

Aprovada em: 13 / 11 / 2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares (Orientador)  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

---

Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Celme Torres Ferreira da Costa  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Dedico este trabalho a minha mãe Albéria, a minha avó Francisca e a minha irmã Kaliandra pelo apoio incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Paulo Roberto, pela paciência, pelos conhecimentos ensinados, pela disponibilidade e pela inspiração desde a graduação.

Aos professores da banca examinadora Marco Aurélio e Celme Torres pelas orientações.

À Universidade Federal do Ceará por abrir suas portas e fornecer novas oportunidades à comunidade acadêmica.

Ao colega do LAHC Erlandson e ao amigo de longa data Graciano pela paciência e disponibilidade assim como pelo grande auxílio da parte computacional para a realização dessa pesquisa.

A Yago Vieira pelo companheirismo, incentivo e confiança sempre que necessitei.

A minha amiga e colega de mestrado Tatiane Lima pelo companheirismo, conhecimentos compartilhados e união para conseguir essa importante conquista pessoal e profissional.

A minha madrinha Magna Alencar pelo apoio e confiança que depositou em mim desde sempre, tendo minha eterna gratidão.

A toda(o)s a(o)s pesquisadora(e)s negra(o)s que me antecederam no ambiente acadêmico, pois foram de fundamental importância para essa conquista.

*Num clima quente  
A minha gente sua frio  
Vi um pretinho  
Seu caderno era um fuzil*

*Racionais MC's*

## RESUMO

Este trabalho possui como objetivo a modelagem do escoamento de águas subterrâneas de aquífero, por meio de simulação computacional utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH), modificado pelo método de busca no processo de calibração. O método foi testado em um exemplo hipotético e em um exemplo real correspondente a um aquífero que abrange a área urbana do município do Crato-CE, na Bacia Sedimentar do Araripe, permitindo a avaliação dos efeitos relacionados ao período de seca 2010-2016. A modelagem do fluxo subterrâneo foi realizada através do uso da extensão UFC-FLOW, que opera em associação com o gvSIG, um software de geoprocessamento utilizado para facilitar a elaboração das matrizes de entrada do modelo. A calibração do parâmetro condutividade hidráulica horizontal foi obtida com sucesso através da simulação do modelo e da fixação de cargas hidráulicas observadas e aferidas em campo. Os resultados satisfatórios na calibração da condutividade hidráulica atestam a validade do MIGH, porém o método de busca implementado em associação à calibração apresentou resultados parcialmente satisfatórios, em que para o caso hipotético estudado, o método funcionou apresentando um pequeno erro, no entanto, para o caso real, em que o modelo possui condutividades não homogêneas, apresentou diferenças significativas ao variar a carga inicial, demonstrando a necessidade, ainda, de aprimoramento do método de busca. Os resultados obtidos também mostram as potencialidades do software UFC-FLOW tendo como suporte um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para simulação do fluxo subterrâneo e modelagem de aquíferos, assim como a posterior solução do problema de calibração de parâmetros hidrodinâmicos baseado no MIGH. A análise da mudança do nível estático do aquífero na região causada ao período de seca entre 2010 e 2016 revelou a ocorrência de um rebaixamento médio superior a dois metros, mostrando que a recarga foi insuficiente durante a estiagem e que se deve promover medidas que preservem o lençol freático nessas épocas críticas.

**Palavras-chave:** Calibração, MIGH, Condutividade hidráulica horizontal, UFC-FLOW.

## ABSTRACT

This work aims to perform the modeling of the aquifer groundwater flow through computer simulation using the Hydraulic Gradient Iterative Method (MIGH), modified by the search method in the calibration process. The method was tested in a hypothetical example and in a real example corresponding to an aquifer that covers the urban area of the municipality of Crato-CE, in the Araripe Sedimentary Basin, allowing the evaluation of the effects related to the drought period 2010-2016. Underground flow modeling was performed using the UFC-FLOW extension, which operates in association with gvSIG, a geoprocessing software used to facilitate the elaboration of the model input matrices. The calibration of the horizontal hydraulic conductivity parameter was successfully obtained through simulation of the model and the fixation of hydraulic loads observed and measured in the field. The satisfactory results in the calibration of the hydraulic conductivity attest to the validity of the MIGH, but the search method implemented in association with the calibration presented partially satisfactory results, in which for the hypothetical case studied, the method worked presenting a small error, however, for the the real case, in which the model has non-homogeneous conductivities, presented significant differences as the initial load varied, demonstrating the need to improve the search method. The results obtained also show the potential of the UFC-FLOW software, supported by a Geographic Information System (GIS) for underground flow simulation and aquifer modeling, as well as the subsequent solution of the hydrodynamic parameter calibration problem based on MIGH. The analysis of the change in the static level of the aquifer in the region caused by the drought period between 2010 and 2016 revealed an average decrease of more than two meters, showing that the recharge was insufficient during the dry season and that measures should be taken to preserve the in these critical times.

**Keywords:** Calibration, MIGH, Horizontal hydraulic conductivity, UFC-FLOW.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 01 – Esboço esquemático do permeâmetro utilizado nos experimentos de Darcy.....   | 20 |
| Figura 02 – Representação esquemática do volume de controle.....   | 21 |
| Figura 03 – Porção leste da Bacia Sedimentar do Araripe.....   | 34 |
| Figura 04 – Esboço esquemático do funcionamento dos sistemas aquíferos da Chapada do Araripe.....  | 36 |
| Figura 05 – Ângulo entre os gradientes hidráulicos dos modelos simulado e observado.....   | 45 |
| Figura 06 – Fluxograma do processo de calibração pelo Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.....                                      | 46 |
| Figura 07 – Fluxograma do processo de calibração pelo Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Modificado.....                           | 47 |
| Figura 08 – Fluxograma do processo de calibração pelo Método Iterativo do Gradiente Hidráulico com Implementação do Método de Busca..... | 48 |
| Figura 09 – Esquematização do modelo hipotético.....   | 50 |
| Figura 10 – Localização da Área-Crato, incluindo poços de bombeamento e posição da seção transversal da geologia.....                    | 52 |
| Figura 11 – Imagem aérea da Área-Crato.....  | 53 |
| Figura 12 – Seção transversal da estratigrafia.....  | 54 |
| Figura 13 – Caracterização litológica da Área-Crato.....   | 54 |
| Figura 14 – Representação do modelo esquematizado da Área-Crato.....   | 57 |
| Figura 15 – Distribuição das condutividades hidráulica em zonas.....   | 58 |
| Figura 16 – Representação do mapa das cargas hidráulicas do modelo teórico.  | 59 |
| Figura 17 – Distribuição espacial da condutividade hidráulica horizontal do modelo teórico.....  | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 18 – Mapa de cotas do topo da camada.....  | 61 |
| Figura 19 – Mapa de cotas da base da camada.....  | 61 |
| Figura 20 – Representação do mapa das cargas hidráulicas.....   | 62 |
| Figura 21 – Distribuição espacial da condutividade hidráulica horizontal.....   | 63 |
| Figura 22 – Distribuição da frequência da diferença entre as cargas hidráulicas da Área-Crato entre 2016 e 2008.....    | 65 |
| Figura 23 – Mapa da distribuição do nível estático da Área-Crato – Out/2008.....  | 66 |
| Figura 24 – Mapa da distribuição do nível estático da Área-Crato – Out/2016.....  | 66 |
| Figura 25 – Gráfico da comparação dos valores dos níveis estáticos dos poços de observação nos anos de 2008 e 2016..... | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 01 – Cargas hidráulicas observadas e localização dos Poços de Observação.....           | 51 |
| Tabela 02 – Vazões Localização dos Poços de Abastecimento.....                                 | 51 |
| Tabela 03 – Locais dos Poços de Abastecimento e as vazões da Área-Crato.....                   | 55 |
| Tabela 04 – Locais dos Poços de Observação e as Cargas hidráulicas observadas em Out/2016..... | 56 |

## LISTA DE VARIÁVEIS

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $\eta$                          | Porosidade do meio $[L]^3/[L]^3$                                       |
| $\eta_{ef}$                     | Porosidade efetiva do meio $[L]^3/[L]^3$                               |
| $\forall$                       | Volume total de uma região $[L]^3$                                     |
| $\forall_v$                     | Volume de vazios de uma região num meio poroso $[L]^3$                 |
| $\forall_{vi}$                  | Volume de vazios interconectados de uma região num meio poroso $[L]^3$ |
| $S_S$                           | Armazenamento específico de um meio poroso $[L]^{-1}$                  |
| $S$                             | Coefficiente de armazenamento de um meio poroso                        |
| $K$                             | Condutividade hidráulica de um meio poroso $[L]/[T]$                   |
| $T$                             | Transmissividade hidráulica de um meio poroso confinado $[L]^2/[T]$    |
| $h$                             | Carga hidráulica em um ponto do escoamento $[L]$                       |
| $Q$                             | Vazão de escoamento $[L]^3/[T]$  |
| $\vec{q}$                       | Fluxo específico (ou velocidade de Darcy) $[L]/[T]$                    |
| $V$                             | Velocidade de um elemento de fluxo $[L]/[T]$                           |
| $A$                             | Área de seção arbitrária $[L]^2$                                       |
| $W$                             | Fluxo por unidade de volume que entra ou sai de uma região $[T]^{-1}$  |
| $b$                             | Espessura de uma camada em um aquífero $[L]$                           |
| $q$                             | Fluxo por unidade de área $[L]/[T]$                                    |
| $L$                             | Distância em linha reta entre dois pontos de observação $[L]$          |
| $\delta f$                      | Varição de pequena magnitude de uma função $f$                         |
| $\nabla$                        | Operador gradiente de uma função escalar                               |
| $\nabla \cdot$                  | Operador divergente de uma função vetorial                             |
| $\frac{\partial f}{\partial n}$ | Derivada parcial de uma função $f$ em relação à variável $n$           |
| $f_x, f_y, f_z$                 | Valor da coordenada $x, y$ ou $z$ de uma função $f$                    |

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>1.1</b>   | <b>Problemática.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>1.2</b>   | <b>Objetivos.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>1.2.1</b> | <b><i>Objetivo Geral.....</i></b>   | <b>16</b> |
| <b>1.2.1</b> | <b><i>Objetivos Específicos.....</i></b>  | <b>16</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Fluxo Hídrico em Meio Subterrâneo.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.1.1</b> | <b><i>Porosidade.....</i></b>   | <b>17</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b><i>Coeficiente de Armazenamento.....</i></b>   | <b>18</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b><i>Condutividade Hidráulica.....</i></b>   | <b>18</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b><i>Equações do Fluxo Subterrâneo.....</i></b>  | <b>21</b> |
| <b>2.2</b>   | <b>Modelagem Matemática Integrada ao Fluxo Hídrico Subterrâneo.....</b>                     | <b>23</b> |
| <b>2.3</b>   | <b>Métodos de Solução para as Equações de Fluxo.....</b>                                    | <b>23</b> |
| <b>2.3.1</b> | <b><i>Métodos Analíticos.....</i></b>   | <b>23</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b><i>Métodos Numéricos.....</i></b>  | <b>24</b> |
| <b>2.4</b>   | <b>Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>2.5</b>   | <b>Hidroinformática.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.5.1</b> | <b><i>Hidroinformática e Modelagem Computacional.....</i></b>                               | <b>28</b> |
| <b>2.5.2</b> | <b><i>Hidroinformática e Gerenciamento de Dados.....</i></b>                                | <b>30</b> |
| <b>2.5.3</b> | <b><i>Hidroinformática e Tecnologia da Informação.....</i></b>                              | <b>31</b> |
| <b>2.6</b>   | <b>Área de Estudo – Caracterização da Bacia Sedimentar do Araripe.....</b>                  | <b>33</b> |
| <b>2.6.1</b> | <b><i>Aspectos Fisiográficos.....</i></b>   | <b>34</b> |
| <b>2.6.2</b> | <b><i>Geologia e Hidrogeologia da Bacia Araripe.....</i></b>                                | <b>35</b> |
| <b>2.6.3</b> | <b><i>Sistema Aquífero Médio.....</i></b>   | <b>36</b> |
| <b>2.6.4</b> | <b><i>Uso das Águas Subterrâneas na Bacia Sedimentar do Araripe.....</i></b>                | <b>37</b> |
| <b>2.7</b>   | <b>Período de Seca no Semiárido do Nordeste e Características da Seca de 2010-2016.....</b> | <b>38</b> |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH).....</b>                                 | <b>41</b> |
| <b>3.1.1</b> | <b><i>Implementação do Método de Busca no MIGH.....</i></b>                                 | <b>47</b> |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2   | Estudo de Caso - Modelo Teórico.....   | 49 |
| 3.3   | Estudo de Caso - Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe.....        | 51 |
| 4     | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....  | 59 |
| 4.1   | Modelo Teórico.....  | 59 |
| 4.2   | Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe.....                         | 60 |
| 4.2.1 | <i>Alterações no Sistema do Aquífero Causadas pelo Período de Seca</i> ..... | 64 |
| 5     | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....  | 68 |
|       | REFERÊNCIAS.....   | 70 |
|       | APÊNDICE A - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO UFC-FLOW.....                           | 75 |

## 1 INTRODUÇÃO

A modelagem computacional de água subterrânea se mostra como um recurso indispensável, uma vez que permite obter grande eficiência no uso dos dados disponíveis, oferecendo a oportunidade de analisar situações, em geral, de alta complexidade, que envolvem uma grande quantidade de cálculos e apresentando resultados tanto quantitativos e quanto qualitativos para as várias questões referentes aos mecanismos de funcionamento dos aquíferos.

Apesar de a modelagem ser definida como uma simplificação de fenômenos que ocorrem na realidade, ainda sim, se utiliza de um trabalhoso encadeamento de processos, que se iniciam desde a composição do modelo, observando todos os parâmetros necessários, e finalizam com os procedimentos de verificação, análise e apresentação dos resultados definitivos.

A calibração dos parâmetros hidrodinâmicos consiste em uma importante etapa no processo de modelagem. Esse procedimento possui como principal função estabelecer o valor dos parâmetros de modo que o modelo seja capaz de reproduzir as cargas medidas em campo. A calibração pode ser feita por meio do ajuste dos parâmetros através do método de tentativa-e-erro ou através de métodos matemáticos programados computacionalmente.

De acordo com Schuster e Araújo (2004) a calibração de parâmetros é um processo de grande relevância para a modelagem de um sistema aquífero, sendo necessário nessa etapa um maior período de tempo para se realizar o procedimento de simulação numérica. Dada a importância e singularidade desse procedimento várias técnicas têm sido elaboradas e são apresentadas nos trabalhos de Yeh (1986), Carrera e Neuman (1986), Carrera (1987), Sun (1994), McLaughlin e Towley (1996), Guo e Zhang (2000) e Schuster e Araújo (2004), Zhou, Gómez-Hernández e Li (2014) e Linde, N; Renard P; Mukerji T; Caers J. (2015).

O processo de estimação de parâmetros hidrodinâmicos é geralmente abordado através do procedimento de minimização, por meio da técnica inversa dos mínimos quadrados, de uma função objetivo formada pela diferença entre as cargas calculadas e observadas. Tal método está implementado em códigos computacionais, onde se destacam MODINV (DOHERTY, 1990), MODFLOWP (HILL, 1992), PEST (DOHERTY, 1994) e o UCODE (POETER e HILL, 1998).

A técnica de estimação de parâmetros hidrodinâmicos, fundamentada na minimização do gradiente hidráulico calculado e observado, foi desenvolvida inicialmente por Guo e Zhang (2000) e posteriormente por Schuster e Araújo (2004), denominada em seus trabalhos, respectivamente, como Hydraulic Gradient Comparison Method e Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH).

A formulação proposta por Schuster e Araújo (2004), possibilitou o desenvolvimento de trabalhos sobre a calibração utilizando o MIGH, principalmente no nordeste do Brasil. A exemplo de Souza (2007) que utilizou o MIGH em comparação como o programa PEST na calibração de aquífero. Em sua tese de doutorado, Tavares (2010) desenvolveu um programa computacional para automatização do método, com a implementação de processos de fixação de cargas observadas e aplicou o método para a modelagem do escoamento de água subterrânea e calibração da condutividade hidráulica horizontal de um aquífero da região do Cariri cearense. Costa (2014) utilizou o método para calibração na região do Vale do Gurugúia no Piauí. Mendonça (2014) implementou o Método de Busca no processo de calibração da condutividade horizontal associado ao MIGH. Mais recentemente, Queiroz (2016) realizou o aprimoramento da rotina elaborada por Tavares associando-a ao Sistema de Informações Geográficas gvSIG para a simulação e calibração de condutividade hidráulica horizontal de fluxo subterrâneo.

## **1.1 Problemática**

Nos estudos realizados, empregando o MIGH, a estimativa inicial do parâmetro a ser calibrado surge como fator decisivo e, por vezes, limitante ao sucesso da calibração, neste sentido, o Método de Busca se apresenta como tentativa de solução para tornar a calibração independente da estimativa inicial e deve ser investigado. Nesse contexto de desenvolvimento do MIGH, as aplicações em exemplos hipotéticos e reais se mostram imprescindíveis para o desenvolvimento e aprimoração do método.

Paralelamente, a simulação de cenários reais, incluindo a atualização de dados, permite avaliar respostas a ocorrências específicas, tais como, eventos de secas prolongadas, ainda não representados nos modelos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Realizar o estudo da condutividade hidráulica horizontal do fluxo subterrâneo de aquíferos, por meio de modelagem computacional, com a aplicação do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH) modificado pelo Método de Busca.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- i. Simular, utilizando o Método de Busca, associado ao MIGH, o escoamento subterrâneo de um aquífero hipotético;
- ii. Simular, utilizando o Método de Busca, associado ao MIGH, o escoamento subterrâneo de um aquífero real localizado na Bacia Sedimentar do Araripe;
- iii. Avaliar a eficácia do Método de Busca, associado ao MIGH, para tornar o processo de calibração da condutividade hidráulica horizontal independente da matriz inicial de cargas hidráulicas;
- iv. Avaliar a influência do período de seca de 2010 a 2016 num aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fluxo Hídrico em Meio Subterrâneo

O fluxo hídrico subterrâneo possui parâmetros que fundamentam seu estudo, a partir dos quais é possível analisar os processos que o governam. Esses princípios hidráulicos atuantes em meio poroso são utilizados para determinar equacionamento do fenômeno. De acordo com Cabral (1997) o meio é tratado como um contínuo e possui características médias precisas, onde se tem a porosidade, o coeficiente de armazenamento e a condutividade hidráulica como parâmetros fundamentais no estudo do fluxo subterrâneo.

#### 2.1.1 Porosidade

De acordo com Fetter (1980) a porosidade é definida como a porcentagem de rocha ou solo que é vazia de material. Esse parâmetro é determinado matematicamente através expressão:

$$\eta = \frac{v_v}{v} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Em que:

$\eta$ : porosidade total (%);

$v_v$ : volume de vazios [L]<sup>3</sup>;

$v$ : volume total [L]<sup>3</sup>.

O conceito de porosidade efetiva surge quando durante o processo de drenagem através da gravidade a água não é retirada em sua totalidade devido, justamente a forças moleculares e tensão superficial presentes na água. Kresic (1997) define a porosidade efetiva ( $\eta_{ef}$ ) através da fórmula:

$$\eta_{ef} = \frac{v_{vi}}{v} \quad (2.2)$$

Em que:

$\eta$ : porosidade efetiva (%);

$v_{vi}$ : volume de vazios interconectados [L]<sup>3</sup>;

$v$ : volume total [L]<sup>3</sup>.

### 2.1.2 Coeficiente de Armazenamento

O coeficiente de armazenamento consiste em um indicador que define a capacidade do aquífero de armazenar e transferir água, salientando que os processos de recarga e descarga de um lençol freático caracterizam a variação do volume acondicionado. Segundo Caicedo (2002) o coeficiente de armazenamento é um parâmetro adimensional determinado pela quantidade de água liberada pelo aquífero dada uma área unitária e uma espessura constante, em que se aplica uma redução unitária na altura piezométrica.

$$S = \frac{V_{\text{liberado}}}{A \cdot \Delta h} \quad (2.3)$$

Em que:

S: coeficiente de armazenamento;

$V_{\text{liberado}}$ : volume de água liberada [L]<sup>3</sup>;

A: área drenada unitária [L]<sup>2</sup>;

$\Delta h$ : decréscimo da altura piezométrica [L];

O volume de água drenado por um volume unitário do aquífero sujeito a uma redução unitária da altura piezométrica é definido como o armazenamento específico ( $S_s$ ). O armazenamento específico pode ser aplicado na determinação do coeficiente de armazenamento, como é possível observar pela expressão 2.4:

$$S = S_s \cdot b \quad (2.4)$$

$S_s$ : armazenamento específico [1/L];

b: espessura do aquífero [L].

### 2.1.3 Condutividade Hidráulica

Segundo Darcy (1856) existe uma ligação entre o escoamento de água que passa através da camada filtrante e o gradiente hidráulico, dessa relação foi possível estabelecer o conceito de condutividade hidráulica como uma característica macroscópica do meio.

Os experimentos do engenheiro francês Darcy tiveram como objetivo realizar análise o fluxo de água que atravessa uma coluna de solo, como um filtro de areia

(Figura 01). De acordo com os experimentos Darcy percebeu que os resultados indicavam que a descarga de cada coluna de solo aumentava de maneira proporcional com a carga submetida, observando ainda que se estabelecia uma relação linear para cada série entre a descarga por segundo por metro quadrado ( $Q$ ) e carga por metro de espessura do filtro ( $I$ ) (SIMMONS, 2008).

Assim tem-se a condutividade hidráulica  $K$  [L]/[T] que atua em meio poroso, sendo parâmetro responsável justamente por caracterizar a velocidade apresentada pela água ao passar através deste meio, quando sujeita a um decréscimo da altura piezométrica ( $\Delta h$ ) unitária. A condutividade hidráulica se insere no estudo da hidrogeologia como o parâmetro básico da lei de Darcy, que consiste na equação que determina o fluxo de água em um meio poroso. A expressão que estabelece matematicamente esta lei é dada como:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (2.5)$$

Em que:

$Q$  = Vazão que escoar pelo permeâmetro [ $L^3$ ]/[T];

$A$  = Área da seção do permeâmetro [ $L^2$ ];

$h$  = Carga hidráulica em um piezômetro [L];

$L$  = Distância entre os piezômetros [L];

O coeficiente de proporcionalidade  $K$  está presente na representação matemática da lei de Darcy e representa um parâmetro hidrogeológico. Esse parâmetro possui como finalidade relacionar as características do fluido e do meio, sendo denominado de condutividade hidráulica.

A lei de Darcy também pode ser expressa em sua forma generalizada em relação aos termos de velocidade, ficando da seguinte forma:

$$\vec{q} = -K \cdot \nabla h \quad (2.6)$$

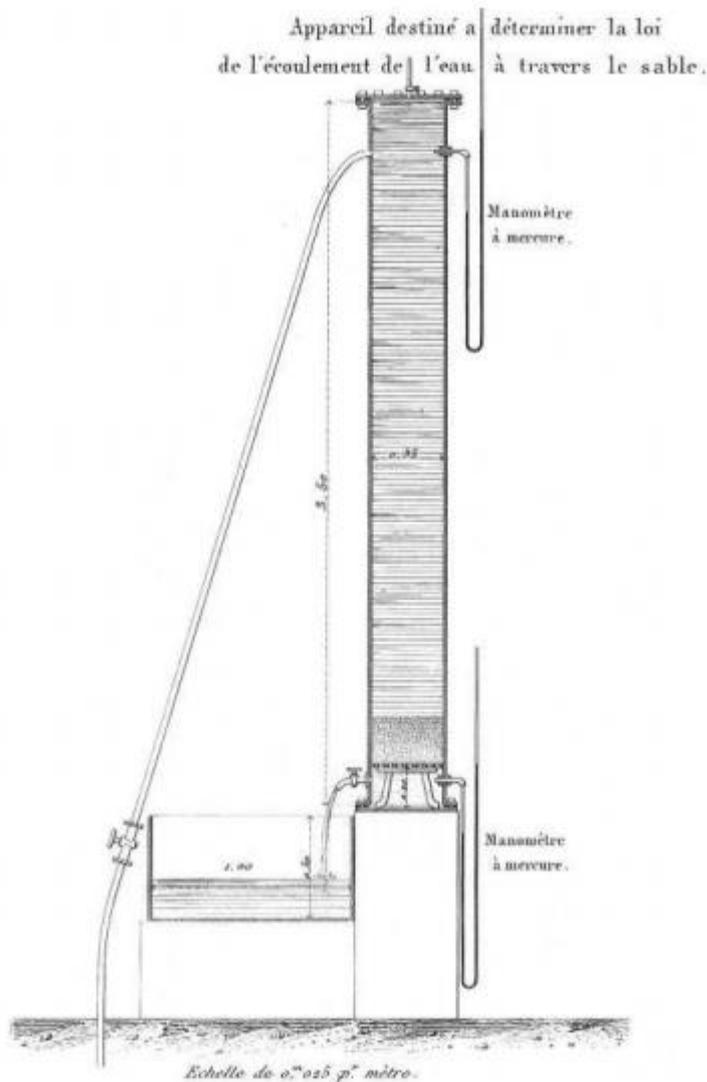
Em que:

$\vec{q}$  = vetor do fluxo específico [L]/[T];

$K$  = Tensor da condutividade hidráulica ( $K_{3 \times 3}$ ) [L]/[T];

$h$  = Carga hidráulica como função do espaço e tempo  $\{h(x; y; z; t)\}$  [L];

Figura 01 – Esboço esquemático do permeâmetro utilizado nos experimentos de Darcy.



Fonte: Alencar (2008)

Baseando-se no experimento representado na Figura 01, a lei de Darcy determina que o fluxo em meio poroso é inversamente proporcional ao espaço  $L$  entre os piezômetros, assim como é diretamente proporcional tanto à área da seção transversal da coluna quanto à diferença de alturas piezométricas ( $\Delta h$ ). Tendo em vista que os escoamentos subterrâneos possuem baixos valores de velocidade do fluido suas cargas cinéticas podem ser desconsideradas, sendo assim a diferença de cargas hidráulicas correspondem à própria diferença de cotas piezométricas.

A condutividade hidráulica em meio saturado pode ser determinada através de diversas técnicas. Dentre essas técnicas se inclui: fórmulas empíricas; experimentos em laboratórios e também testes de bombeamento feitos em campo.

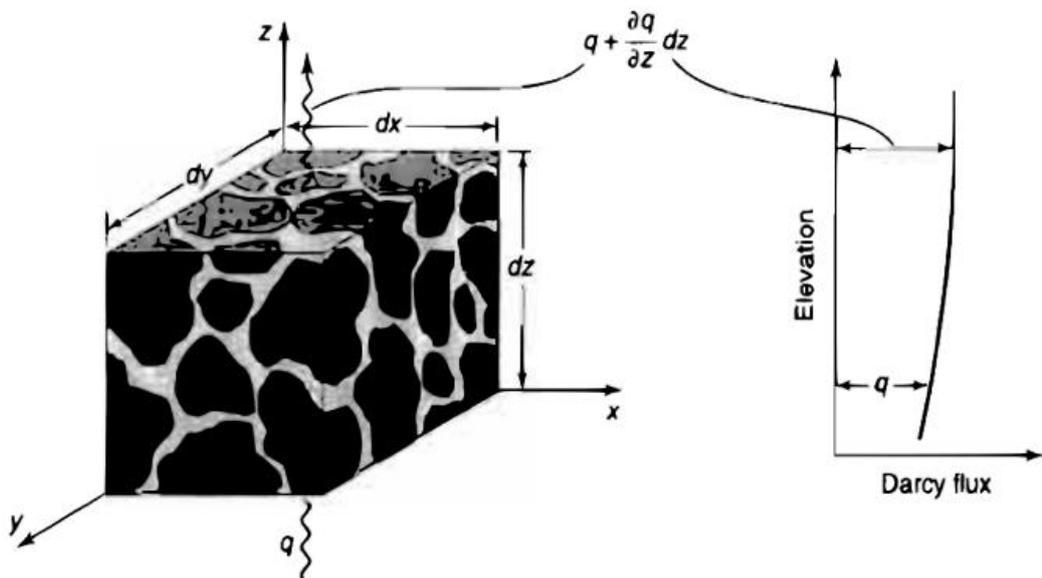
### 2.1.4 Equações do Fluxo Subterrâneo

A partir do que foi proposto por Darcy, como resultado de seus experimentos, tornou-se possível estudar o complexo fluxo da água que ocorre de maneira microscópica em meio poroso e se pode analisa-lo de maneira macroscópica adotando-se parâmetros com propriedades físicas bem definidas. Dessa forma foi permitido estudar o fluxo atuante em meio subterrâneo com base nos princípios hidráulicos.

Autores como Todd (2005), Bear (1979), Freeze e Cherry (1979) e Fetter (1980) discutiram de forma ampla a respeito da equação geral do fluxo subterrâneo em suas obras.

As equações de continuidade e conservação de massa que agem sobre um volume de controle (vC) delimitado por uma superfície de controle (SC) (Figura 02) são utilizadas para a construção da equação geral do fluxo em meio saturado.

Figura 02: Representação esquemática do volume.



Fonte: Todd e Mays (2005)

A equação geral que representa o escoamento em meio poroso, adotando o pressuposto que os eixos cartesianos correspondem com as direções principais do tensor da condutividade hidráulica, pode ser representada como uma equação diferencial parcial, empregando-se o princípio do armazenamento. A expressão é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (2.7)$$

Em que:

$K_i$  = Elementos da diagonal principal do tensor de condutividade [L]/[T];

$h$  = Carga hidráulica como função do espaço e tempo  $h(x; y; z; t)$  [L];

$S_s$  = Armazenamento específico [L]<sup>-1</sup>;

$W$  = Fluxo por unidade de volume que entra ou sai do Volume de controle [T]<sup>-1</sup>;

Essa equação do escoamento no aquífero descreve a situação mais ampla do fluxo tridimensional que permeia um ambiente poroso saturado, heterogêneo e anisotrópico. Simplificações podem ser realizadas para a equação obtendo-se assim casos particulares. Considerando o escoamento sob regime estacionário, o termo  $\frac{\partial h}{\partial t}$  da equação é nulo, pode-se então expressá-la da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = W \quad (2.8)$$

Em casos onde o aquífero seja homogêneo, isotrópico e que a condutividade hidráulica seja equivalente para as três principais direções do fluxo (x, y, z). A partir dessas considerações chega-se à equação diferencial parcial - Equação de Laplace, expressa por:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.9)$$

Outra forma que a equação geral pode assumir ocorre quando se trata de aquíferos não-confinados, em que se aplica o princípio da transmissividade (T), para esse conceito se considera  $T=Kb$  e  $q =Wb$ , como sendo o fluxo por unidade de área, onde  $b$  é a espessura saturada do aquífero. Devido a tais considerações a equação assume a forma não-linear - Equação de Boussinesq -, dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (2.10)$$

Em aquíferos confinados de espessura saturada  $b$  e transmissividade  $T$ , tem-se a seguinte equação dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = q \quad (2.11)$$

## 2.2 Modelagem Matemática Integrada ao Fluxo Hídrico Subterrâneo

A modelagem do fluxo subterrâneo é utilizada como uma ferramenta para se ter domínio de cada variável e se conseguir repostas eficientes, onde em contrapartida haja economia de tempo e de recursos. A complexidade do estudo do escoamento subterrâneo é uma realidade bastante desafiadora já que a dinâmica do comportamento da água em meio poroso apresenta processos bastante peculiares.

Os modelos podem ser classificados quanto a duas características, nesse contexto se enquadram os modelos: físicos, onde, em tanques de sedimentação, o escoamento subterrâneo é reproduzido; e matemáticos, que simulam computacionalmente o fluxo da água em meio subterrâneo aplicando de equações que regem o evento.

Sun (1994) classifica os modelos matemáticos em quatro categorias: i) Determinísticos e estocásticos; ii) Linear e não-linear; iii) Estacionários e dinâmicos; iv) Global e distribuído.

Os modelos distribuídos são especificados por equações diferenciais parciais onde através de métodos analíticos e numéricos são obtidos os resultados desses problemas.

## 2.3 Métodos de Solução para as Equações de Fluxo

A resolução das equações que regem o escoamento em aquíferos, via de regra, possuem alto teor de complexidade, sendo a equação geral não linear e não homogênea, por esse motivo se faz necessário o uso de técnicas analíticas e/ou numéricas no processo de solucionamento. Em seguida descrevem-se os métodos utilizados para resolução desta equação.

### 2.3.1 Métodos Analíticos

Os modelos analíticos fornecem resoluções exatas nas quais apresentam uma função ou conjunto de funções que caracterizam as soluções da equação de

fluxo para os parâmetros incluídos no domínio em estudo. Ao se determinar o valor para um conjunto de parâmetros, resolve-se uma equação para este conjunto, dessa forma se estabelece uma solução de maneira analítica (KRESIC, 1997). A resolução através do método analítico é realizada por meio do uso de procedimentos matemáticos como separação de variáveis, Transformada de Laplace, Transformada de Fourier e outras técnicas.

A restrição ao uso do método analítico ocorre, entretanto, em casos relativamente simples, onde o modelo possui como características o escoamento regular e os parâmetros constantes, apresentando assim uma problemática que não se pode desconsiderar. Esse fato esclarece que a solução analítica só pode ser aplicada em um limitado número de casos, tendo como exemplo a validação da exatidão dos métodos numéricos.

A mais famosa aplicação dessa técnica para um escoamento de aquífero é a equação de Theis (1935), esta equação representa o rebaixamento de um aquífero causado por um bombeamento de um poço. Soluções analíticas são aplicadas em diversas situações e podem ser encontradas nos trabalhos de Li (1972) e Bear (1979). Nos estudos de Costa (2005), Costa e Castro (2007) e Menescal (2008) também é possível encontrar a utilização de modelos numéricos analíticos para soluções de problemas. Gomes e Castro (2005) em seus trabalhos aplicaram o método analítico na modelagem de aquíferos no Brasil.

### **2.3.2 Métodos Numéricos**

O método numérico é aplicado para a obtenção de soluções aproximadas locais. O método é utilizado justamente em situações em não é possível aplicar as técnicas analíticas, dessa forma ocorre a discretização do domínio e a solução do caso é feita através da divisão de soluções locais aproximadas.

De acordo com Riguetto (1998), um método numérico é considerado eficiente para a resolução de um sistema de equações diferenciais quando apresenta consistência, convergência e estabilidade. A consistência é verificada quando as equações discretizadas tendem às equações originais, ao passo em que a malha é refinada; a convergência se dá quando a solução obtida com esquema tende para a solução exata à medida que ocorre a refinação da malha; e a estabilidade consiste na não ocorrência do aumento do erro numérico de um passo de tempo para o seguinte (RIGHETTO, 1998).

A solução numérica utilizada para as equações que descrevem o fluxo hídrico em meio poroso é realizada através do uso de três principais métodos numéricos, os quais são: o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Os modelos apresentados por esses métodos permitem que as equações diferenciais se tornem em um grupo de equações algébricas, podendo assim serem solucionadas através do uso de computadores. A aplicação do MEF na equação do escoamento de aquíferos e sua conceituação é trabalhada pelo autor Segerlind (1984) e a conceituação do MEC pode ser encontrada na obra de Banerjee (1994).

O Método das Diferenças Finitas (MDF) surge com base no conceito de derivada, onde ao invés do uso do  $\Delta x$  como um intervalo infinitesimal, esse é considerado com um valor finito, no entanto diminuto o suficiente tomando-se como referência à área de trabalho da função em estudo. Assim no MDF o fluxo subterrâneo torna-se uma malha em que os valores calculados das funções contínuas nos pontos da malha são aproximados pelas funções contínuas.

Cabral e Demétrio (1997) apresentam em seu trabalho as expressões algébricas que podem ser utilizadas para cada dimensão do problema de fluxo em meio poroso, as quais podem ser do tipo:

- Diferença Progressiva (calcula-se a derivada partindo de um ponto posterior):

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_i \approx \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x} \quad (2.12)$$

- Diferença Regressiva (calcula-se a derivada partindo de um ponto anterior):

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_i \approx \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.13)$$

- Diferença Central (calcula-se a derivada a partir de um ponto com metade de um intervalo à frente e metade de um intervalo para trás):

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_i \approx \frac{h_{i+1/2} - h_{i-1/2}}{\Delta x} \quad (2.14)$$

Através da aplicação da diferença central, tem-se a primeira derivada da carga hidráulica:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{i+1/2} - h_{i-1/2}}{\Delta x} \quad (2.15)$$

A expressão normalmente utilizada para a segunda derivada é:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{h_{i-1,j} - 2h_{i,j} + h_{i+1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (2.16)$$

## 2.4 Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos

A calibração em águas subterrâneas, de acordo com Kresic (1997) é o processo que consiste em encontrar as condições de contorno, períodos de estresse e parâmetros hidrogeológicos que produzem resultados que mais se aproximam das observações feitas em campo das cargas hidráulicas e fluxos. Schuster e Araújo (2004) afirmam que o procedimento da estimativa de parâmetros é uma fase significativa no processo de modelagem e é necessária uma grande parcela do tempo durante a simulação do sistema aquífero.

O modelo de calibração PEST impulsionou a evolução da automatização dos processos de calibração, que tem o objetivo de diminuir o tempo das operações na solução numérica, assim como a quantidade etapas e incertezas (DOHERTY; BREBBER; WHITE, 1994). A não estabilidade dos métodos e a falta de unicidade das soluções geram opiniões negativas a respeito desses processos de calibração (ANDERSON; WOESSNER, 1992).

A estimativa de parâmetros em sua abordagem clássica dispõe que os métodos de calibração trabalham na minimização de uma função objetivo composta pela diferença entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas por meio do processo da técnica inversa dos mínimos quadrados e elaborada em programas de computador (TAVARES, 2010). Ressaltam-se os programas que assim como o PEST (DOHERTY, 1994) já mencionado também utilizam da metodologia como o MODINV (DOHERTY, 1990), MODFLOWP (HILL, 1992) e o UCODE (POETER e HILL, 1998).

Guo e Zhang (2000) e Schuster e Araujo (2004), estes em uma produção subsequente, trabalham a estimativa de parâmetros hidrodinâmicos através de outra

abordagem fundamentada na minimização de uma função composta pela diferença dos gradientes hidráulicos observado e calculado. Essa técnica ficou conhecida como *Hydraulic Gradient Comparison Method*, que em português significa Método Iterativo de Gradiente Hidráulico (MIGH).

## 2.5 Hidroinformática

A gestão de recursos hídricos utiliza a tecnologia da informação como meio de melhorar a eficiência e simplificar a tomada de decisões. A escolha da tecnologia da informação, no âmbito do gerenciamento hídrico, apresenta um rápido crescimento muito embora impulsionada mais pela tecnologia disponível do que pelas necessidades demandadas. Os órgãos gestores responsáveis pelas tomadas de decisão necessitam de uma abordagem integrada para um gerenciamento mais eficaz da água o que requer a implantação de uma nova estrutura conceitual. Nesse contexto, a hidroinformática, que consiste na integração das várias áreas de conhecimento tradicionais associadas à compreensão e gestão de recursos hídricos, utilizando a tecnologia da informação como fator de integração comum, se afirma como uma área do conhecimento que fornece uma série de avanços na tecnologia da informação que podem ser de fato aproveitados na área dos recursos hídricos. (MARSALEK,1996).

A hidroinformática apresenta tal quadro em que avanços na tecnologia da informação podem ser aplicados no gerenciamento de recursos hídricos, dado o fato de ser capaz de dispor de ferramentas de modelagem sofisticadas que permitem aos profissionais da área modelar o processo integrado dos fenômenos relacionados ao meio hídrico. A hidroinformática oferece de fato avanços nas áreas tecnológicas voltada para os recursos hídricos. Esta afirmação é examinada à luz de como os cientistas e engenheiros dos ramos da hidráulica e da hidrologia adaptaram avanços particulares em mecânica, geografia, biologia, engenharia civil e, especialmente, tecnologia da informação.

Dessa forma, pode-se afirmar que a hidroinformática se constitui na integração das várias áreas do conhecimento tradicionais associadas à compreensão e estudo dos recursos hídricos, utilizando a tecnologia da informação como fator de integração comum.

### **2.5.1 Hidroinformática: Modelagem Matemática e Computacional**

As raízes mais fortes da hidroinformática estão na hidráulica computacional e para os casos de modelagem hidráulica com maior complexidade faz-se necessário gerar soluções numéricas de algumas equações diferenciais sujeitas a condições de contorno particulares usando recursos computacionais. Embora alguns dos processos possam ser bem definidos, outros ainda permanecem parcialmente compreendidos e estão no foco dos estudos científicos. Além disso, a maioria das equações inclui um ou mais parâmetros que devem ser derivados matematicamente através da calibração. O fluxo de vazão estacionário nas águas subterrâneas e os fluxos de superfície livres foram alguns dos primeiros problemas a serem resolvidos usando soluções da equação de Laplace. Seguiram-se a análise de equações hiperbólicas para fluxos dependentes do tempo, utilizando o método das características e das diferenças finitas posteriormente. O conhecimento dos campos de pressão e fluxo dentro de um sistema levou à modelagem dos processos de transporte usando soluções de equações parabólicas que poderiam ser acopladas ou desacopladas aos cálculos de fluxo. (MARSALEK,1996).

As relações paramétricas utilizadas com as equações diferenciais para descrever os fenômenos podem ser estabelecidas no laboratório ou devem ser calibradas a partir de observações de campo. Cada relação é válida para uma série de condições que devem ser respeitadas e vale ressaltar que nenhuma relação deve ser usada fora das condições para as quais foi derivado sem se tomar nota da exceção.

As técnicas de análise numérica na modelagem de simulação variaram de diferenças finitas a elementos finitos e Euleriana a Lagrangea. As técnicas de diferenças finitas explícitas, características e implícitas têm sido dominantes na busca de métodos precisos e eficientes de computação. É necessário um cuidado para preservar a conservação de várias propriedades inerentes às equações governantes e minimizar os erros numéricos decorrentes da aproximação numérica (MARSALEK,1996). Pesquisas consideráveis ainda estão sendo realizadas em técnicas de análise numérica para uso comercial para resolver problemas como o tratamento simultâneo de fluxos sub e supercríticos, bem como fluxos de superfície livre e pressurizados em sistemas de esgoto, por exemplo.

Além da solução numérica das equações, existe a necessidade de identificar parâmetros nas equações, de modo que as previsões computadas possam alcançar o melhor ajuste com dados observados. Isso pode ser feito por "teste e erro": executando iterativamente o programa e adaptando os parâmetros. As técnicas de pesquisa operacional podem, no entanto, ser usadas para automatizar essas estratégias manuais. Uma função objetiva definida, em termos do quadrado da diferença entre os dados calculados e observados pode ser minimizada usando técnicas como o gradiente mais íngreme ou algoritmos genéticos. Também há problemas de estimativas de valor inicial para problemas de marcha do tempo e a assimilação de dados observados dentro do domínio de cálculo usando alguma forma de modelagem inversa ou técnica de correspondência iterativa.

As condições de limite espacial para as equações diferenciais consistem em grande parte nos atributos do sistema, como a topografia, incluindo áreas, terreno, uso do solo e assim por diante. Esses dados são originários de pesquisas que resultam em mapas, gráficos e planos. As informações desses formatos intermediários podem ser extraídas por digitalização e depois usadas por ferramentas de modelagem geométrica que incorporam sistemas de design (CAD) e de informações geográficas (SIG) assistidos por computador, de forma adequada às equações diferenciais.

De acordo com Marsalek (1996) as Condições de fronteiras temporais podem envolver séries de longo tempo de informações em alguns pontos espaciais. Como os dados espaciais e temporais, pode haver necessidade de gerenciar lacunas nos conjuntos de dados. Existem várias técnicas de interpolação e técnicas adequadas: análise de cluster, métodos discriminantes, regressões múltiplas, análise de Fourier e filtros de Kalman.

Respostas confiáveis da modelagem de simulação são necessárias em uma variedade de condições. Eles precisam ser verificados para diferentes cenários abrangendo uma ampla gama de condições diferentes. Eles precisam ser testados quanto à sua capacidade de fazer diagnósticos corretos e precisos. As comparações devem ser feitas com dados de referência retirados de situações analíticas e da vida real. O que se busca é a confirmação de simplificações nas equações diferenciais e dos intervalos e magnitudes válidos de parâmetros para situações específicas. A avaliação dos resultados deve ser suportada pela interação com processadores gráficos inteligentes, acompanhada de análises estatísticas apropriadas.

Foi feita referência aos avanços em ciência da computação, telecomunicações e dispositivos microeletrônicos baratos e eficientes, ou seja, tecnologia da informação e tecnologias auxiliares. O último se refere a técnicas e métodos de computação, como engenharia de software, inteligência artificial e programação gráfica, entre outros. Sua influência não só afetou a direção da modelagem computacional, mas também destacou as ferramentas e técnicas complementares de gerenciamento de dados. Essas tendências são sintomáticas do surgimento da hidroinformática como uma área de conhecimento que as abraça.

### **2.5.2 Hidroinformática e Gerenciamento de Dados**

A tomada de decisões no gerenciamento dos recursos hídricos é fortemente dependente da aquisição, arquivamento e análise de dados. Esses conjuntos de dados são usados para identificar deficiências de projeto e operação, acomodar o desenvolvimento da captação, planejar trabalhos de engenharia e melhorar o desempenho operacional. Cada vez mais, o valor percebido de tais dados e a necessidade de arquivá-lo e analisá-lo de forma rápida e eficiente está levando ao gerenciamento baseado em computador dos dados desde a aquisição até a aplicação na tomada de decisões. No centro de tal gestão é o reconhecimento de que todos os dados são espaciais e temporais e, portanto, podem ser tratados dentro de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Um SIG é um sistema de gerenciamento de banco de dados especializado, usado em estudos como gerenciamento de mapas, manejo de terras e recursos, pesquisa demográfica, análise ambiental, pesquisa de mercado e entre outros. Em particular, um GIS fornece aos usuários informações sobre objetos e recursos em seu contexto gráfico. Essas informações podem ser exibidas e analisadas dentro do SIG. O sistema pode ser usado para interrogar relações espaciais entre diferentes tipos de objetos e investiga-los usando funções embutidas para computar mudanças nos locais ou características de recursos e objetos contextualizados geograficamente (MARSALEK,1996).

Hidrólogos, como Ball (1994) e Djokic et al. (1996), argumentam o caso do SIG como uma ferramenta de integração para a modelagem hidrológica. Os autores apontam para um "tipo de sinergia operacional" que pode ser explorada por um SIG que presta serviços a modelos hidrológicos. Por exemplo, o modelo poderia ser fornecido com dados espaciais de um SIG. O modelo, após realizar cálculos

hidráulicos ou hidrológicos, pode retornar os valores calculados ao SIG para posterior análise espacial. Djokic et al. (1996) também sugerem que um SIG pode ser usado como uma ferramenta de desenvolvimento de interface para modelagem na medida em que os modelos hidrológicos geralmente possuem interfaces de usuário antiquadas que podem ser substituídas por interfaces de usuário desenvolvidas usando ferramentas SIG's. Essa interação sinérgica entre um SIG e o modelo hidrológico depende crucialmente se os dados (arquivos) podem ser trocados entre os dois sistemas.

A tomada de decisões é, portanto, fortemente dependente da relação complementar entre dados históricos e modelagem. Embora a hidroinformática tenha suas raízes na modelagem de simulação, ela aborda a tomada de decisões com base em dados históricos coletados do mundo real como é nos resultados dos modelos. Além disso, ela aborda a forma como a tecnologia da informação pode melhorar a aquisição, arquivamento e análise de dados, integrada com a modelagem, para proporcionar uma melhor tomada de decisão em todos os níveis de gerenciamento dos recursos hídricos.

### ***2.5.3 Hidroinformática e Tecnologia da Informação***

A tecnologia da informação foi concebida em sua generalidade para suprir as necessidades das áreas emergentes de informática, microeletrônica e telecomunicações que abordam a produção, armazenamento e transmissão de uma ampla gama de informações de formas que dizem que revolucionam a sociedade contemporânea (GREEN, 1991).

A ciência da computação se baseia no estudo de computadores, seus princípios e uso subjacentes. Essencialmente, é um corpo sistemático de conhecimento com uma base de teoria que ajuda a lidar com os problemas práticos de projeto e construção de sistemas úteis dentro das restrições de tempo e orçamento. A orientação prática motivou muitos a argumentar que é tanto um ramo de engenharia quanto uma ciência. A informática também foi definida como "o estudo com a ajuda de computadores, de processos e estruturas computáveis" (WALKER, 1995). De maneira geral, a ciência da computação trata sobre linguagens de programação e sistemas operacionais. Em particular, essa ciência pode ser dividida em quatro áreas principais de atividade: engenharia de software, sistemas de hardware, informática teórica e aplicações e usos.

Diversas adaptações práticas de engenharia levaram à evolução das práticas científicas para definir, projetar, desenvolver e manter sistemas de software; ou seja, a engenharia de software emergiu como uma área de conhecimento específica. As ferramentas de engenharia de software assistido por computador (CASE) ajudaram no desenvolvimento de artefatos bem projetados para atender aos requisitos dos usuários finais e produzidos em tempo e restrições orçamentárias. O uso de tais ferramentas aumentou a produtividade do software e ajudou com controle de qualidade. A engenharia de software também abrange tópicos tão diversos como reutilização de software, confiabilidade e segurança de software, documentação de software e métodos formais para especificação e design de sistemas de software (MARSALEK,1996).

Nesse contexto, faz-se importante falar sobre o MODFLOW, que consiste em um modelo de fluxo de diferenças finitas modular do US Geological Survey (USGS), e é definido como um código computacional que soluciona a equação do fluxo de água subterrânea. Este software é utilizado por hidrogeólogos com o objetivo de simular o fluxo de água subterrânea por meio de aquíferos. O código-fonte é um programa livre e de domínio público, que é possível de ser compilado e executado em sistemas operacionais como o Microsoft Windows (HILL, 1992). Desde início do seu desenvolvimento, na década de 1980, o USGS realizou quatro grandes lançamentos, sendo agora considerado o código padrão para simulação de águas subterrâneas. Atualmente, há várias interfaces gráficas comerciais e não comerciais sendo criadas para o MODFLOW.

Os desenvolvimentos em engenharia de software e telecomunicações ajudaram ainda a resolver uma série de problemas na gestão de águas residuais, desde o projeto de redes de esgoto ao controle de sistemas em tempo real. A conscientização sobre o significado da engenharia de software levou ao estabelecimento de casas de software comercial, como Wallingford Software dentro da HR Wallingford, que é um laboratório internacional de engenharia hidráulica. Outros laboratórios similares, como o Danish Hydraulics Institute e a Delft Hydraulics, fortaleceram seus departamentos de computação (MARSALEK,1996). Cada uma dessas organizações descreve agora seus programas como produtos de software com controle de versão, protocolos de depuração, procedimentos de teste alfa e beta, protocolos de entrega, suporte a linha direta, grupos de usuários e assim por diante. A maior parte dessa mudança organizacional pode ser atribuída a

desenvolvimentos em engenharia de software com ênfase na produção de sistemas de software controlados por qualidade dentro do prazo e restrições orçamentárias.

Uma característica particular dos softwares desenvolvidos é o uso extensivo dos últimos avanços em interfaces gráficas de usuário. Os dispositivos de entrada alternativos incluem janelas, ícones, menus e dispositivos de impressão (WIMPS), juntamente com cores e instalações para redimensionamento, etc. Técnicas sofisticadas de visualização de dados, tais como mapeamento de contornos e remoção de linha escondida, foram aplicadas em dinâmicas de fluidos computacionais, engenharia de transferência de calor e engenharia assistida por computador para auxiliar na compreensão de energia e fluxos de massa para e de várias fontes e sumidouros. O valor dessas técnicas de visualização de dados pode ser visto na exibição de resultados pelo Systeme Hydrologique Europeen (ABBOTT ET AT.,1986), (ABBOTT, 1991).

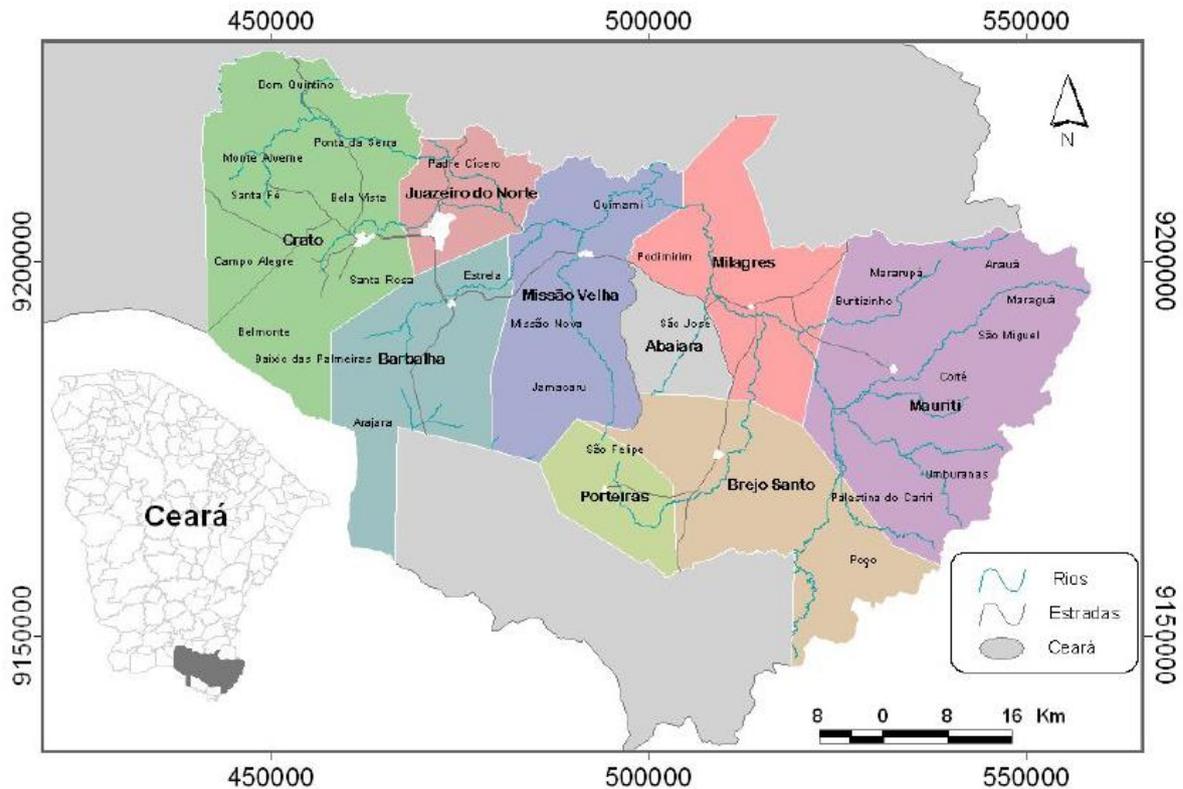
## **2.6 Área de Estudo – Caracterização da Bacia Sedimentar do Araripe**

A maior reserva de água subterrânea do Estado do Ceará está localizada na Bacia Sedimentar do Araripe, porção sul do estado, na divisa com os estados de Pernambuco e Piauí (Figura 03). O relevo é constituído por dois domínios principais, planalto e depressão, conhecidos como Chapada do Araripe e Vale do Cariri, respectivamente (COGERH, 2010).

A Chapada ocupa 73% da Bacia Sedimentar do Araripe e compreende altitudes que variam de 1.000m ao norte de Porteiras-CE, no setor oriental (porção leste), a 700m nas imediações de Araripina-PE, no setor ocidental (porção oeste) (DNPM, 1996), destacando-se na paisagem nordestina devido os desníveis em torno de 400m com a superfície sertaneja que circunda a chapada.

Na porção oriental (leste) da Bacia Sedimentar do Araripe, estão localizadas as três principais cidades da região do cariri cearense, que são Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha, além de Missão Velha, Brejo Santo, Mauriti, Milagres, Porteiras, Jardim e Abaiara.

Figura 03 - Porção leste da Bacia Sedimentar do Araripe



Fonte: COGERH (2010)

### 2.6.1 Aspectos Fisiográficos

De acordo com dados do Guia Municipal 2009/2010 (COGERH, 2010), a região estudada é caracterizada em sua maioria por um clima tropical quente semiárido brando, tropical quente e tropical quente sub-úmido. As chuvas ocorrem de janeiro a abril, podendo se estender até maio, nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte; a precipitação pluviométrica média para a região encontra-se em torno de 668,6mm a 1.153mm. Registros de postos pluviométricos na porção leste da Bacia do Araripe apresentam uma precipitação média anual de 945,5 mm, sendo os maiores valores registrados em Barbalha e Crato.

A vegetação, conforme a COGERH (2010), é basicamente formada por carrasco, floresta caducifólia espinhosa, floresta subcaducifólia tropical pluvial, floresta subcaducifólia xeromorfa e floresta subperenifólia tropical plúvio-nebular.

A região é caracterizada por duas unidades geomorfológicas: a Chapada do Araripe e a Depressão Sertaneja. Diversos solos são encontrados na região, sendo a maioria: latossolo amarelo distrófico, podzólico vermelho amarelo eutrófico,

aluviais eutróficos, litólico eutrófico, areias quartzosas distróficas e vertissolo (COGERH, 2010).

### **2.6.2 Geologia e Hidrogeologia da Bacia Araripe**

A Bacia Araripe é composta por um pacote de rochas sedimentares que se sobrepõem em rochas do embasamento cristalino. Neste trabalho apresenta-se de forma simplificada a geologia da bacia, a qual poderá ser encontrada de uma forma mais completa no trabalho desenvolvido pela COGERH em 2010 no Plano de Monitoramento e Gestão dos Aquíferos da Bacia Sedimentar do Araripe. A Bacia do Araripe está localizada na Província Borborema, no Nordeste do Brasil, desenvolveu-se em consequência de uma série de eventos geológicos relacionados ao rifteamento do Gondwana e subsequente abertura do Atlântico Sul. Sua evolução tectônica tem sido interpretada com base no registro geológico preservado que abrange rochas com idades que variam do Paleozóico ao Cretáceo (MORAIS NETO et al., 2006).

De acordo com Moraes Neto et al (2006) a estratigrafia da Bacia do Araripe pode ser resumida pela seguinte sequência:

- (i) uma sequência paleozóica (Formação Mauriti, de idade siluriana-ordoviciano);
- (ii) uma sequência pré-rifte de idade jurássica, que segundo Ponte (1991) é representada por um sistema deposicional, denominado de Sistema Lacustre-Raso, Fluvial e Eólico do Andar Donjoaniano, que comporta duas unidades litoestratigráficas: a Formação Brejo Santo e a Formação Missão Velha;
- (iii) uma sequência rifte de idade neocomiana (Formação Abaiara, composta por arenitos, folhelhos e argilas carbonáticas depositados por sistemas flúvio-lacustres) e;
- (iv) uma sequência pós-rifte cretácea representada por três sistemas deposicionais distintos: sedimentos de fácies carbonáticas, fluviais e lacustres de idade Alboaptiana (Formação Rio da Batateira); sedimentos lacustre-evaporíticos e fácies marinha depositadas no Mesoalbiano (Formações Santana e Arajara); e sedimentos com fácies fluviais meandrante a entrelaçada, depositados do Albiano ao Cenomaniano (Formação Exu).

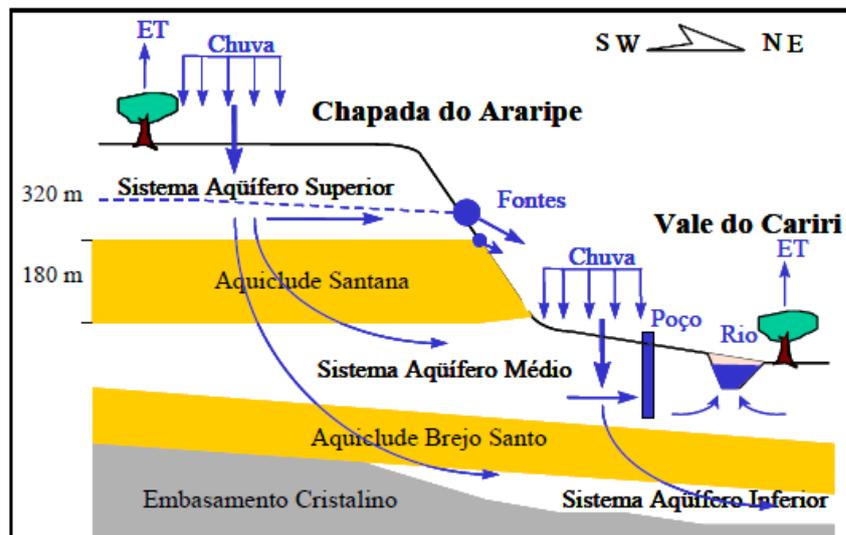
A Bacia Sedimentar do Araripe apresenta, portanto, uma diversificação litológica caracterizada por sequências alternadas de arenitos, siltitos, calcários e folhelhos, podendo alcançar uma espessura total de aproximadamente 1.600m.

Essa diversificação litoestratigráfica propicia a ocorrência de uma alternância de aquíferos, aquíferos e aquíferos, variando espacialmente e apresentando descontinuidades verticais e laterais (COGERH, 2010).

De acordo com Mont'Alverne et al., (1996) a similitude de características hidrogeológicas, a imprecisão na descrição de grande parte dos perfis litológicos e a pequena profundidade dos poços tubulares, adotaram a seguinte divisão hidrogeológica na Bacia do Araripe (Figura 04):

- a) Sistema Aquífero Superior (Formações Exu e Arajara) apresenta aproximadamente 320 m de espessura;
- b) Aquíclode Santana tem aproximadamente 180 m de espessura;
- c) Sistema Aquífero Médio (Formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha) tem aproximadamente 500 m de espessura;
- d) Aquíclode Brejo Santo tem aproximadamente 400 m de espessura, e;
- e) Sistema Aquífero Inferior (Formação Mauriti e parte basal da Formação Brejo Santo) com 60 a 100 m de espessura.

Figura 04 - Esboço esquemático do funcionamento dos sistemas aquíferos da Chapada do Araripe.



Fonte: Mendonça (2001)

### 2.6.3 Sistema Aquífero Médio

Segundo Mendonça (2006) o Sistema Aquífero Médio é formado pelas formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha e possui  $K \approx 10^{-6}$  m/s. A alimentação dessa unidade é realizada diretamente nas áreas aflorantes pelas

águas da chuva, e através da infiltração de águas dos rios influentes, alimentados pelas fontes, muito comuns no sopé da Chapada do Araripe.

Estudos realizados por Mont'Alverne et al. (1996) atribuem para a região entre Crato e Missão Velha uma vazão de escoamento natural de  $2,88\text{m}^3/\text{s}$ , com uma recarga anual de  $90,8 \times 10^6\text{m}^3$ , mais a contribuição das fontes de  $2,32 \times 10^6\text{m}^3/\text{ano}$ , perfazendo um total de  $93,1 \times 10^6\text{m}^3/\text{ano}$ .

Constituem-se como exutórios naturais os rios efluentes e evapotranspiração, representando uma pequena parcela e, em maiores proporções, tem-se a exploração das águas subterrâneas através de poços tubulares que representa o exutório artificial. A descarga do sistema aquífero para os rios ocorre no período de estiagem, através de infiltração inversa, ou seja, quando o rio se torna influente podendo ser comprovado através do rebaixamento de nível estático, observado nos poços entre Crato e Missão Velha. Considerando como volume de descarga o mesmo que o de recarga, o volume final de descarga seria a recarga menos o volume explorado nos poços situados na área (Viana, 2007).

#### ***2.6.4 Uso das Águas Subterrâneas na Bacia Sedimentar do Araripe***

As águas superficiais e subterrâneas possuem uma relação indissociável no abastecimento da população em geral, pois nesta bacia a oferta hídrica é  $2,510\text{m}^3/\text{s}$  de águas superficiais e  $2,953 \text{m}^3/\text{s}$  de águas subterrâneas (COGERH, 2010).

Vários núcleos urbanos do Cariri cearense se abastecem de água subterrânea de forma exclusiva ou complementar, constituindo o recurso mais importante destas cidades e distritos. Indústrias, propriedades rurais, escolas, hospitais e outros estabelecimentos utilizam, com frequência, água de poços profundos. O maior volume explorado de água ainda é, todavia, destinado ao abastecimento público. Importantes cidades do Cariri dependem integral ou parcialmente da água subterrânea para abastecimento humano. De acordo com os relatórios da COGERH (2010), o número de poços tubulares em operação na Bacia do Salgado está estimado em cerca de 1.800, com um número anual de perfurações de aproximadamente 60.

A exploração da água subterrânea no Brasil cresceu muito devido a diversos fatores como a urbanização crescente, o aumento de áreas irrigadas, a implantação de parques industriais, favorecida também pelo avanço tecnológico na área de perfuração de poços. Por outro lado o crescimento se deu de forma desordenada,

por falta de planejamento, por falta de legislação adequada e pelo fato de na cultura brasileira as pessoas acharem que sendo proprietárias do terreno têm o direito de perfurar um poço e extrair toda a água que quiserem.

Faz-se, portanto, necessário compatibilizar os usos sustentáveis dos recursos hídricos com o desenvolvimento econômico e incorporar duas ideias-chave: a de um planejamento de longo prazo, periodicamente revisado, e a de um processo de decisão e execução de forma integrada, descentralizada e participativa.

## **2.7 Período de Seca no Semiárido do Nordeste e Características da Seca de 2010-2016**

O fenômeno da estiagem consiste em um processo natural que causa um impacto no regime hídrico. Na Região do Nordeste do Brasil a seca afeta toda a população, principalmente os que se encontram em situação de maior vulnerabilidade da região semiárida. Essa problemática cria circunstâncias de deficiência hídrica e oferece riscos para a segurança alimentar, energética e hídrica.

De acordo com o CEMADEN (2016), a seca que se acentuou no ano de 2012 e tomou maiores proporções em 2015 é considerada a mais grave das últimas décadas e tem tido um impacto em várias localidades semiáridas nos estados do Nordeste, prejudicando quase nove milhões de pessoas.

No Nordeste as secas têm sido relatadas desde o século XVI. O histórico das secas na região se dá nos seguintes períodos: 1583, 1603, 1624, 1692, 1711, 1720, 1723-1724, 1744-1746, 1754, 1760, 1772, 1766-1767, 1777-1780, 1784, 1790-1794, 1804, 1809, 1810, 1816-1817, 1824-1825, 1827, 1830-1833, 1845, 1877-1879, 1888-1889, 1891, 1898, 1900, 1902-1903, 1907, 1915, 1919, 1932-1933, 1936, 1941-1944, 1951- 53, 1958, 1966, 1970, 1976, 1979-1981, 1982-1983, 1992-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005, 2007, 2010-2016 (CEMADEN, 2016).

O início da seca de 2010-2016 tem como causas meteorológicas as alterações na precipitação e na circulação atmosférica. Esses fatores são consistentes com a atuação temperaturas mais frias que o habitual na zona equatorial do oceano Pacífico, apresentando movimentações ascendentes acima do normal e precipitação na região leste da Amazônia. Na alta atmosfera, a circulação consistiu em uma maior divergência sobre a Amazônia e uma maior convergência na região Nordeste do Brasil. No Atlântico Sul, águas incomumente mais frias durante os meses de Setembro e Março-Maio provocaram um aumento da pressão no

Atlântico Sul. Esta alta pressão relacionou-se com a subsidência provocada pelo forte movimento ascendente na Amazônia, determinando a subsidência de baixo nível que afetou de maneira negativa o regime das chuvas do Nordeste o que ocasionou condições de menos chuva no Nordeste. As condições de um menor volume de precipitações ficaram definidas no início de dezembro de 2011 na área norte e depois se espalharam por toda a região Nordeste no período da quadra chuvosa de 2012, com reflexos repetidos e prolongados até o ano de 2016 (CEMADEN, 2016).

As mudanças climáticas afetam os fenômenos de estiagem no Semiárido nordestino, que tendem a tornar-se mais severas no futuro, e apresentar impactos com maior potencialidade, conforme diversos modelos citados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, o IPCC, e pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, o PBMC.

A seca em questão teve uma potencialidade e impacto, não visto em várias décadas passadas, causando prejuízos em centenas de localidades em toda a região Nordeste. O período de estiagem afetou também cidades de grande porte da região semiárida causando escassez de água potável para o abastecimento da população e do suprimento de energia em áreas urbanas.

Um dos graves resultados da grande seca de 2010-2016 é o de causar enormes prejuízos em consequência das perdas de safras e das necessidades de investimentos em ações emergenciais para dirimir o impacto negativo, principalmente em relação ao abastecimento emergencial de água e aos usos referentes à agropecuária. Os impactos negativos não atingem tão somente os setores econômicos da agricultura que dependem de maneira mais direta da disponibilidade de chuvas, abrangendo, no entanto, a economia como um todo. O meio ambiente, os recursos hídricos, a biodiversidade, a saúde, a educação e as populações, também sofre com a estiagem, sobretudo as pessoas com menor poder aquisitivo para enfrentar momentos de adversidade (FUNCEME, 2016).

A crise hídrica gerou um prejuízo de R\$ 103,5 bilhões no período de 2013 e 2015. A CNM (Confederação Nacional dos Municípios) realizou esse levantamento, através dos dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres da Defesa Civil. A seca abrange o semiárido brasileiro da região do Nordeste desde 2012, com 33,4 milhões de pessoas atingidas (CEMADEN, 2016).

No entanto, mesmo com todo o robusto e detalhado histórico na adaptação e gerenciamento às secas, a amplitude dos impactos das secas de 2010-2016, no Nordeste, sugere que ainda é preciso aperfeiçoar as medidas de elaboração e de resposta ao risco de seca, o que indica que a região Nordeste ainda não se encontra adaptada às crises de disponibilidade hídrica e que são necessárias análises de vulnerabilidade e avaliação de risco de seca, de maneira integrada.

Políticas públicas para diminuir os prejuízos da seca, de caráter econômico e de distribuição emergencial de água são responsáveis por dirimir a intensidade dos impactos, entretanto, as políticas com enfoque no gerenciamento de crises, podem ter apresentado ineficácia para suportar os danos causados pela seca plurianual.

A consolidação de uma nova política de combate à seca baseada em ações proativas que tenham por objetivo a mitigação dos riscos e vulnerabilidade e o aumento capacidade de superação da região, no que se refere às características econômicas, sociais e ambientais.

A política nacional de secas no Brasil apresentou alguns progressos em sua reformulação, implementando um Monitor de Secas, com sede na Agência Nacional de Águas (ANA), e conta com um mapa preparado mensalmente com a participação de órgãos estaduais do setor de meteorologia, agricultura e recursos hídricos (Funceme). A Política Nacional de Secas ainda necessita melhorar para apresentar bons resultados no gerenciamento dos riscos de seca devendo-se basear em uma plataforma de informações atualizadas a respeito da seca, e na ampliação de estudos sobre vulnerabilidade, impactos e adaptação às secas, assim como na elaboração das respostas às secas, por meio de planejamento adequado.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH)

O Método Iterativo do Gradiente (MIGH) tem por objetivo minimizar as diferenças entre os gradientes observados e calculados. De acordo com os autores Guo e Zhang (2000) a função de otimização do MIGH é do tipo:

$$F_{obj} = \int_R (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) \cdot (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) dx dy \quad (3.1)$$

Em que  $\nabla h^{calc}$  e  $\nabla h^{obs}$  são, respectivamente, os gradientes hidráulicos das cargas calculadas e observadas, sendo R o domínio do fluxo.

Na obra de Bryson e Ho (1975) encontra-se o estudo da otimização matemática utilizada para determinar máximos e mínimos de uma função sujeita a restrições de igualdade. Analisa-se então a função Lagrangeana de acordo com a equação 3.2, a fim de minimizar uma função objetivo do tipo  $f(x,y)$  sujeita à equação  $g(x,y) = 0$  e sendo  $\lambda$  o multiplicador Lagrangeano,

$$L(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda \cdot g(x, y) \quad (3.2)$$

No caso em questão, a função  $f(x,y)$  é o erro quadrático dos gradientes determinados na função 3.2, enquanto  $g(x,y) = 0$  é a função do fluxo subterrâneo confinado em regime estacionário. A forma que a Lagrangeana toma é a seguinte:

$$L = (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs})^2 + \lambda[-\nabla \cdot (T \cdot \nabla h) - q] \quad (3.3)$$

A integral da equação 3.3 representa a forma da nova função objetivo  $L(x,y;\lambda)$  da calibração pelo MIGH:

$$L = \int_R \{(\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs})^2 + \lambda[-\nabla \cdot (T \cdot \nabla h) - q]\} dx dy \quad (3.4)$$

Aplicando-se a identidade de Green, obtém-se:

$$\int_R \lambda[-\nabla \cdot (T \cdot \nabla h^{calc})] dx dy = - \int_R T \cdot \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda dx dy + \int_B \lambda T \cdot \nabla h^{calc} ds \quad (3.5)$$

Em que  $B$  é a região que representa as condições de contorno do caso. Tomando-se que o caso apresenta uma característica da primeira forma:  $h = h_1$

numa região  $B_1$ , e uma característica da segunda forma:  $-T \cdot h\eta = q_1$  numa região  $B_2$ . Assim, substitui-se a equação 3.4 em 3.5, obtendo-se:

$$L = \int_R [(\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs})^2 - T \cdot \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda + \lambda q] dx dy + \int_B \lambda T \cdot \nabla h^{calc} ds \quad (3.6)$$

Causando perturbações  $\delta T$  na transmissividade, derivando a função 3.6 através do cálculo variacional, e tomando  $\delta \nabla h^{calc}$  e  $\delta L$  as variações de primeira ordem de  $\nabla h^{calc}$  e  $L$ , respectivamente, tem-se:

$$\delta L = \int_R \{2\delta \nabla h^{calc} \cdot [\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}] - \delta T \cdot \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda - T \cdot \delta \nabla h^{calc} \cdot \nabla \lambda\} dx dy + \int_{B_1} \lambda \delta T \cdot \nabla h^{calc} ds \quad (3.7)$$

O último termo é integrado somente em  $B_1$ , já que o termo  $\delta(T \cdot \nabla h^{calc})$  vale zero em  $B_2$ . A função  $\lambda$  (3.8) pode ser estabelecida da forma como se segue a fim de suprimir os termos  $\delta \nabla h^{calc}$ :

$$\nabla \lambda = \frac{2}{T} (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) \quad (3.8)$$

Vale ressaltar que a função 3.8 é válida para todo o domínio  $R$  e que  $\lambda = 0$  em  $B_1$ . Substituindo a função na equação 3.7, tem-se:

$$\delta L = - \int_R \frac{2}{T} \nabla h^{calc} \cdot (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) \cdot \delta T dx dy \quad (3.9)$$

A função  $\delta L$  pode ser escrita como o somatório que se segue (3.10), após aplicar a equação 3.8 em todos os subdomínios discretos de  $R$  em que a transmissividade varia:

$$\delta L = - \sum_1^N \int_{r_i} \frac{2}{T_i} \nabla h_i^{calc} \cdot (\nabla h_i^{calc} - \nabla h_i^{obs}) \cdot \delta T_i dx dy \quad (3.10)$$

Em que:  $r_i$  = Pequeno subdomínio em  $R$ ;

$T_i$  = Transmissividade média no subdomínio  $r_i$ ;

$N$  = Número de subdomínios de  $R$ .

A otimização, nesse momento, pode ser resumida a encontrar o mínimo da função  $L$ . Esse processo é realizado derivando a função com relação ao parâmetro

que se pretende calibrar. Para isso, consideram-se as derivadas parciais em relação aos  $N$ , valores de transmissividade do domínio:

$$\frac{\partial L}{\partial T_j} = -\frac{2}{T_j} \int_{r_j} (\nabla h_j^{calc} - \nabla h_j^{obs}) \cdot \nabla h_j^{calc} dx dy \quad (3.11)$$

A partir da equação 2.11 desenvolve-se a equação em aquífero não confinado (equação 3.12), tomando-se  $T = Kb$ , em que a espessura  $b$  do aquífero equivale à carga hidráulica  $h$  no ponto em estudo, considerando como referência o fundo da camada do aquífero. Assim, tem-se a expressão:

$$\nabla \cdot (Kh\nabla h) = q \quad (3.12)$$

No desenvolvimento da função lagrangeana da equação 2.17 tem-se que retirar a não linearidade da equação governante. De maneira que, faz-se  $\phi = \frac{1}{2}h^2$ , onde ao se substituir na equação 3.12, obtém-se:

$$\nabla \cdot (K\nabla\phi) = q \quad (3.13)$$

Para o caso não confinado, soluciona-se de forma semelhante ao confinado, em que somente se substitui a equação governante do fluxo. Assim, a função objetivo para o caso não confinado fica da forma que se segue:

$$\frac{\partial L}{\partial K_j} = -\frac{1}{2K_j} \int_{r_j} [(\nabla h_j^{calc})^2 - (\nabla h_j^{obs})^2] \cdot (\nabla h_j^{calc})^2 dx dy \quad (3.14)$$

De acordo com Tavares (2010), o procedimento numérico da calibração dos parâmetros pelo MIGH traduz-se em representar a equação 3.14 em diferenças finitas com a dimensão de cada célula e realizar um processo iterativo. Esse processo tem começo com a estimativa inicial do parâmetro hidrodinâmico e, depois de cada iteração, o valor do parâmetro é ajustado até que os critérios de convergência sejam alcançados (TAVARES, 2010).

O ajuste da condutividade hidráulica nas iterações do MIGH pode ser realizado através da seguinte expressão proposta por Guo e Zhang (2000):

$$K_i^{j+1} = K_i^j - \lambda \left( \frac{\partial L}{\partial K_i} \right)^j \quad (3.15)$$

Em que:

$K$  = Condutividade Hidráulica;

$\lambda$  = Fator de comprimento da iteração;

$i$  = Índice da célula;

$j$  = Índice da iteração;

Schuster e Araújo (2004) propuseram a equação 3.16, indicando que o método dos mínimos quadrados gera resultados insatisfatórios quando não se conhece o zoneamento do campo de distribuição da condutividade hidráulica:

$$K_i^{j+1} = K_i^j \cdot \frac{|\nabla h_i^j{}^{calc}|}{|\nabla h_i^j{}^{obs}|} \quad (3.16)$$

Considerando as seguintes restrições:

$$K_i^{min} < K_i < K_i^{max} \quad (3.17)$$

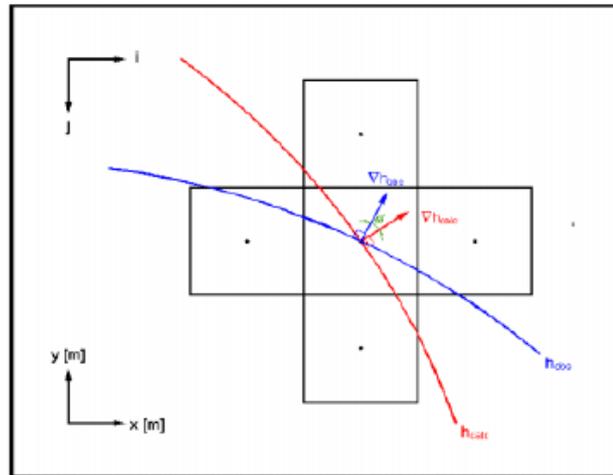
Calcula-se, em cada iteração, o ângulo  $\varphi$  formado pelos vetores gradiente hidráulico observado e calculado (Figura 05), conforme Equação (3.18) e a raiz do erro quadrático médio (RMSEH) dado pela Equação (3.19), finalizando o processo iterativo quando a média dos ângulos  $\varphi$  e/ou o RMSEH atingem um valor mínimo predefinido.

$$\varphi_j = \arccos \frac{\nabla h_j^i{}^{obs} \cdot \nabla h_j^i{}^{calc}}{|\nabla h_j^i{}^{obs}| |\nabla h_j^i{}^{calc}|} \quad (3.18)$$

$$RMSEH = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h^{obs} - h^{calc})_i^2} \quad (3.19)$$

Em que:  $N$  = quantidade de pontos observados ou número de células ativas.

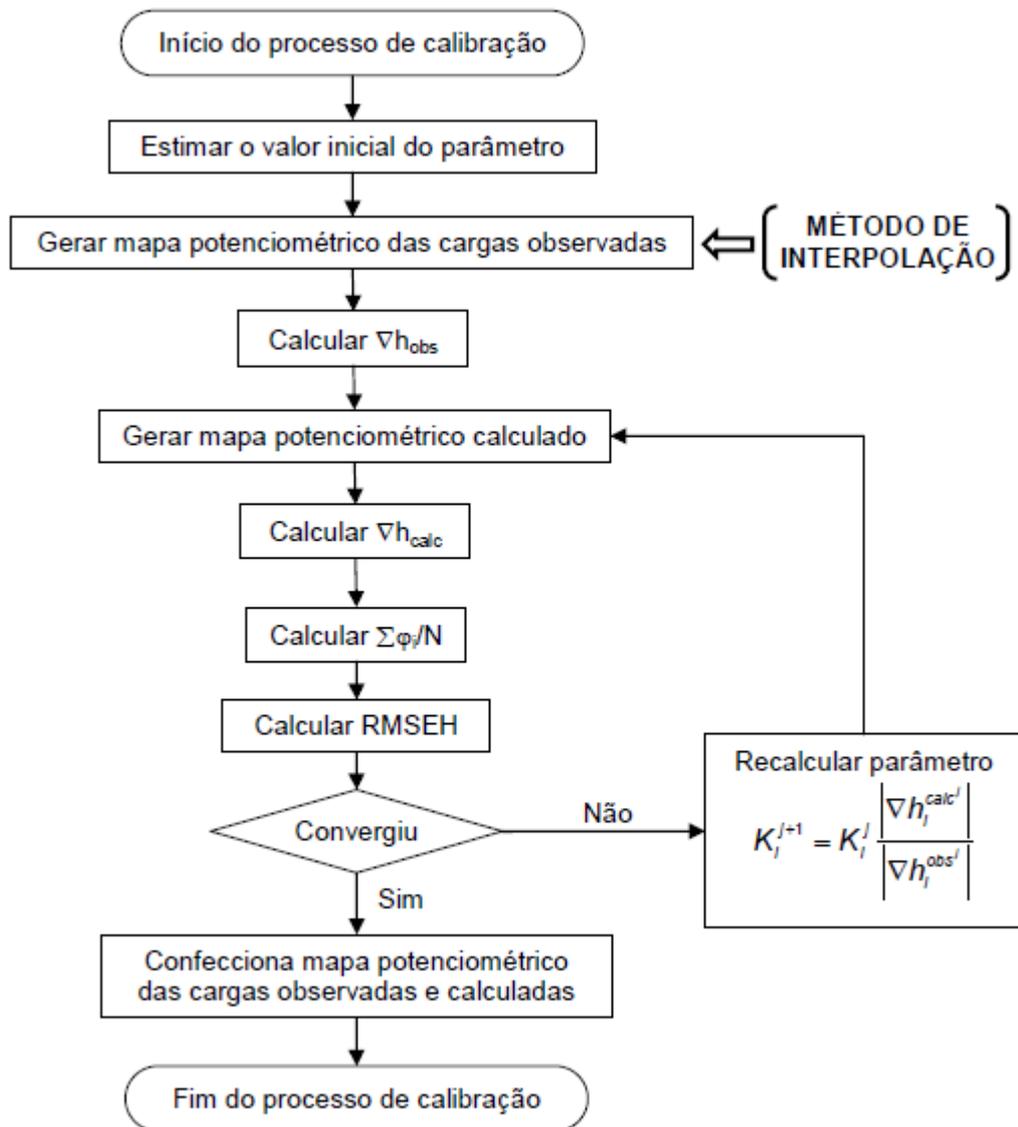
Figura 05: Ângulo entre os gradientes hidráulicos dos modelos simulado e observado.



Fonte: Souza (2007)

O fluxograma a seguir apresenta as etapas do processo de calibração de parâmetro hidrodinâmico pelo método iterativo do gradiente hidráulico (Figura 06).

Figura 06 – Fluxograma do processo de calibração pelo Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.



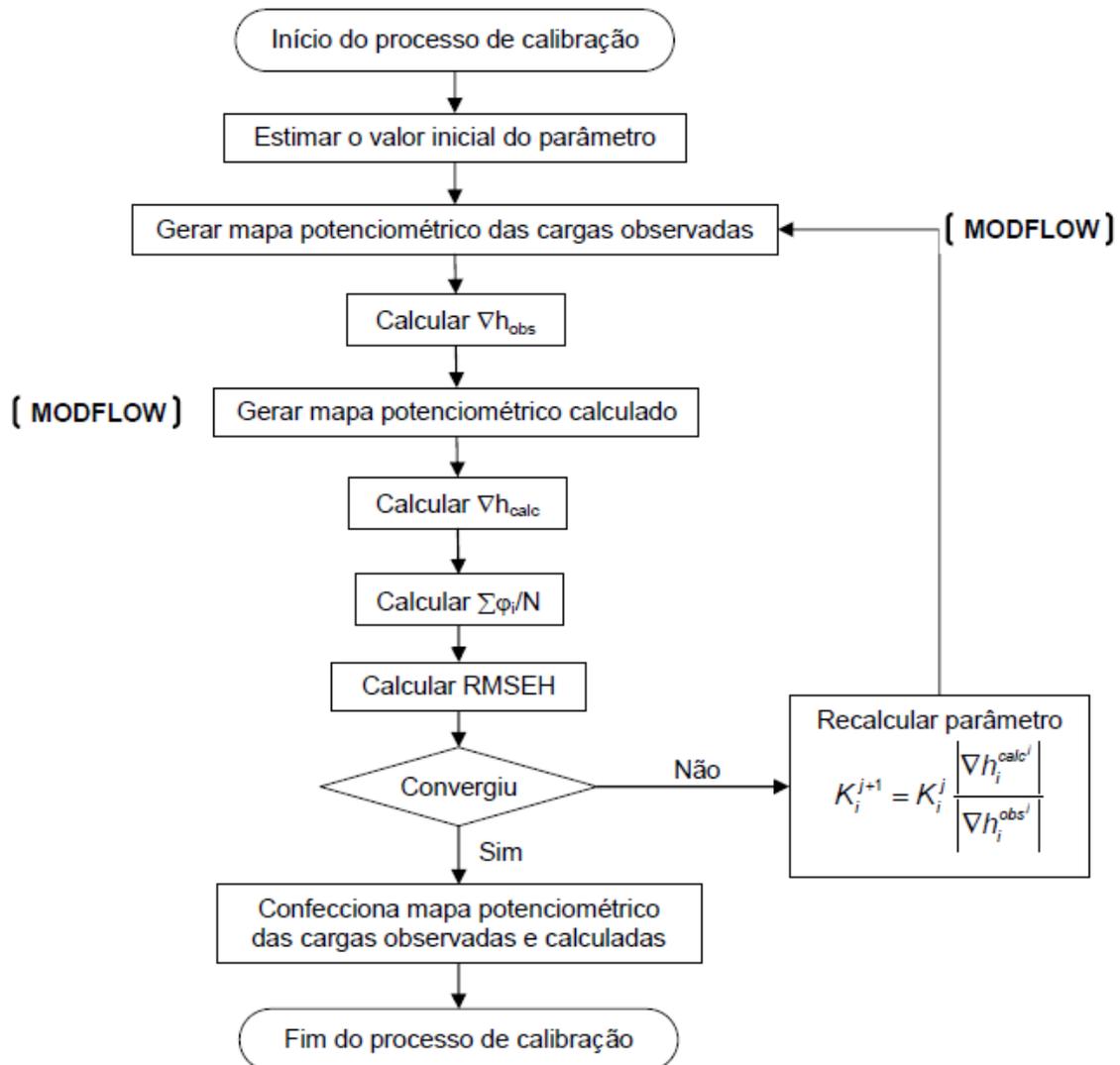
Fonte: Adaptado de Schuster e Araújo (2004)

Tavares (2010) realizou modificações na etapa de geração da matriz de cargas observadas, deixando invariáveis as cargas observadas em campo. De acordo com este processo proposto por Tavares (2010) as células não-fixas do modelo respondem de maneira hidrogeológica às características da área, levando em conta os valores observados em campo, que são as células fixas do modelo.

Depois de produzidas as cargas tanto observadas como calculadas, verifica-se então a convergência segundo o MIGH, e gera-se assim uma nova matriz do parâmetro, dando novo início o processo iterativo.

Tem-se assim o fluxograma do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico conforme o procedimento proposto por Tavares (2010) (Figura 07):

Figura 07 – Fluxograma do processo de calibração pelo Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Modificado.

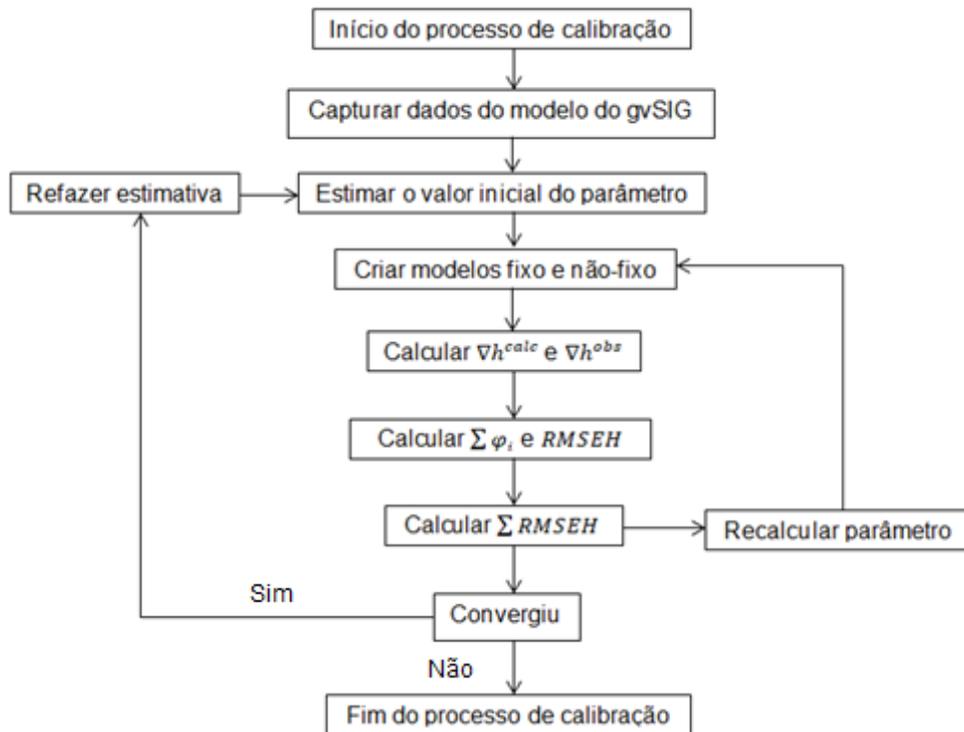


Fonte: Tavares (2010)

### 3.1.1 Implementação do Método de Busca no MIGH

O método de busca foi implementado de maneira simultânea ao MIGH a fim de solucionar o problema da não unicidade de soluções para modelos que possuem apenas uma única camada. Essa alteração torna possível a calibração da condutividade hidráulica horizontal independente do valor inicial de entrada. Dessa forma, um novo fluxograma é proposto por Mendonça (2014) (Figura 08):

Figura 08: Fluxograma do processo de calibração pelo Método Iterativo do Gradiente Hidráulico com Implementação do Método de Busca.



Fonte: Adaptado de Mendonça (2014)

De acordo com esse procedimento proposto, depois de realizada a calibração considerando e estimativa inicial definida, a calibração é refeita com a seguinte estimativa disposta abaixo:

$$k_{inicial}^{j+1} = k_{inicial}^j + \alpha \quad (3.21)$$

Em que:  $K_{inicial}$ : Estimativa inicial para o processo de calibração [L]/[T];

$\alpha$ : Valor a ser adicionado para variar a estimativa [L]/[T].

O valor de  $\alpha$  consiste em um valor fixo que deve ser determinado baseando-se na ordem da grandeza da condutividade, assim como na precisão da calibração que se deseja realizar.

No procedimento, logo depois de cada iteração, a soma dos RMSEH é comparada, onde a melhor calibração é definida como sendo o menor valor dessa soma. Considerando que os valores da soma são sempre maiores que zero positivos e o método do MIGH apresenta uma boa convergência pode-se admitir que o processo é válido.

Tavares (2010) automatizou o processo de calibração juntamente com o MODFLOW, no programa UFC-MIGH, implementando em linguagem computacional Delphi. O procedimento elaborado computacionalmente contempla a calibração por meio do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico. No entanto, com o objetivo de compatibilizar o programa com novas plataformas, atualizou-se processo através da linguagem Java, que é uma linguagem computacional amplamente utilizada, com grande portabilidade e licença grátis.

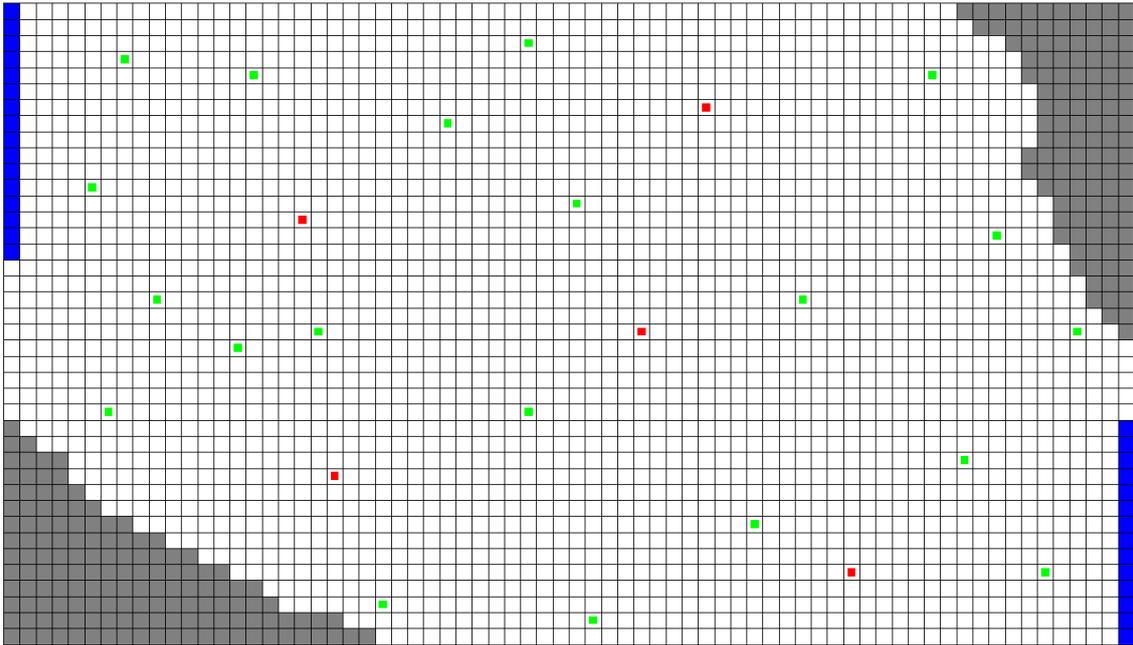
Após a implementação do programa em Java, houve a integração ao gvSIG, que é um programa de geoprocessamento de código livre, sendo um dispositivo de modelagem visual para o MODFLOW. Com esta agregação dos programas foi possível criar o programa computacional denominado UFC-FLOW, de tal forma que o processo de modelagem em sua totalidade está integrado em um só programa. O manual de utilização do UFC-FLOW, na versão implementada no gvSIG, está disposto no Anexo I.

### **3.2 Estudo de Caso - Modelo Teórico**

O modelo teórico proposto por Mendonça (2014) consiste na esquematização de uma configuração para realização do processo de calibração de condutividade hidráulica horizontal de um aquífero hipotético. O modelo em estudo foi discretizado em 2800 células quadradas, cada uma com de dimensões de  $\Delta x = \Delta y = 150,00$  m.

Parte da região nordeste e sudoeste da malha é impermeável, caracterizadas por células inativas, identificadas por pela cor cinza. As bordas laterais na cor azul representam as células de cargas hidráulicas constantes, as células da borda na parte esquerda possuem valor de 0 m e as da direita 1100 m. As células de cor branca são as células ativas do modelo e possuem um valor de carga inicial igual a 500m (Figura 09).

Figura 09: Esquemática do modelo hipotético.



Fonte: Autor

O valor adotado para condutividade hidráulica horizontal foi de  $4,6 \cdot 10^{-4}$  m/s e uma porosidade de 30%. O modelo proposto possui um total de 25 poços de observação (Células verdes) da carga hidráulica distribuídos pela área de estudo (Tabela 01). A área apresenta cinco poços de bombeamento (Células vermelhas) com os valores de vazão e coordenadas apresentados na Tabela 02.

Tabela 01 – Cargas hidráulicas observadas e localização dos Poços de Observação.

| Poço | x(m) | y(m) | h(m)   |
|------|------|------|--------|
| pt01 | 825  | 1725 | 104,87 |
| pt02 | 975  | 3825 | 238,67 |
| pt03 | 1125 | 525  | 119,94 |
| pt04 | 1425 | 2775 | 214,86 |
| pt05 | 2175 | 3225 | 289,74 |
| pt06 | 2925 | 3075 | 339,21 |
| pt07 | 2325 | 675  | 242,02 |
| pt08 | 2775 | 2025 | 302,23 |
| pt09 | 3075 | 4425 | 383,15 |
| pt10 | 3525 | 5625 | 433,41 |
| pt11 | 4125 | 1125 | 394,46 |
| pt12 | 4875 | 375  | 446,00 |
| pt13 | 4875 | 3825 | 491,14 |
| pt14 | 5325 | 1875 | 487,71 |
| pt15 | 5475 | 5775 | 555,03 |
| pt16 | 5925 | 3075 | 553,35 |
| pt17 | 6525 | 975  | 559,88 |
| pt18 | 6975 | 4875 | 668,56 |
| pt19 | 7425 | 2775 | 655,06 |
| pt20 | 7875 | 5325 | 762,43 |
| pt21 | 8625 | 675  | 655,68 |
| pt22 | 8925 | 4275 | 854,25 |
| pt23 | 9225 | 2175 | 743,78 |
| pt24 | 9675 | 5325 | 986,40 |
| pt25 | 9975 | 3075 | 877,73 |

Fonte: Autor

Tabela 02 – Vazões e localização dos Poços de Abastecimento.

| Poço | y(m) | h(m) | Vazão(m <sup>3</sup> /s) |
|------|------|------|--------------------------|
| pt01 | 2025 | 2775 | 0,13896                  |
| pt02 | 4425 | 3075 | 0,20844                  |
| pt03 | 3075 | 5925 | 0,27792                  |
| pt04 | 975  | 6525 | 0,13896                  |
| pt05 | 5325 | 7875 | 0,13896                  |

Fonte: Autor

### 3.3 Estudo de caso - Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe

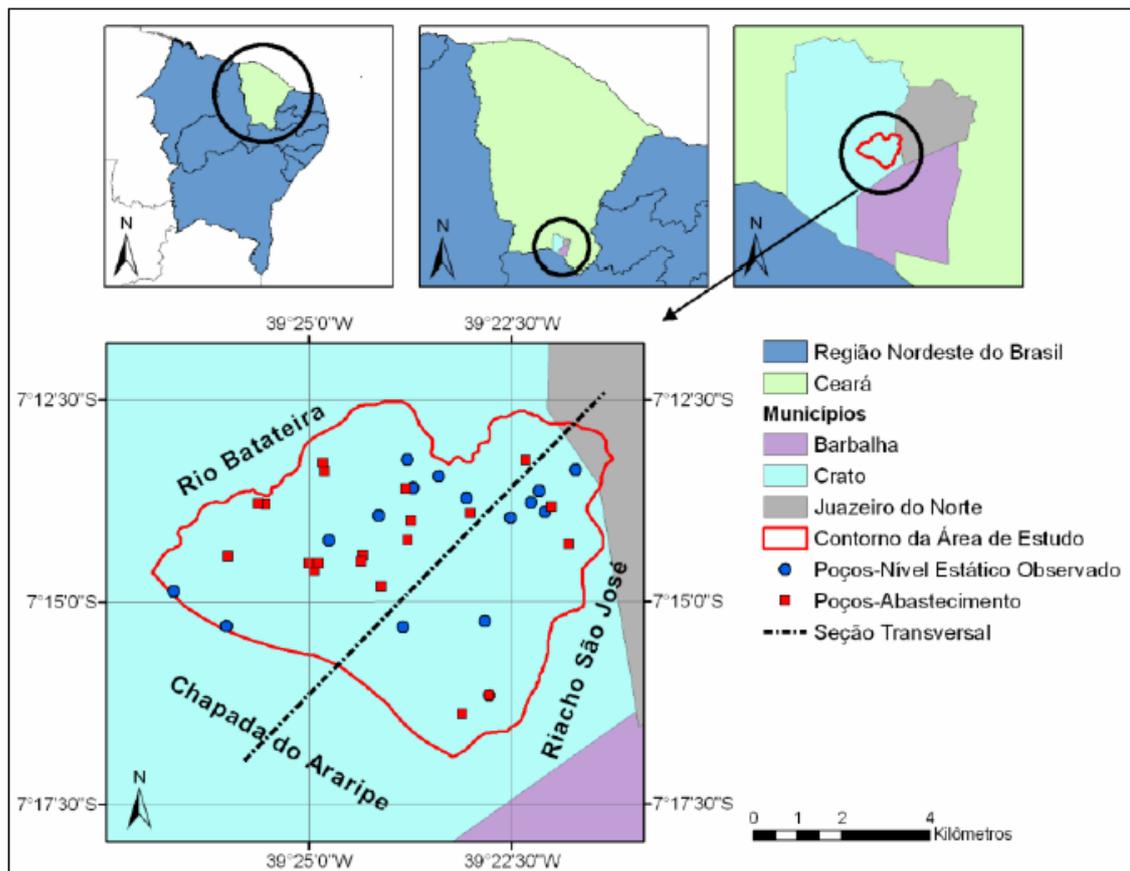
O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico foi aplicado a partir do uso das ferramentas do UFC-FLOW, em que se analisou o caso real do Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe para a simulação do fluxo subterrâneo. As

características, como localização geográfica, parâmetros hidrodinâmicos e topografia, do caso em estudo estão dispostas a seguir.

Tavares (2010) realizou a escolha de maneira criteriosa do local de estudo, tomando-se como critério: a relevância da captação dos recursos do aquífero na região e a capacidade de aquisição de dados. A área selecionada por Tavares (2010) se encontra estabelecida em sua totalidade na Bacia Sedimentar do Araripe, como indica a Figura 10. O local foi restrito de maneira a proporcionar um maior controle dos parâmetros para a modelagem, assim como facilitar o recolhimento das informações, possibilitando calibrar condutividade hidráulica do fluxo subterrâneo aquífero.

A região selecionada, referida como Área-Crato por Tavares (2010), possui extensão em torno de 49,7 km<sup>2</sup> e se encontra Bacia Sedimentar do Araripe, no estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil (Figura 10).

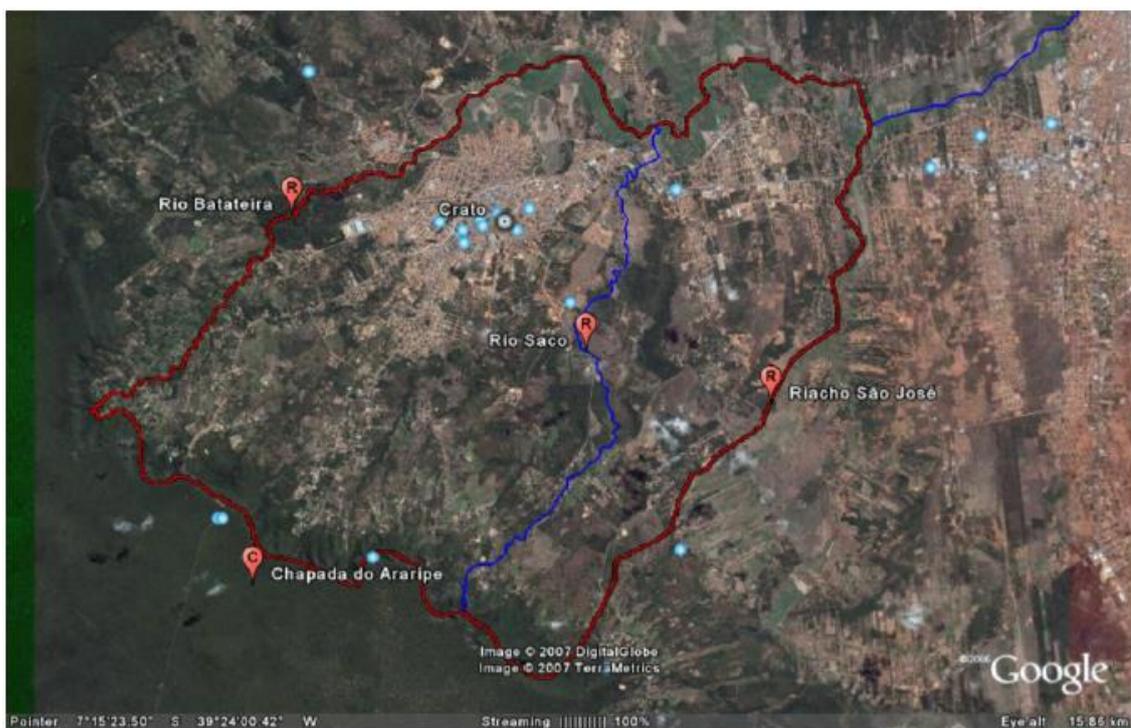
Figura 10 – Localização da Área-Crato, incluindo poços de bombeamento e posição da seção transversal da geologia.



Fonte: Tavares (2010)

A Área-Crato é circunscrita pelo rio Batateira, o riacho São José e a Chapada do Araripe, sua localização se dá quase que em sua totalidade no Município do Crato, possuindo apenas pequena porção de área no Município de Juazeiro do Norte. A região em análise detém aproximadamente 80% dos habitantes da cidade de Crato, que possui cerca de 130.604 habitantes (IBGE, 2017). A área urbanizada do município do Crato encontra-se completamente dentro da Área-Crato, como de pode observar pela Figura 11.

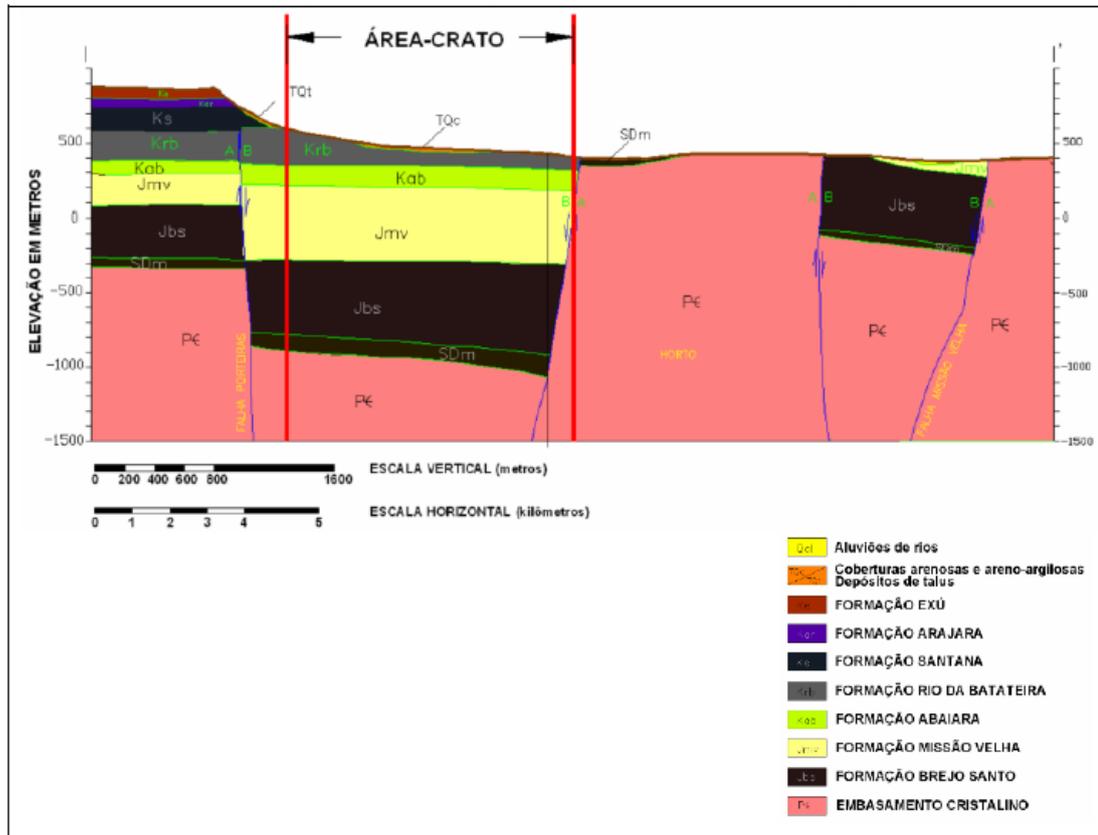
Figura 11 – Imagem aérea da Área-Crato.



Fonte: Tavares (2010)

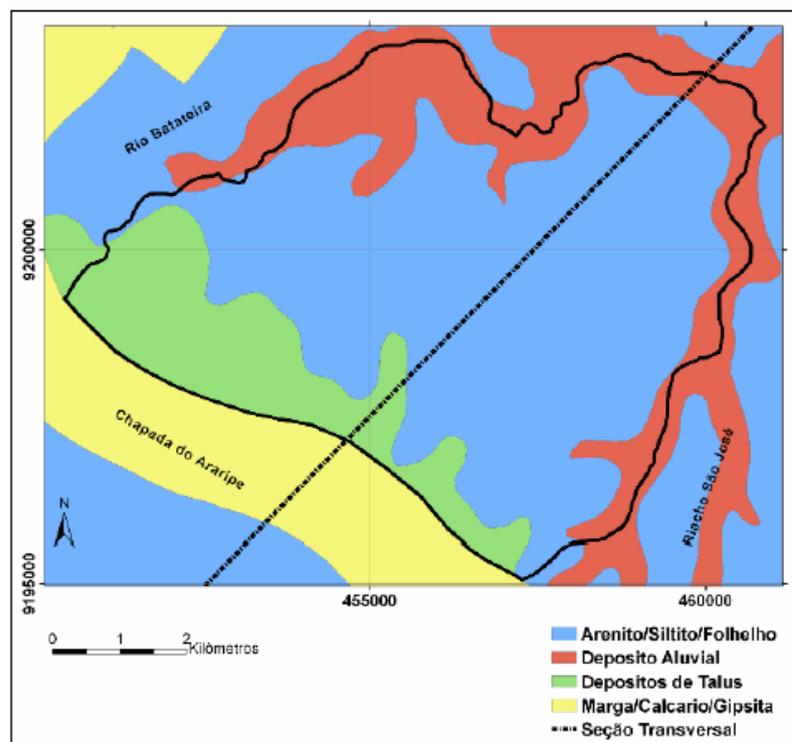
As informações relativas às características geológicas da camada referente à área de estudo estão dispostas na Figura 12 que representa um corte transversal da Área-Crato, em que se é possível observar a caracterização litológica, usada para realizar o zoneamento da área a fim de estabelecer o processo de calibração da condutividade hidráulica horizontal (Figura 13), assim como as espessuras das formações geológicas, dados esses utilizados na modelagem.

Figura 12 – Seção transversal da estratigrafia.



(Fonte: TAVARES, 2010)

Figura 13 – Caracterização litológica da Área-Crato.



(Fonte: Tavares, 2010)

Tavares (2010) em seu estudo realizou a modelagem da área de acordo com os dados adquiridos em instituições responsáveis pela gestão de recursos hídricos na região e/ou colhidos em campo. Para elaboração do modelo foram selecionados 20 poços de abastecimento (Tabela 03) e utilizaram-se poços para a verificação do nível estático referentes ao período de dezembro de 2008.

Tabela 03: Locais dos Poços de Abastecimento e as vazões da Área-Crato.

| Nome do Poço         | UTM<br>LESTE | UTM<br>NORTE | Altitude<br>(m) | Profundidade<br>(m) | Vazão<br>(m <sup>3</sup> /h) |
|----------------------|--------------|--------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| São Raimundo I       | 453030       | 9200813      | 433,00          | 125,70              | 155,00                       |
| São Raimundo II      | 452855       | 9200818      | 441,00          | 130,00              | 133,00                       |
| Grendene             | 452155       | 9199627      | 509,00          | 150,00              | 30,00                        |
| Vila Alta I          | 454351       | 9201565      | 438,00          | 120,00              | 70,00                        |
| Vila Alta II         | 454320       | 9201748      | 419,00          | 107,70              | 90,00                        |
| Cafundó              | 455229       | 9199655      | 437,00          | 109,00              | 30,00                        |
| Muriti               | 457656       | 9200604      | 430,00          | 110,00              | 160,00                       |
| Recanto              | 454119       | 9199297      | 448,00          | 120,80              | 80,00                        |
| Cajueiro             | 454224       | 9199465      | 446,00          | 110,00              | 10,00                        |
| Floresta             | 453999       | 9199459      | 452,00          | 129,70              | 20,00                        |
| Samuel Araripe       | 455183       | 9199517      | 436,00          | 108,00              | 104,00                       |
| Mangueira            | 456314       | 9200450      | 432,00          | 92,30               | 120,00                       |
| Poço Salvação        | 458920       | 9201828      | 434,00          | 45,00               | 18,00                        |
| Vila Lobo            | 455656       | 9198939      | 473,00          | 120,00              | 5,00                         |
| Conj. Mirandão       | 456247       | 9200002      | 436,00          | 102,00              | 22,00                        |
| CVT                  | 456189       | 9201166      | 427,00          | 80,00               | 15,00                        |
| Baixio das Palmeiras | 457474       | 9196027      | 521,00          | 111,00              | 4,30                         |
| Baixio do Muquém     | 458086       | 9196464      | 478,00          | 90,00               | 6,26                         |
| Vila Padre Cicero    | 459495       | 9200757      | 485,00          | 74,00               | 14,38                        |
| São Jose             | 459897       | 9199911      | 429,00          | 84,00               | 12,35                        |

(Fonte: Tavares, 2010)

Nesse trabalho, para a elaboração do modelo foram utilizados os mesmos poços de bombeamento distribuídos pela Área-Crato e determinados por Tavares (2010), considerando que não houve aumento significativo no volume de água extraída nesses poços. Os poços de observação, utilizados para a verificação do nível estático, são contabilizados em 16 unidades, sendo também espacializados pela região de estudo, os dados foram adquiridos pelas instituições que realizam o gerenciamento dos recursos hídricos, especificamente no período de outubro de 2016 (Tabela 04). A aferição do nível estático dos poços foi realizada no período de outubro de 2016, o que possibilita uma análise mais atualizada do aquífero e um estudo do seu comportamento em comparação com o trabalho realizado por Tavares (2010).

Tabela 04: Locais dos Poços de Observação e as Cargas hidráulicas observadas em Out/2016.

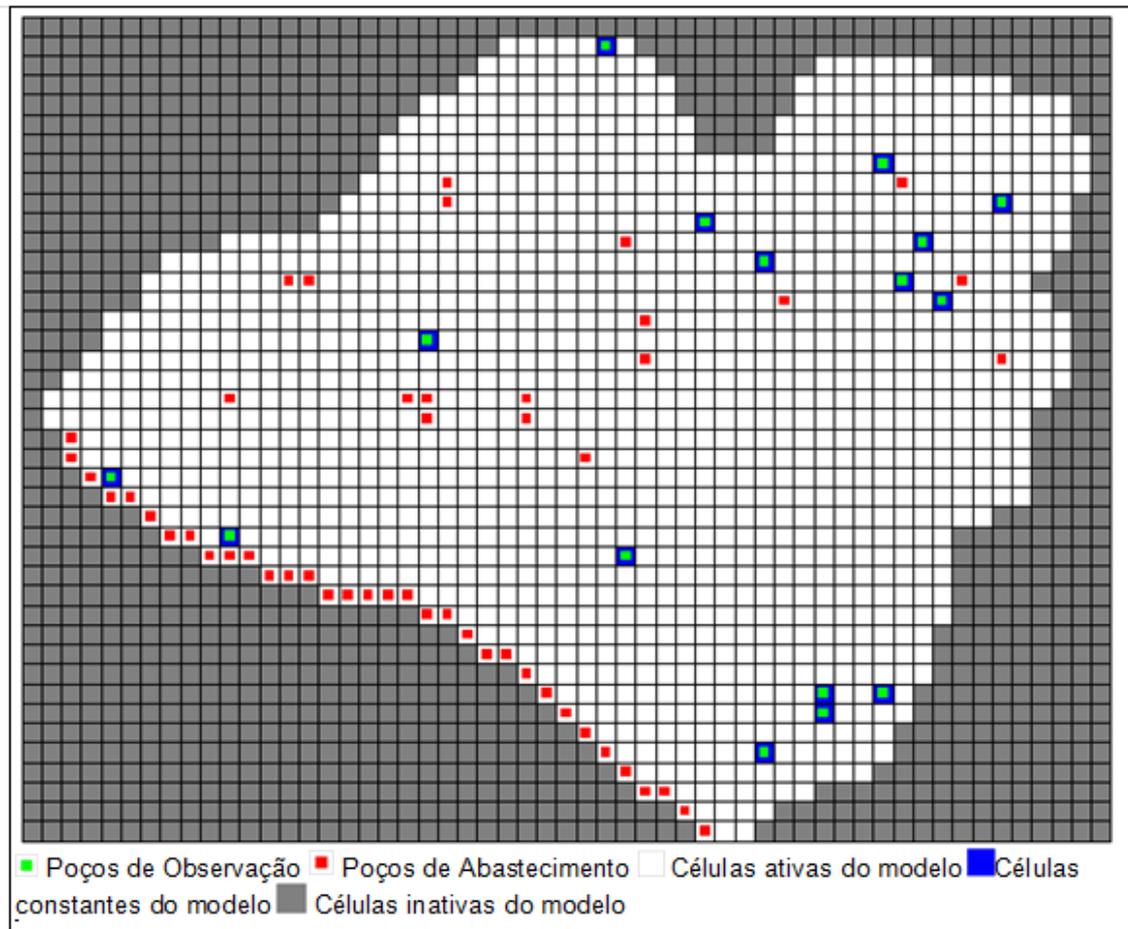
| Poço | UTM Leste | UTM Norte | Altitude (m) | Medição do NE (m) | Cota do NE (m) |
|------|-----------|-----------|--------------|-------------------|----------------|
| pt01 | 458093    | 9196423   | 464,71       | 60,84             | 403,87         |
| pt02 | 454080    | 9200139   | 432,76       | 25,50             | 407,26         |
| pt03 | 457576    | 9200950   | 412,63       | 16,10             | 396,53         |
| pt04 | 459034    | 9200863   | 440,97       | 46,00             | 394,97         |
| pt05 | 452140    | 9198034   | 536,51       | 64,00             | 472,51         |
| pt06 | 459349    | 9200638   | 433,54       | 42,50             | 391,04         |
| pt07 | 458741    | 9201895   | 418,62       | 13,75             | 404,87         |
| pt08 | 456125    | 9198021   | 460,83       | 3,74              | 457,09         |
| pt09 | 459220    | 9201120   | 432,96       | 41,11             | 391,85         |
| pt10 | 456942    | 9201453   | 407,56       | 9,76              | 397,8          |
| pt11 | 457485    | 9196028   | 506,27       | 53,26             | 453,01         |
| pt12 | 450927    | 9198832   | 572,09       | 8,00              | 564,09         |
| Pt13 | 460038    | 9201607   | 392,44       | 8,01              | 384,43         |
| pt14 | 458693    | 9196639   | 439,71       | 55,30             | 384,41         |
| pt15 | 455876    | 9203372   | 405,87       | 4,62              | 401,25         |
| pt16 | 458113    | 9196383   | 461,84       | 57,79             | 404,05         |

(Fonte: Autor)

O modelo proposto por Tavares (2010) que representa a Área-Crato foi esquematizado discretizando a região analisada em 2310 células com dimensões de  $\Delta x = \Delta y = 200,00$  m, em que 55 na direção Leste-Oeste e 42 na direção Norte-Sul (Figura 14). A área é contornada pelo rio Batateira e riacho São José, já na porção sudoeste se encontra a Chapada do Araripe, nessa região localizam-se fontes naturais de água, as quais possuem vazão total  $0,285$  m<sup>3</sup>/s, o valor dessa vazão foi distribuído por 34 células, que correspondem a Chapada do Araripe. Neste trabalho, a mesma área será estudada aplicando-se as modificações feitas no programa de simulação e calibração de parâmetro e os dados atualizados do aquífero.

De acordo com os dados de poços de observação atualizados na análise desse trabalho, o modelo esquematizado da Área-Crato no programa UFC-Flow fica da seguinte maneira (Figura 12):

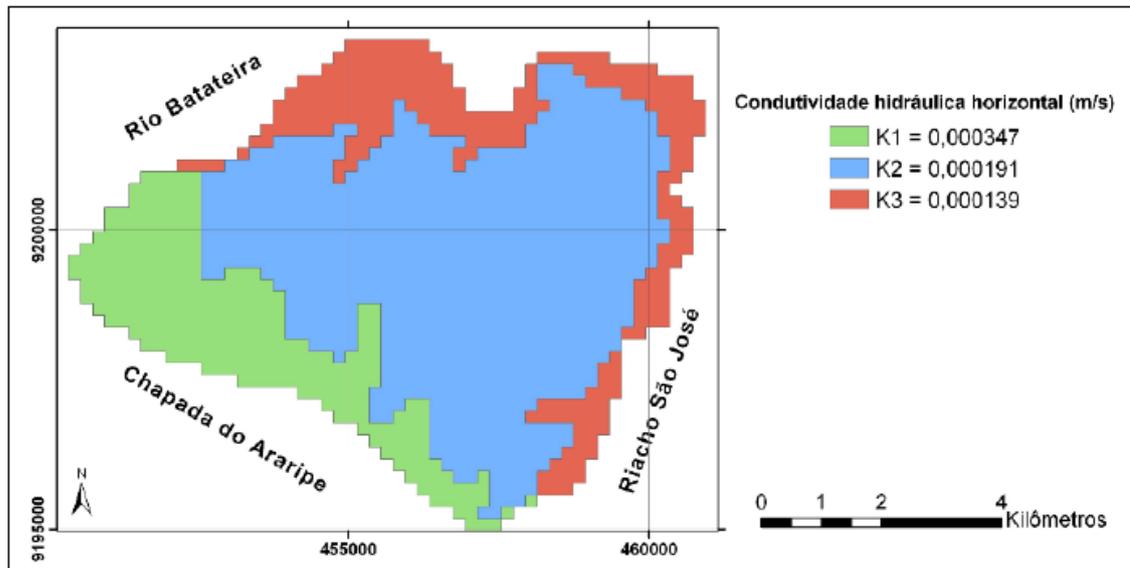
Figura 14 – Representação do modelo esquematizado da Área-Crato no UFC-FLOW.



Fonte: Autor

A última etapa do processo de configuração do modelo é a de calibração, em que foi adotado o zoneamento da condutividade hidráulica horizontal em uma única camada, baseando nas características litológicas da área, dispostas na Figura 12, o que resultou em três zonas de valores:  $K_1 = 0,000347$  m/s;  $K_2 = 0,000191$  m/s e  $K_3 = 0,000139$  m/s. Esses valores de condutividade foram escolhidos dentre outras configurações propostas por Tavares (2010) por apresentar uma melhor distribuição desse parâmetro pela região, aproximando-se, portanto da realidade (Figura 15).

Figura 15 – Distribuição das condutividades hidráulica em zonas.



Fonte: Tavares (2010)

A modelagem considerou valores referentes à porosidade efetiva e recarga do aquífero. A porosidade efetiva adotada foi de 35% (TAVARES, 2010), baseando nas características geológicas da camada. De acordo com Aguiar (2008) a recarga possui um valor de  $4,76 \cdot 10^{-9}$  m/s.

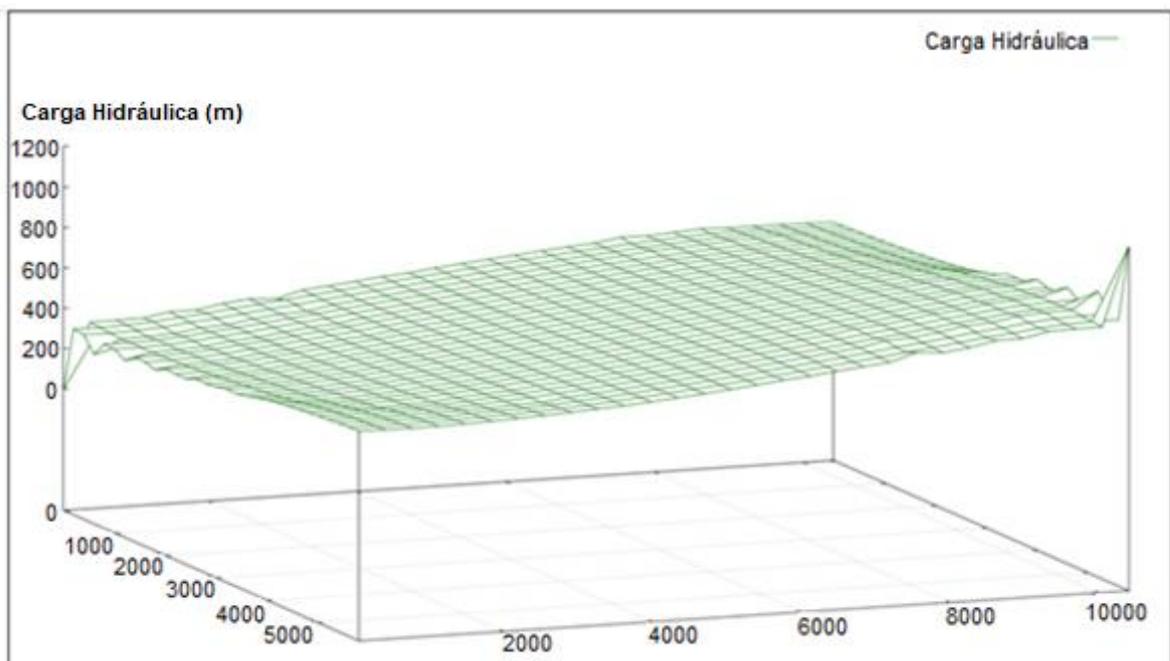
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Modelo Teórico

A partir da implementação do modelo teórico na versão atual do UFC-Flow foi possível analisar tanto a eficiência do MIGH, quanto do programa UFC-MIGH para uma situação com condições de contorno diversas, incluindo uma quantidade de poços de observação e de extração bem espacializados pela área.

A simulação do modelo hipotético permitiu calcular os valores das cargas hidráulicas e o nível estático do aquífero teórico. Por meio da Figura 16 observa-se o comportamento das cargas e o rebaixamento do nível da região sudeste da malha até sua região no noroeste.

Figura 16: Representação do mapa das cargas hidráulicas do modelo teórico.

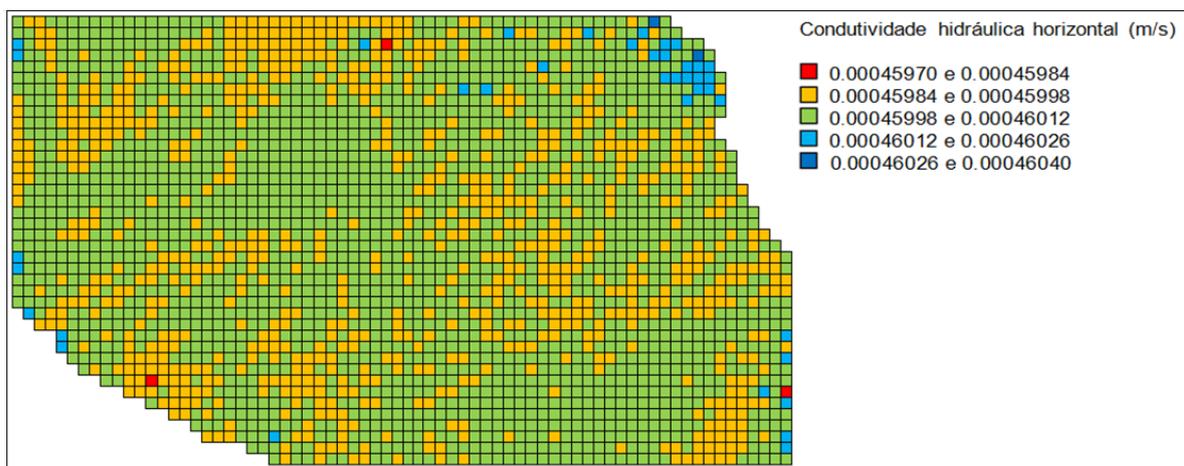


Fonte: Autor

A calibração da condutividade hidráulica horizontal do modelo permitiu encontrar uma solução ótima através da minimização do RMSH, com erro de  $7,92 \cdot 10^{-5}$  e um valor médio de condutividade de  $4,6 \cdot 10^{-4}$  m/s. Os valores da condutividade hidráulica horizontal calculados pelo programa estão distribuídos conforme a Figura 17, que representa a espacialização desse parâmetro na área de estudo. Para avaliar o Método de Busca realizou-se outro teste de calibração no modelo hipotético, utilizando-se um valor inicial de  $6,0 \cdot 10^{-4}$  m/s, que no final do

processo apresentou estimativa de  $5,0 \cdot 10^{-4}$  m/s, e um erro de  $8,37 \cdot 10^{-5}$ , o que demonstra uma solução próxima do valor de condutividade hidráulica real. Vale ressaltar que estimativas iniciais para a busca podem acarretar aumento no tempo de execução, caso estejam muito distantes do valor real, de modo que esse problema somente pode ser mitigado através do conhecimento sobre as características da condutividade do aquífero.

Figura 17: Distribuição espacial da condutividade hidráulica horizontal do modelo teórico.



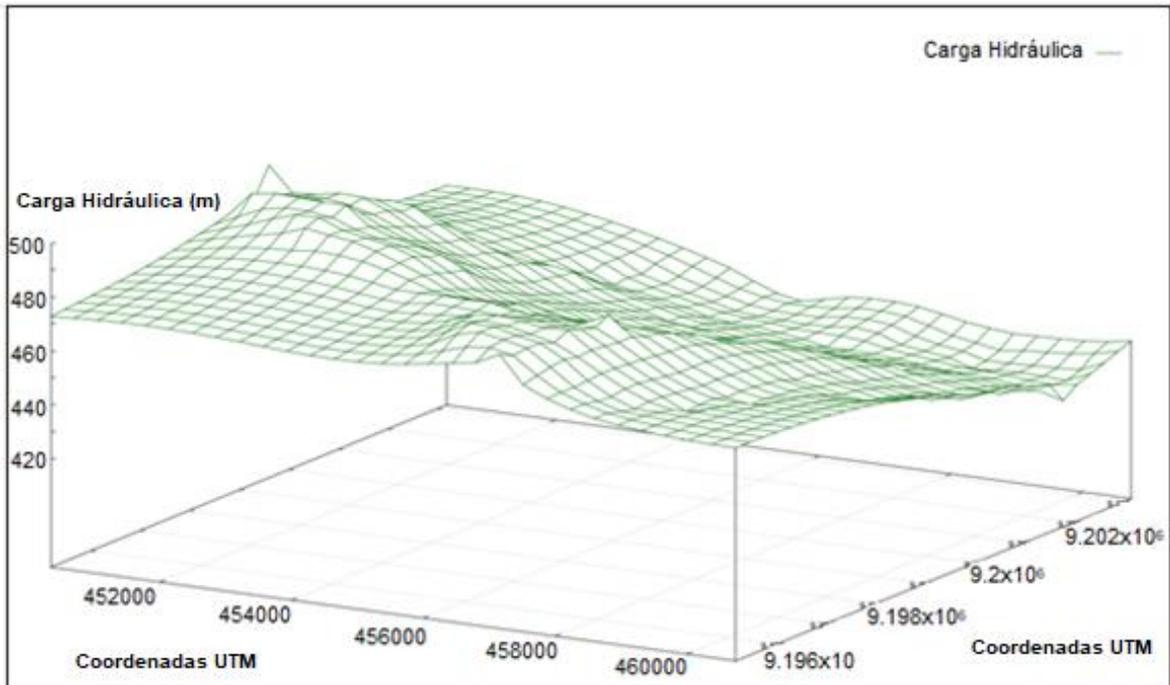
Fonte: Autor

## 4.2 Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe

A formação geológica da Bacia Sedimentar considerada no processo de modelagem foi a formação Rio da Batateira, dado que não há afloramentos na área de outras formações geológicas, considerou-se também para a escolha dessa única formação o fato da profundidade dos poços de observação e bombeamento serem menores que a espessura da camada.

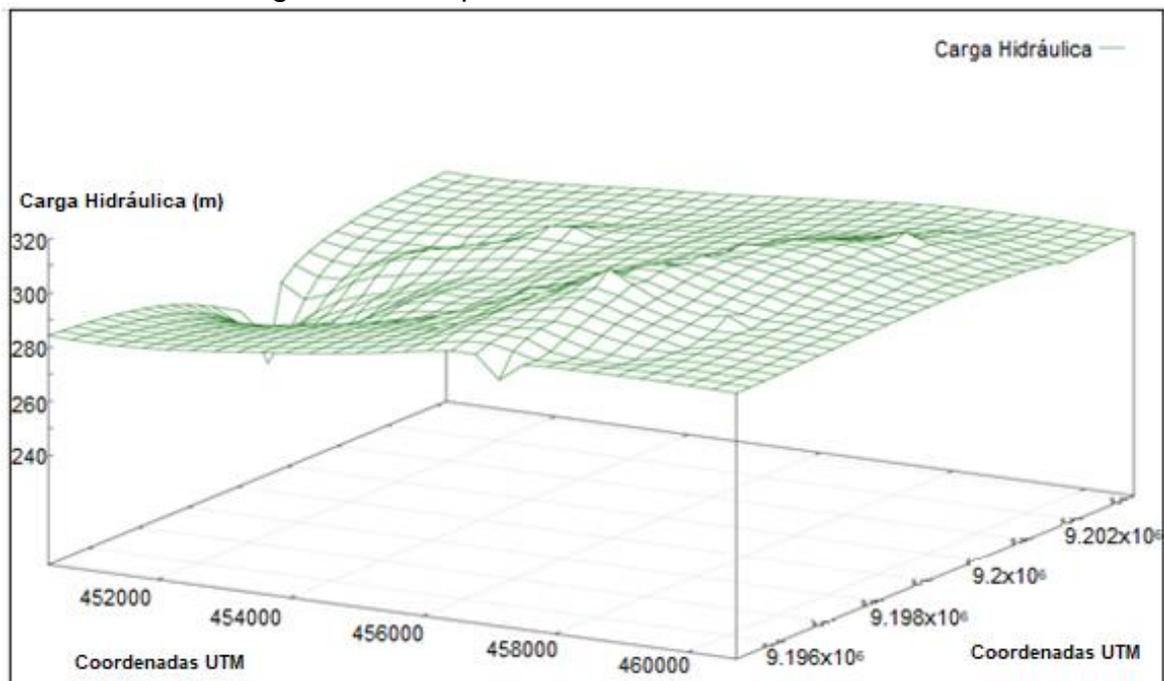
De acordo com as cotas de elevação de topo e de base do Rio Batateira deu-se início à modelagem. A partir dos dados de curvas de nível espaçadas de 5 metros, foi obtido o mapa em 3D da elevação de topo da área de estudo (Figura 18). As cotas de base, obtidas com base na profundidade da camada, também foram dispostas em um mapa, conforme apresenta a Figura 19.

Figura 18 – Mapa de cotas do topo da camada.



Fonte: Autor

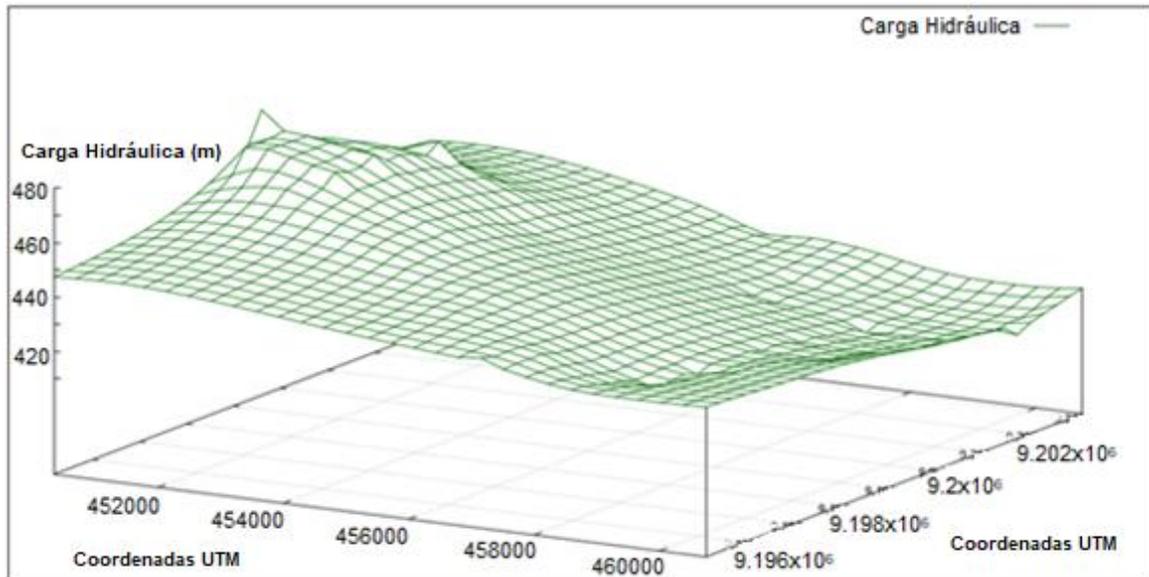
Figura 19 – Mapa de cotas da base da camada.



Fonte: Autor

Através da utilização do programa computacional UFC-FLOW realizou-se a simulação das cargas hidráulicas do aquífero, como é possível observar no gráfico da Figura 20. Por meio do gráfico em 3D é possível observar a elevação no nível estático do aquífero causada pelas fontes presentes na Chapada do Araripe, assim como os cones de rebaixamento provocados pelos poços de extração.

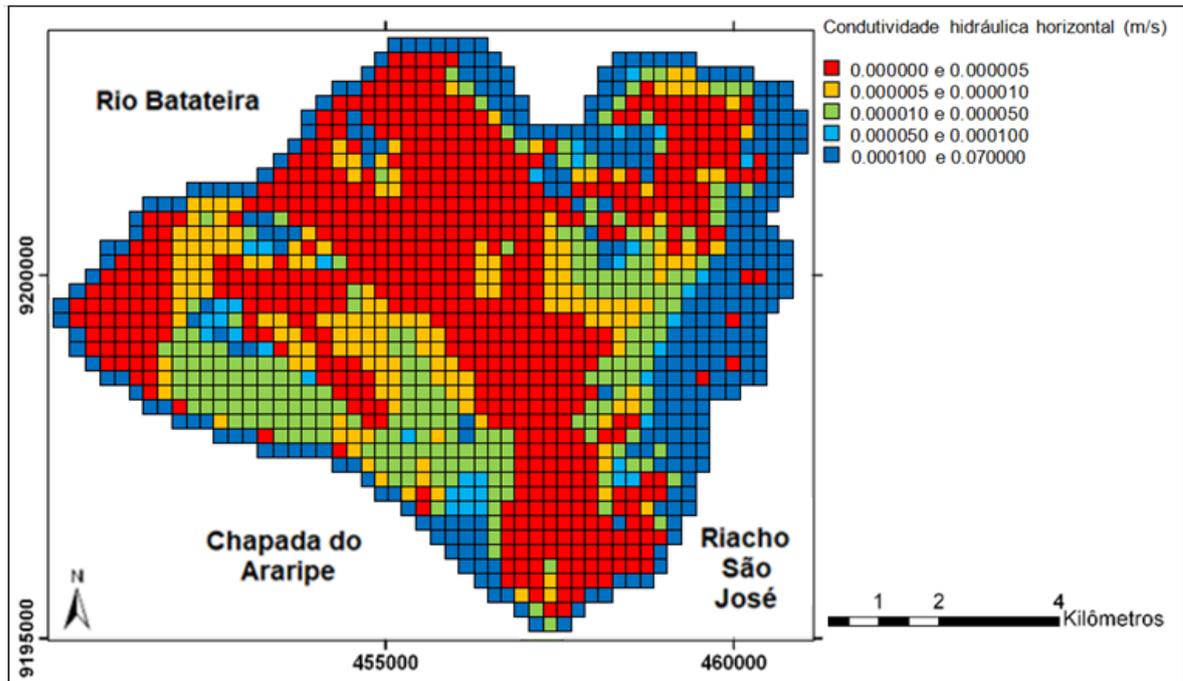
Figura 20: Representação do mapa das cargas hidráulicas.



(Fonte: Autor)

A calibração da Área-Crato se deu através da indicação inicial de zonas com diferentes valores de condutividades hidráulicas horizontais, baseando-se nas informações geológicas da área. Essa metodologia promove um processo de calibração do MIGH mais estável, apresentando uma Média dos Ângulos de  $8,9 \cdot 10^{-9}$  e RMSEH em torno de 1%. Os valores referentes à condutividade hidráulica horizontal estimados pelo programa estão apresentados na Figura 21. A representação demonstra como fica a distribuição espacial desse parâmetro na Área-Crato, o que permite a análise da condutividade hidráulica juntamente com as considerações dos aspectos geológicos da região.

Figura 21: Distribuição espacial da condutividade hidráulica horizontal.



(Fonte: Autor)

De acordo com os resultados da calibração presentes na Figura 21, processo esse realizado através do MIGH e da utilização da metodologia do zoneamento da Área-Crato, percebe-se que os valores de condutividade hidráulica horizontal correspondem às características das formações geológicas da região em estudo, assim, as condutividades hidráulicas nas áreas de talude e nas proximidades dos rios apresentam valores mais altos do que o entorno, já que possui sedimentos não muito bem estabelecidos. Dessa forma constata-se que ocorre ajustamento da espacialização da condutividade hidráulica horizontal com as características geológicas apresentadas na Área-Crato.

A metodologia testada a partir da implementação do método de busca não apresentou resultados satisfatórios quando utilizados valores de estimativa distantes do valor real de condutividade hidráulica. Isso ocorre principalmente em modelos que possuem condutividades não homogêneas, como é o exemplo do caso real em estudo. O que demonstra uma limitação do método que deve ser melhor analisada para solução de problemas de maior complexidade.

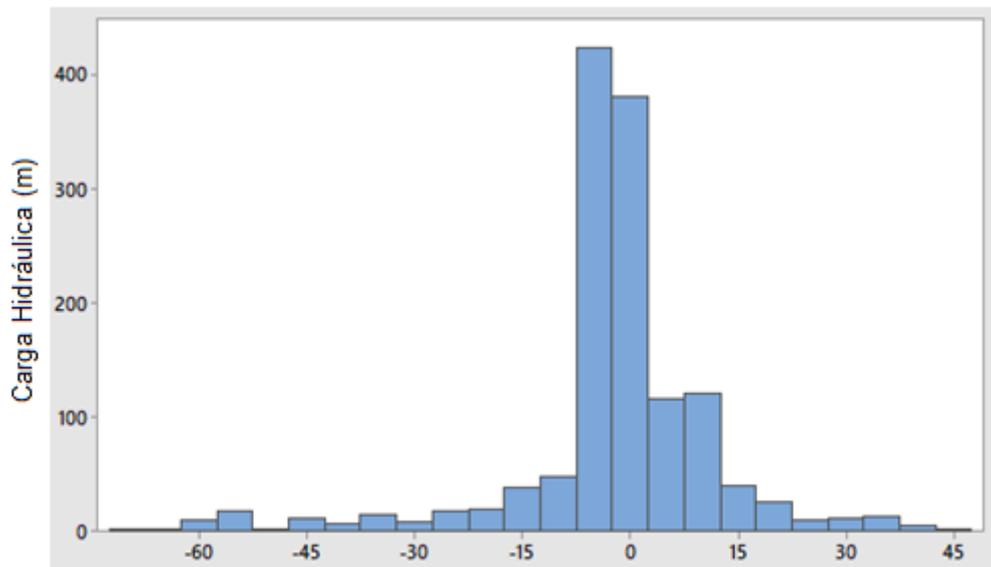
#### **4.2.1 Alterações no Sistema do Aquífero Causadas pelo Período de Seca**

A área da Bacia Sedimentar do Araripe, assim como a maior parte do Nordeste brasileiro, apresenta desde 2010 um grave período de seca, que tem causado sérios impactos na disponibilidade de água para diversos usos. A sucessão desses períodos secos faz com que a componente subterrânea possa constituir-se como uma verdadeira alternativa às águas superficiais de complementação das necessidades hídricas, principalmente na região, onde o aquífero é a principal fonte de abastecimento de água para suprir os diversos usos.

Diante desse contexto, realizou-se a análise do comportamento do nível estático da reserva de água subterrânea da Área-Crato, por meio da comparação dos modelos com informações do período de outubro de 2008 (anterior à seca) e com o período de outubro de 2016 (ápice da seca). De acordo com a distribuição da frequência das cargas hidráulicas do ano de 2008 observa-se que há um valor médio de 431,7 m, com desvio padrão de 33,39. Para o ano de 2016 a média dentre os valores das cargas hidráulicas calculadas é de 429,6 m, com desvio padrão de 32,01. De posse desses dados, é possível verificar que houve uma redução de 2,1 m do valor médio de carga hidráulica do aquífero.

A diferença entre os níveis estáticos de 2016 e 2008 está disposta na distribuição de frequência da Figura 22. A análise da distribuição revela que há predominância de valores negativos, apresentando 59,82% de valores inferiores a zero, o que aponta um rebaixamento do aquífero, evidenciando que os valores de nível estático referentes ao período de 2008 são mais elevados se comparados com os de 2016.

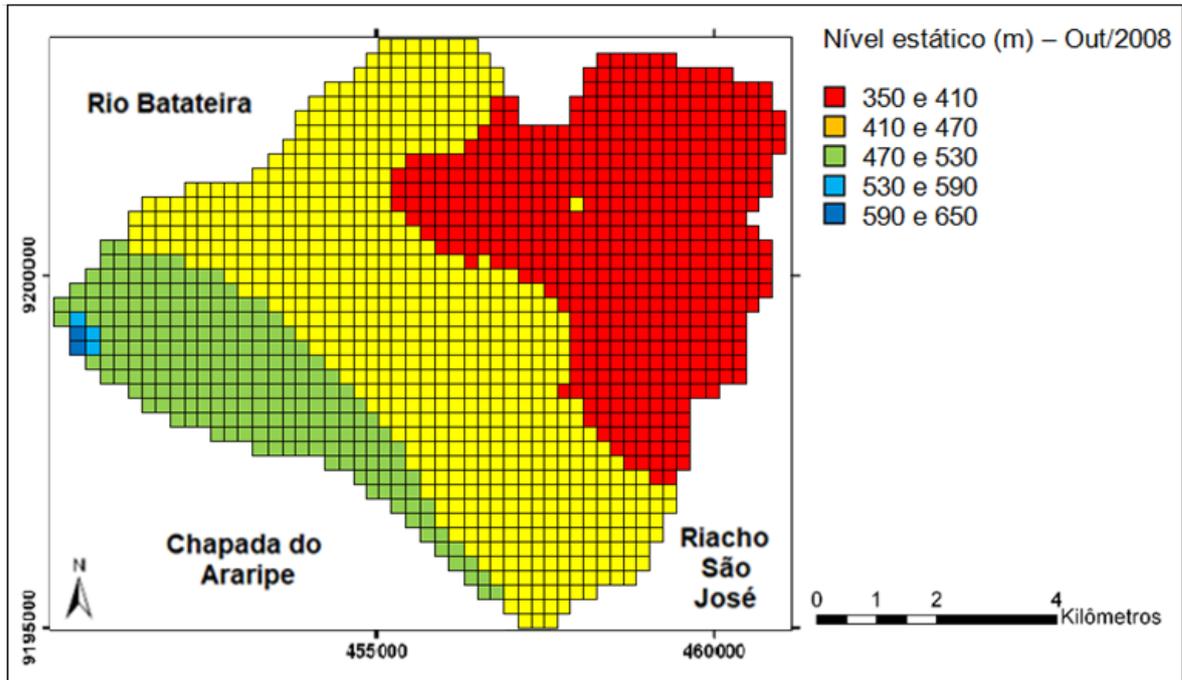
Figura 22 – Distribuição da frequência da diferença entre as cargas hidráulicas da Área-Crato entre 2016 e 2008.



Fonte: Autor

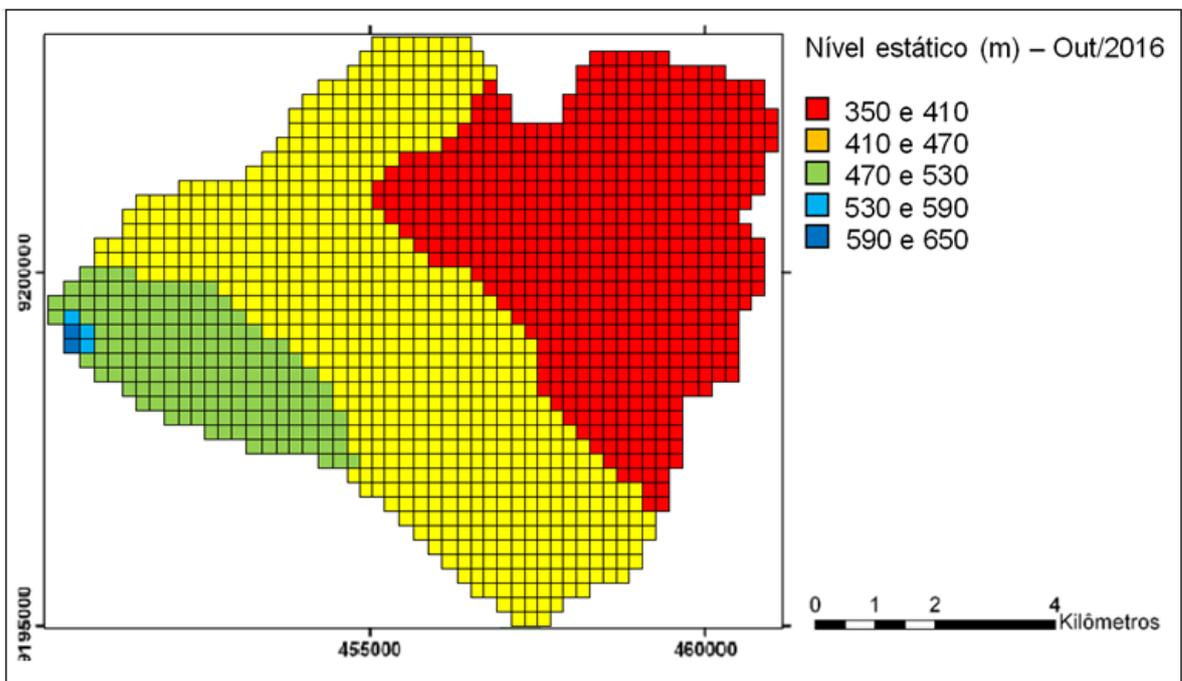
Os valores das cargas hidráulicas referentes aos períodos de outubro de 2008 e outubro de 2016 foram dispostos em mapas para melhor visualização da variação desse parâmetro para os anos analisados, como apresentam as Figuras 23 e 24. Observa-se que a Figura 24 apresenta uma área maior no que se refere aos valores de menor carga hidráulica, representado no mapa pelo avanço das cores vermelha e amarela que correspondem a valores mais baixos do nível estático.

Figura 23 - Mapa da distribuição do nível estático da Área-Crato – out/2008.



Fonte: Autor.

Figura 24 - Mapa da distribuição do nível estático da Área-Crato – out/2016.

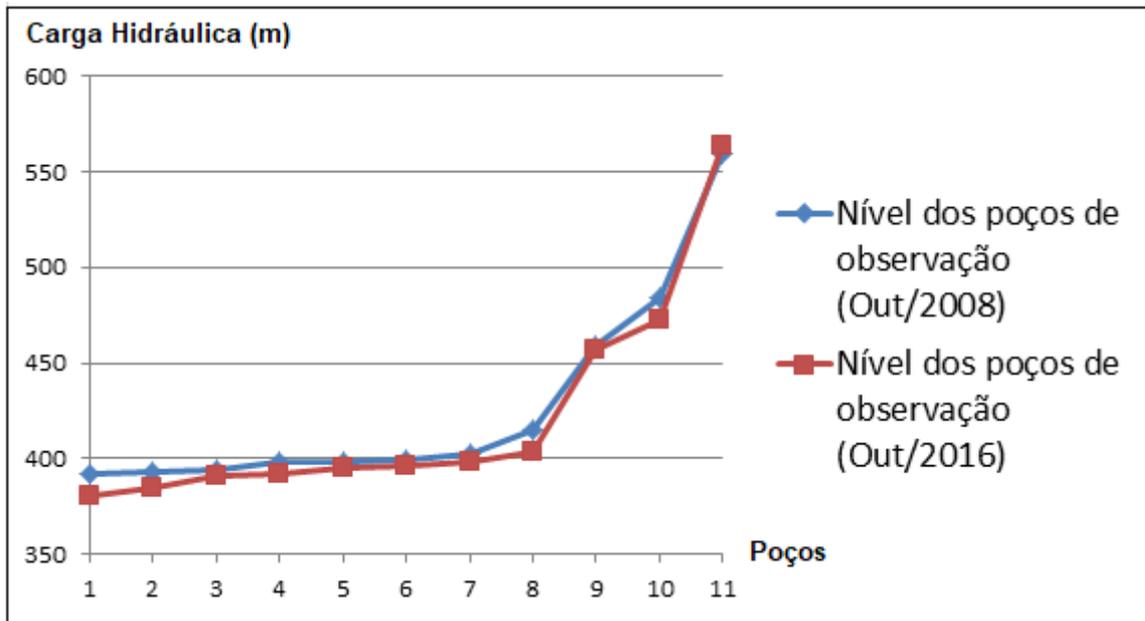


Fonte: Autor

Por fim, realizou-se a análise de 11 poços de observação coincidentes e compararam-se seus níveis estáticos. Os poços de observação do ano de 2016 apresentam seus valores menores que o do ano de 2008, como demonstra o a

Figura 25, corroborando o resultado que houve o rebaixamento do nível estático das águas subterrâneas. Vale ressaltar que a diferença do nível, a partir da análise dos poços, chegou a apresentar um valor de 17,95 m.

Figura 25 – Gráfico da comparação dos valores dos níveis estáticos dos poços de observação nos anos de 2008 e 2016.



Fonte: Autor

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Essa pesquisa teve como escopo analisar o comportamento do parâmetro da condutividade hidráulica horizontal através do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico, para isso implementou-se a referida metodologia em um modelo teórico e um modelo real. A condutividade foi estudada a partir dos programas computacionais UFC-Flow e UFC-MIGH que mostraram bastante eficácia no processo de calibração da condutividade gerando erros mínimos ao final do procedimento.

A automatização do trabalho proporcionada pelos softwares possibilita a unicidade de todas as ferramentas de modelagem em um só programa o que simplifica o trabalho da pesquisa, pois permite uma grande praticidade, processando dados de forma direta no SIG.

Importantes implementações foram feitas no programa que melhoraram a manipulação no procedimento de inserção de tabelas de atributos necessárias para se montar o modelo, o que torna mais fácil também a importação e exportação dos dados gerados pelo processo de calibração. O método de busca implementado em associação ao MIGH com o intuito de viabilizar a calibração da condutividade hidráulica horizontal de maneira autônoma em relação aos dados iniciais introduzidos no modelo, também foi uma importante mudança no programa. Essa nova implementação mostrou-se parcialmente adequada tendo em vista que ainda foram verificadas inconsistências dos resultados a depender da matriz inicial de cargas e condutividades utilizadas.

Neste sentido, são necessários ainda mais estudos que complementem a metodologia de busca e que consigam contemplar a complexidade de parâmetros dos modelos, pois apesar de ter se mostrado eficaz para o modelo hipotético proposto, não apresentou resultados adequados para o caso real, ao se variar os valores de entrada da condutividade.

A Área-Crato, estudada nesse trabalho, representa uma importante porção do aquífero e por isso pode ser utilizada como uma zona padrão para recolhimento de dados que possam abranger a bacia. Os resultados obtidos nesse trabalho referentes a essa fração da Bacia Sedimentar do Araripe se mostram como meios relevantes para a gestão dos recursos desse aquífero, dada a relevância do mesmo para o abastecimento da cidade do Crato.

A análise da alteração das cargas hidráulicas sofrida na região devida ao período de seca entre 2010 e 2016 revelou que houve rebaixamento médio de mais de dois metros no nível estático do aquífero, evidenciando que ocorreu deficiência na recarga do lençol freático durante a estiagem. A constatação da influência das fases de menor incidência de precipitações que os índices normais da região mostra que os órgãos gestores responsáveis devem elaborar medidas de gerenciamento para mitigar os efeitos da seca para o aquífero, a fim de se preservar ao máximo esse recurso subterrâneo de fundamental importância para a região.

Para finalizar, pode-se sugerir que os próximos estudos e implementações computacionais que tratem sobre a calibração do parâmetro hidrodinâmico da condutividade hidráulica investiguem também parâmetros como a transmissividade e a condutividade hidráulica vertical, assim como a modelagem de aquíferos multicamadas. Recomenda-se ainda a elaboração de modelos que possibilitem a representação dos elementos de rios e lagos, zonas de recarga e estudo do fenômeno de transiente do rebaixamento gerado pelos poços de extração. Indica-se também o estabelecimento de teste em poços de extração para estipulação da condutividade hidráulica *in loco*. Deve-se, igualmente, elaborar um apanhado da quantidade de poços privados e suas respectivas vazões de bombeamento e em relação aos poços de observação deve-se realizar acompanhamento regular dos seus níveis de carga hidráulica.

## REFERÊNCIAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE L. A.; O'CONNELL, P. E. AND RASMUSSEN, J. An Introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, **Journal of Hydrology**, v. 87, p. 66-77, 1986.

ABBOTT, M. B. **Contributions of computational hydraulics to the foundations of a computational hydrology**, in D. S. Bowles and P. E. O'Connell (eds.), Recent Advances in the Modelling of Hydrological Systems. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 1991.

ALENCAR, M. da F. **Interpolação por Splines para a Modelação de Inomogeneidades no Método de Elementos Analíticos - Implementação por Programação Orientada a Objetos**. 2008. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos). Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied Goundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1992.

BALL, J. E. **Are we replicating past errors?**, Proc. 1st Int. Conf. on Hydroinformatics, Delft (The Netherlands), p. 15-30, 1994.

BANERJEE, P. K. **The Boundary Element Methods in Engineering**. Londres: McGraw-Hill, 1994.

BEAR, J. **Hydraulics of groundwater**. New York: McGraw-Hill, 1979.

BRYSON, J. A. E.; HO, Y. C. **Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control**. Bristol, Pensilvania: Hemisphere Publishing Corporation, 1975.

CABRAL, J. **Movimento das Águas subterrâneas**. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (Coord.). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. cap. 3, p. 35–51.

CABRAL, J.; DEMETRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (Coord.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. cap. 15, p. 367–389.

CAICEDO, N. L. Água subterrânea. In: TUCCI, C. E. M. (Coord.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2002. p. 943.

CARRERA, J.; NEUMAN, S. P. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 2. uniqueness, stability, and solution algorithms. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 211–227, 1986.

CARRERA, J. **State of the art of the inverse problem applied to the flow and solute transport problem**. Groundwater Flow and Quality Modeling, NATO ASI Ser.: p. 549-585, 1987.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. **Histórico de secas no Semiárido do Nordeste e características da Seca de 2010-16**. Fortaleza-Ceará, 2016.

COSTA, C. T. F. da; CASTRO, M. A. H. de. Uma metodologia numérico-analítica aplicada a problemas transparentes de transporte de contaminante. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 183–197, Outubro-Dezembro 2007.

COSTA, C. T. F. da. **Modelagem numérico-analítica do fluxo hídrico e da contaminação de água subterrânea por derivados de petróleo**. 2005. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

COSTA, I. de O. **Calibração da Condutividade Hidráulica Horizontal Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico**. 2014. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon**. V. Dalmont, Paris, 1856. p. 647.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Programa nacional de estudos dos distritos mineiros**: projeto avaliação hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Recife, 1996. p. 101.

DJOKIC, D.; COATES, A.; BALL, J. E. **GIS - an integration tool for hydrologic modelling: A need for general hydrologic data exchange format**. Tech. Rep., Dept. Civil Eng., University of New South Wales, Australia 1996.

DOHERTY, J. **MODINV**. Townsville, Australia: Australian Center for Tropical Fresh-Water Resources, 1990.

DOHERTY, J.; BREBBER, L.; WHITE, P. **PEST**. Australia, 1994.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 3. ed. New York: Macmillan College Publishing Company, 1980. p.690.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New York: Prentice-Hall, 1979. p. 604.

FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). **Seminário de Avaliação da Seca de 2010-2016 no Semiárido Brasileiro**. Fortaleza-Ceará, 2016.

GOMES, C. C.; CASTRO, M. A. H. de. Método dos elementos analíticos aplicado no aquífero da região do Cariri. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 25–34, Janeiro-Março 2005.

- COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Plano de Monitoramento e Gestão dos Aquíferos da Bacia do Araripe, Estado do Ceará.** Relatório Final do Projeto. Fortaleza-Ceará, 2010.
- GREEN, J. **Neologism: new words since 1960.** Bloomsbury Pub. Ud., London, 1991.
- GUO, X.; ZHANG, C. M. Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions. **Ground Water**, v. 38, n. 6, p. 815–826, Novembro-Dezembro 2000.
- HILL, M. C. **A computer program (MODFLOWP) for estimation parameters of a transient, three-dimensional groundwater flow model using nonlinear regression.** USGS Open-File Report p. 91-484, 1992.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Contagem da população 2007.** Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2017.
- KRESIC, N. **Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling.** Florida: CRC Press, p. 460, 1997.
- LI, W. H. **Differential equations of hydraulic transient, dispersion and groundwater flow.** New York: Prentice-Hall, 1972.
- LINDE, N.; RENARD, P.; MUKERJI, T. AND CAERS, J. Geological realism in hydrogeological and geophysical inverse modeling: a review. **Advances in Water Resources**, 86, 86-101. 10.1016/j.advwatres.2015.09.019, 2015.
- MARSALEK, J. Hydroinformatics Tools for Planning, Design, Operation and Rehabilitation of Sewer Systems. **NATO Advanced Study Institute**, v. 44, p. 47-53, 1996.
- MCLAUGHLIN, D.; TOWNLEY, L. R. A reassessment of the groundwater inverse problem. **Water Resources Research**, v. 32, n. 5, p. 1131–1161, Maio 1996.
- MENDONÇA, G. F. de. **Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Modificado pelo Método de Busca para Calibração da Condutividade Horizontal em Aquíferos de uma Camada.** 2014. 16 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2014.
- MENDONÇA, L. A. R. **Recursos Hídricos da Chapada do Araripe.** 2001. 22 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.
- MENDONÇA, L. A. R. **Comportamento dos Aquíferos do Cariri.** Juazeiro do Norte, Ceará. Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. 2006. p. 33.
- MENESCAL, G. C. **Modelagem Numérico-Analítica de Aquífero Utilizando o Método de Colocação RBF Livre de Malha.** 2008. 128 f. Tese (Doutorado em

Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MONT'ALVERNE, A. A. F. (Coord). **Projeto Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Programa Nacional de Estudos dos Distritos Mineiros.** Departamento Nacional de Produção Mineral (MONT'ALVERNE), Distritos Regionais Pernambuco e Ceará. Recife, 1996.101 p. il.

MORAIS NETO, J. M.; HEGARTY, K. A.; KARNER, G. D. Abordagem preliminar sobre paleotemperatura e evolução do relevo da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil, a partir da análise de traços de fissão em apatita. In: B. **Geociências.** Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 113-119, 2006.

POETER, E. P.; HILL, M. C. **DOCUMENTATION OF UCODE, A Computer Code for Universal Inverse Modeling.** Colorado, USA, 1998.

QUEIROZ, E. de V. **Modelagem Computacional de Águas Subterrâneas: Problema Inverso Utilizando O Método Iterativo de Gradiente Hidráulico e Sistema de Informações Geográficas.** 2016. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos.** São Carlos: EESC/USP, 1998.

SCHUSTER, H. D. M.; ARAUJO, H. D. B. Uma formulação alternativa do método iterativo de gradiente hidráulico no procedimento de calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 2, p. 31–37, Abril/Junho 2004.

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis.** 2. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 1984.

SIMMONS, C. T. Henry Darcy (1803-1858): Immortalized by his scientific legacy. **Hydrogeology Journal**, v. 16, p. 1023–1038, Julho 2008.

SOUZA, C. D. de. **Simulação Computacional do Fluxo Hídrico Subterrâneo na Região do Cariri e Calibração Utilizando Gradiente das Cargas Hidráulicas.** 2007. 19 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SUN, N. Z. **Inverse problem in groundwater modeling.** Norwell, Massachusetts: Kluwer Acad, 1994.

TAVARES, P. R. L. **Modelagem Computacional e Calibração da Condutividade Hidráulica Horizontal em Aquífero na Bacia Sedimentar do Araripe Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.** 2010. 34-51 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

- THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. **Transaction of the American Geophysical Union**, v. 16, p. 519–524, 1935.
- TODD, D. K.; MAYNS, L. W. **Groundwater Hydrology**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- VIANA, N. de O. **Vulnerabilidade e risco à poluição do Sistema Aquífero Médio – entre Crato e Missão Velha, Bacia do Araripe, Ceará**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- WALKER, P. M. B. (ed.) **Larousse Dictionary of Science and Engineering**. Larousse pic., Scotland, 1995.
- YEH, W. W. G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 95–108, 1986.
- ZHOU, H; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. J.; LI, L. Inverse methods in hydrogeology: Evolution and recent trends. **Advances in Water Resources**, v. 63, p. 22-37, 2014.

## APÊNDICE A - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO UFC-FLOW

### SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. EXERCÍCIO – MALHA COM UMA CAMADA
3. CRIAR NOVO PROJETO
4. INSERIR CURVAS DE NÍVEL
5. UFCFLOW 
  - 5.1 Inserir Malha 
  - 5.2 Calcular Elevações pela Curva de Nível
  - 5.3 Configurar parâmetros 
    - 5.3.1 Condições de Contorno
    - 5.3.2 Carga Hidráulica Inicial
    - 5.3.3 Condutividade Hidráulica
  - 5.4 Inserir poços de bombeamento 
  - 5.5 Inserir poços de observação 
6. SIMULAÇÃO
7. CALIBRAÇÃO

## LISTA DE FIGURAS

- Figura A1 - Programa CAD2Shape 2.0.
- Figura A2 - Criando novo projeto.
- Figura A3 - Inserindo nova camada.
- Figura A4 - Janela Adicionar Camada.
- Figura A5 - Selecionando curvas de nível do terreno.
- Figura A6 - Curvas de Elevação de Topo inseridas na vista.
- Figura A7 - Botão UFC-FLOW habilitado.
- Figura A8 - Janela Seleção Malha.
- Figura A9 - Janela Criar Nova Malha.
- Figura A10 - Selecionando retângulo no qual se inserirá a malha.
- Figura A11 - Janela Criar malha por retângulo.
- Figura A12 - Malha criada.
- Figura A13 - Modificando a visualização das camadas do gvSIG.
- Figura A14 - Janela Gráficos.
- Figura A15 - Janela de seleção de atributo.
- Figura A16 - Tabela de valores da Elevação de Topo do Sistema.
- Figura A17 - Painel de configuração de parâmetros de malha ativado.
- Figura A18 - Selecionando células do corpo d'água por polígono.
- Figura A19 - Células do corpo d'água selecionadas.
- Figura A20 - Malha Camada do Exemplo Alto-Longá.
- Figura A21 - Janela para determinação da vazão do poço de bombeamento.
- Figura A22 - Malha Camada com poços de bombeamento e poços de observação.
- Figura A23 - Gráfico da carga hidráulica gerado no exemplo Alto-Longá.
- Figura A24 - Mapa visual da condutividade hidráulica do exemplo Alto-Longá.

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema UFC-FLOW consiste em um aplicativo computacional capaz de fazer simulações de fluxo de água subterrâneo e calibração da condutividade hidráulica do solo, parâmetro que mede a facilidade de percolação de água no meio, a partir de um conjunto de pontos de carga hidráulica conhecida. Ele se insere na interface gráfica do Sistema de Informações Geográficas, gvSIG, e utiliza o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH) para calcular as cargas hidráulicas em uma malha discreta de células.

## 2 EXERCÍCIO – MALHA COM UMA CAMADA

Nesse exemplo, utilizaremos o UFC-FLOW para simular o fluxo e calibrar a condutividade hidráulica horizontal de um aquífero do município de Alto Longá, localizado no estado do Piauí. Este será discretizado em uma camada de malha 50x30 e espessura de 100 metros.

Para aplicar o MIGH, precisamos de condições de contorno, ou seja, pontos de carga hidráulica conhecida, que, no nosso exemplo, são as margens de três lagoas localizadas ao norte, sul e oeste da região estudada.

Essas lagoas são definidas no MODFLOW como células constantes, ou seja, possuem carga hidráulica fixa. Também é possível definirmos células como ativas ou inativas, como você verá mais tarde nesse manual. No caso de células inativas, não existe fluxo entre essas células e as células ativas.

### Dados do exemplo

Modelo de fluxo:

- Aquífero retangular e isotrópico;
- Regime de escoamento livre;
- Condutividade Hidráulica Horizontal:  $1 \times 10^{-6}$  m/s;

Condições de contorno:

- Carga inicial para células ativas: 160 m;
- Cargas fixas para células em contato com os lagos:
  - Lagoa a norte: 157 m
  - Lagoa a sul: 162 m;

- Lagoa a oeste: 160 m.

Poços de observação - Localização:

- Linha 14, Coluna 7;
- Linha 17, Coluna 17;
- Linha 23, Coluna 15;
- Linha 31, Coluna 6;
- Linha 32, Coluna 21.

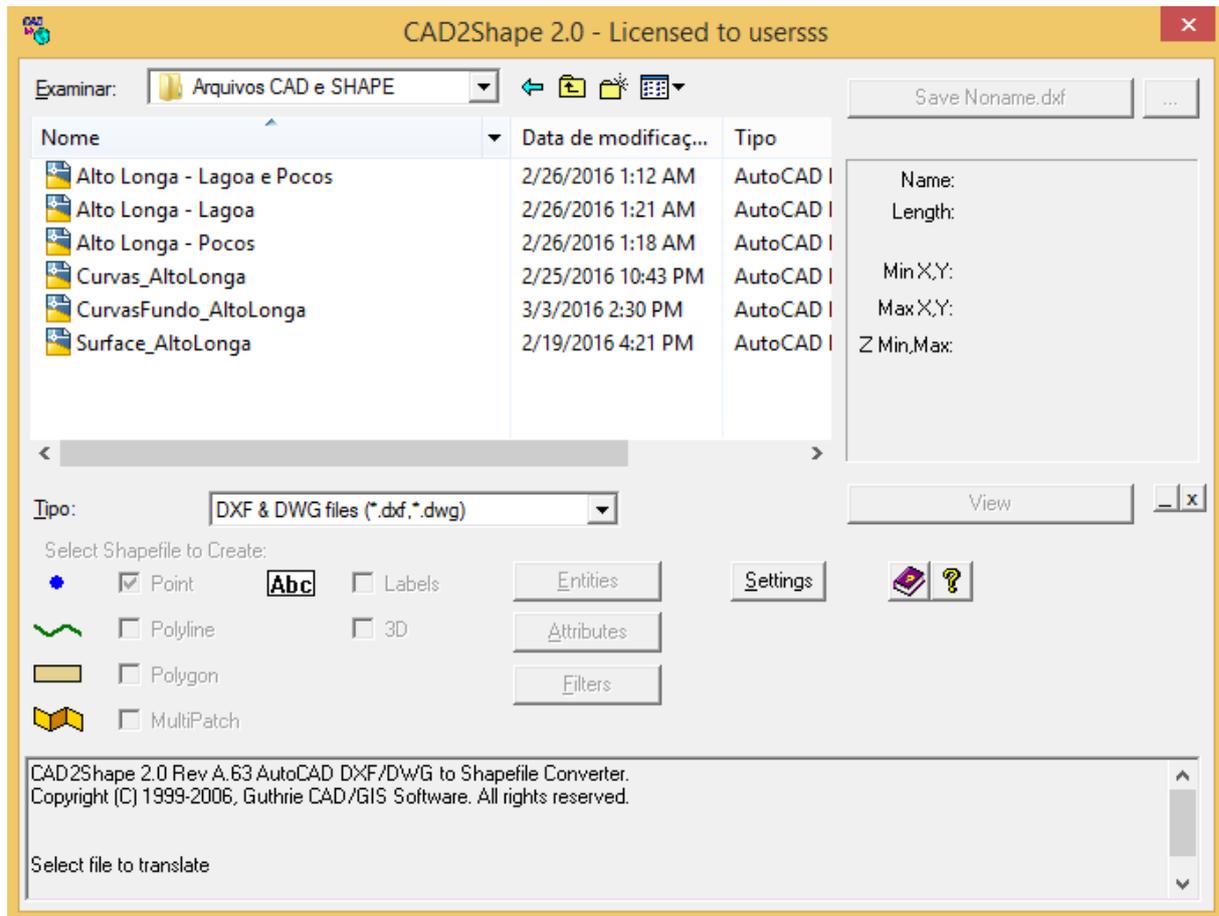
Poços de bombeamento:

- Localização: Linha 10, Coluna 16;  
Vazão: - 0.0019 m<sup>3</sup>/s.
- Localização: Linha 40, Coluna 9;  
Vazão: - 0.003 m<sup>3</sup>/s.
- Localização: Linha 28, Coluna 7;  
Vazão: - 0.0014 m<sup>3</sup>/s.

Os dados de poços de observação foram retirados do banco de dados da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – CPRM pelo site [siagasweb.cprm.gov.br.html](http://siagasweb.cprm.gov.br.html).

Para iniciar o projeto, primeiramente precisamos da curva de nível do município estudado. Como utilizaremos o gvSIG como interface gráfica, a curva de nível deve possuir arquivos do tipo Shapefile nas extensões .shp, .dbf e .shx. Precisaremos de duas curvas de nível, sendo uma de cota e outra do fundo da camada. Caso o usuário não possuía as curvas nesses formatos, é possível converter os arquivos de formato CAD para Shape. Nesse exemplo, utilizamos o programa CAD2Shape para fazer as conversões, como mostra a figura abaixo.

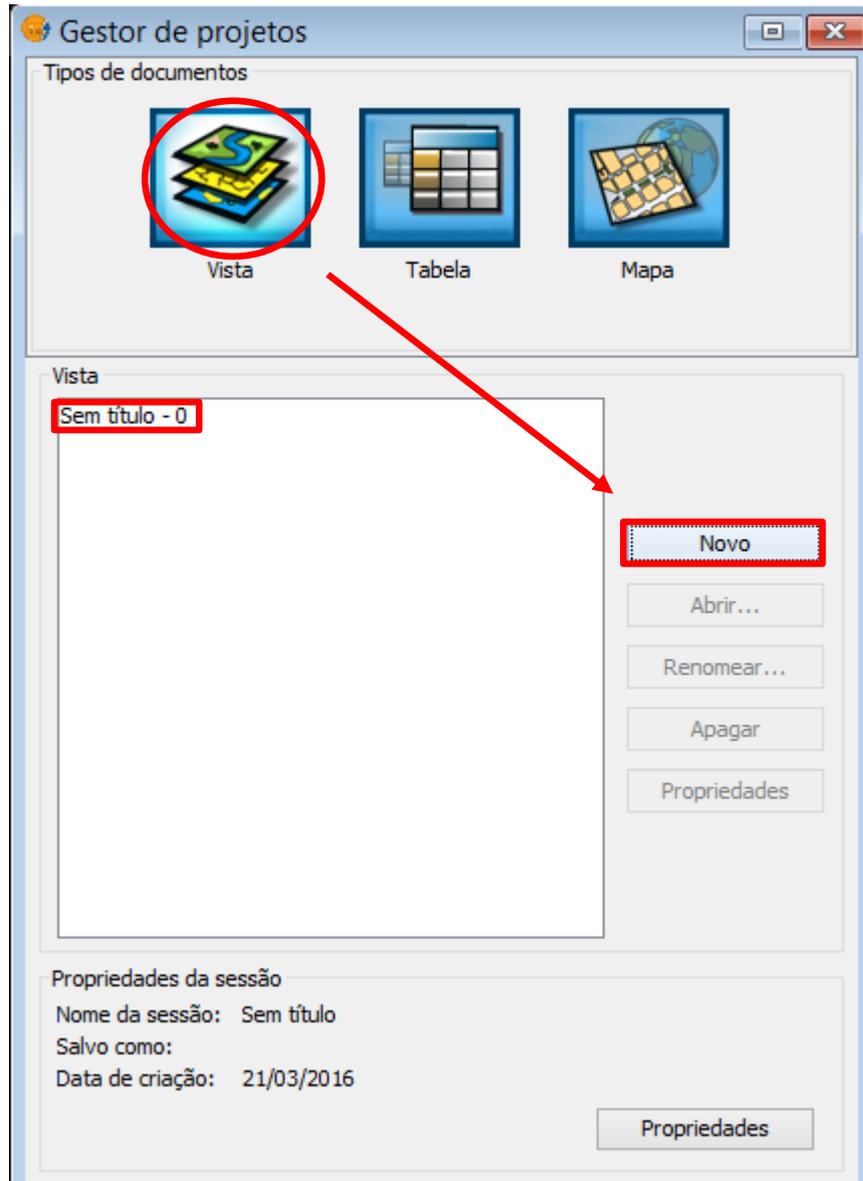
Figura A1 - Programa CAD2Shape 2.0.



### 3 CRIAR NOVO PROJETO

Para utilizar o UFCFLOW precisamos abrir um projeto gvSIG do tipo vista. Clique em vista → novo → duplo clique no projeto (sem título – 0).

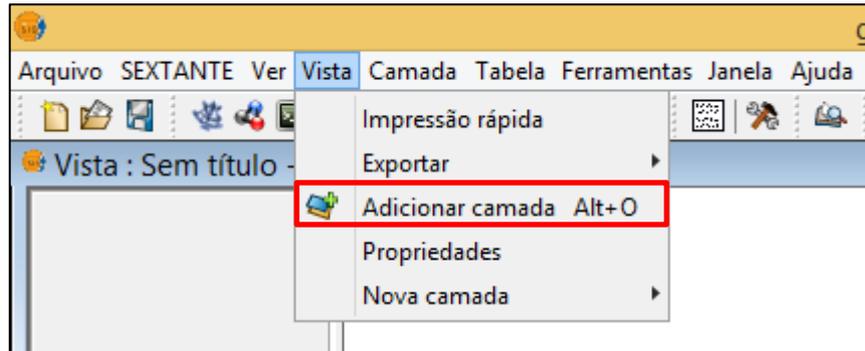
Figura A2 - Criando novo projeto.



#### 4. INSERIR CURVAS DE NÍVEL

Nessa etapa adiciona-se primeiramente o arquivo de curvas correspondente à elevação de topo da camada de solo analisada, ou seja, da superfície do terreno. Para isso, o usuário deve ir na aba Vista → Adicionar camada.

Figura A3 - Inserindo nova camada.



Na janela Adicionar Camada, deve-se clicar no botão Adicionar e selecionar o arquivo shape correspondente às curvas de nível do terreno.

Figura A4 - Janela Adicionar Camada.

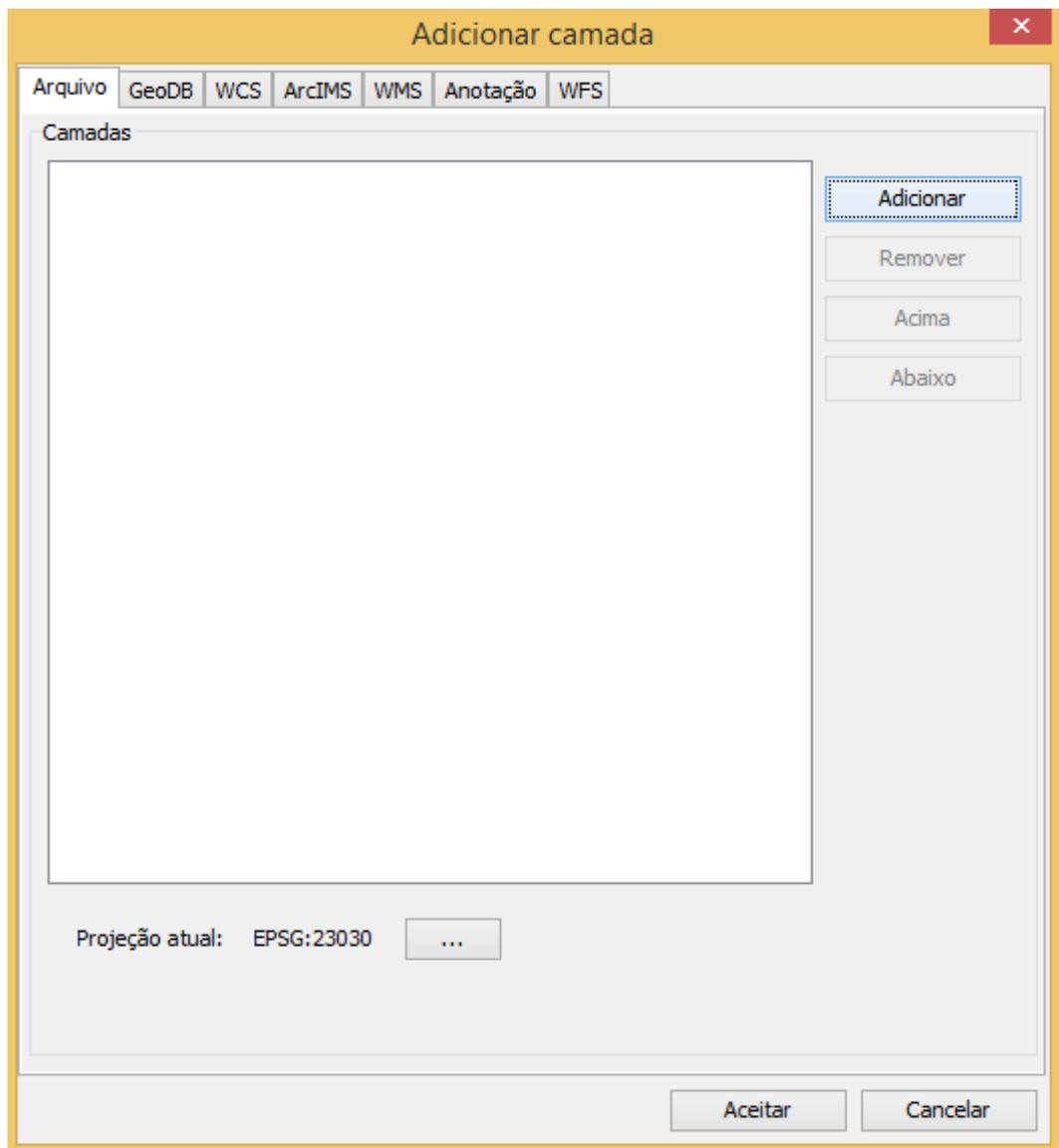
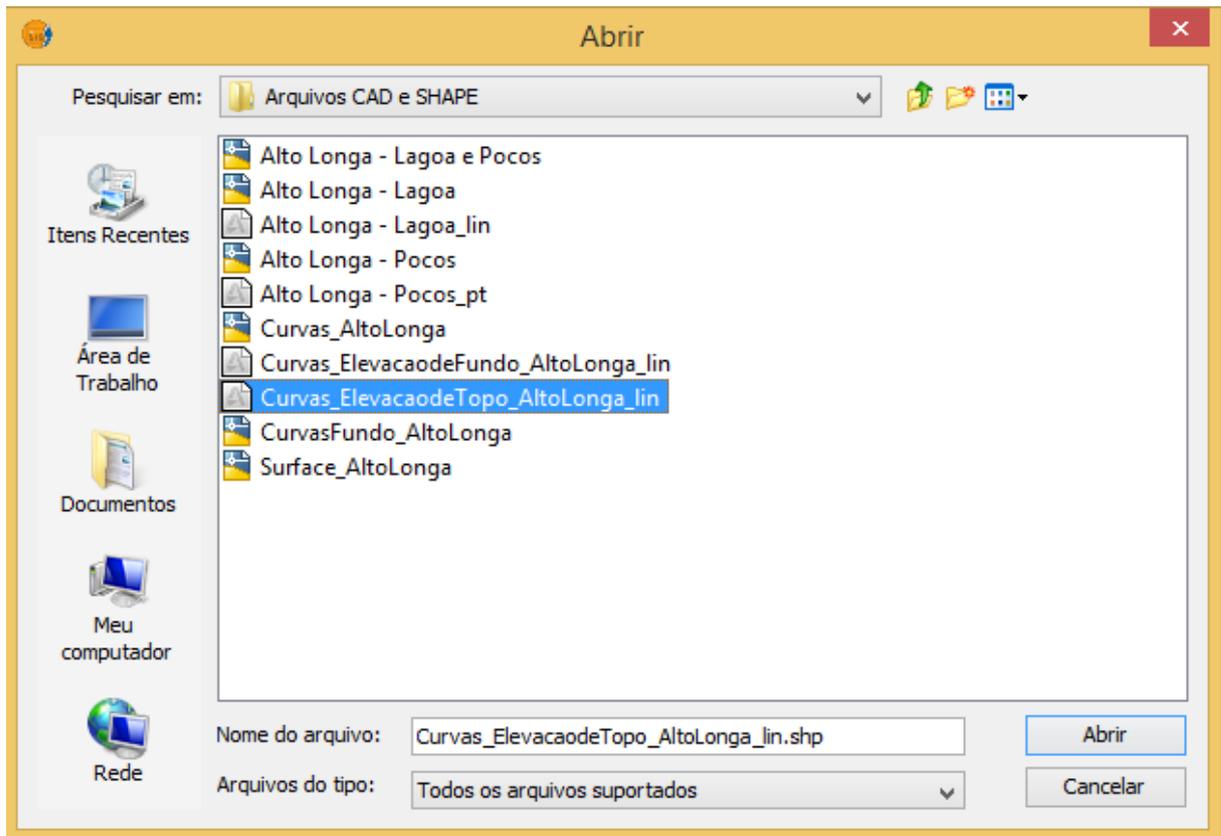
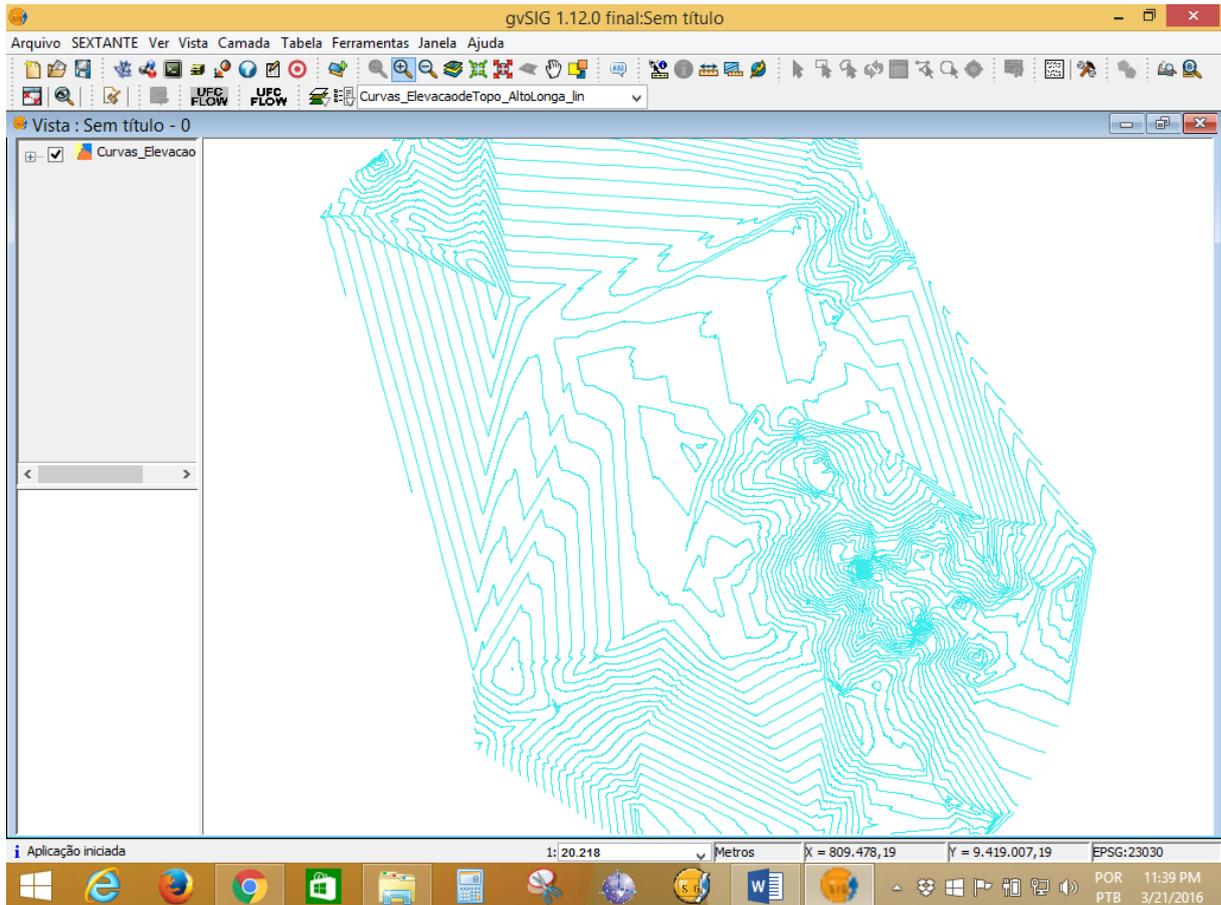


Figura A5 - Selecionando curvas de nível do terreno.



Agora a camada correspondente às curvas inseridas pode ser visualizada (caso ela não apareça, clique no botão Zoom Completo  na barra de ferramentas do gvSIG).

Figura A6 - Curvas de Elevação de Topo inseridas na vista.



## 5. UFCFLOW UFC FLOW

Após criado o arquivo, pode-se iniciar o programa habilitando o botão UFCFLOW. Observa-se então que nem todos os botões estão habilitados, isso porque nenhuma malha foi ainda inserida.

Figura A7 - Botão UFCFLOW habilitado.



### 5.1 Inserir Malha

Pelo botão Inserir Malha, a janela Seleção Malha é aberta. Ela apresenta duas opções de definição da malha: por ponto ou por retângulo.

Figura A8 - Janela Seleção Malha.



Na inserção por ponto, o usuário clica na vista e define o ponto superior esquerdo da malha. Ao fazer isso, a Janela Criar Nova Malha aparece e nela são digitados o restante dos parâmetros de definição da malha, sendo eles Número de Linhas e de Colunas, Altura das Linhas e Largura das Colunas (as dimensões horizontais das células em metros, paralelas aos eixos Norte-Sul e Leste-Oeste no sistema de coordenadas UTM), Elevação de Topo (a cota da superfície do terreno caso ele seja considerado plano), Número de Camadas (Quantidade de estratos de solos com características distintas), Espessura (dimensão vertical das camadas de solo). Para camadas de solo tem espessura variável, existe a opção Editar Espessuras.

Figura A9 - Janela Criar Nova Malha.

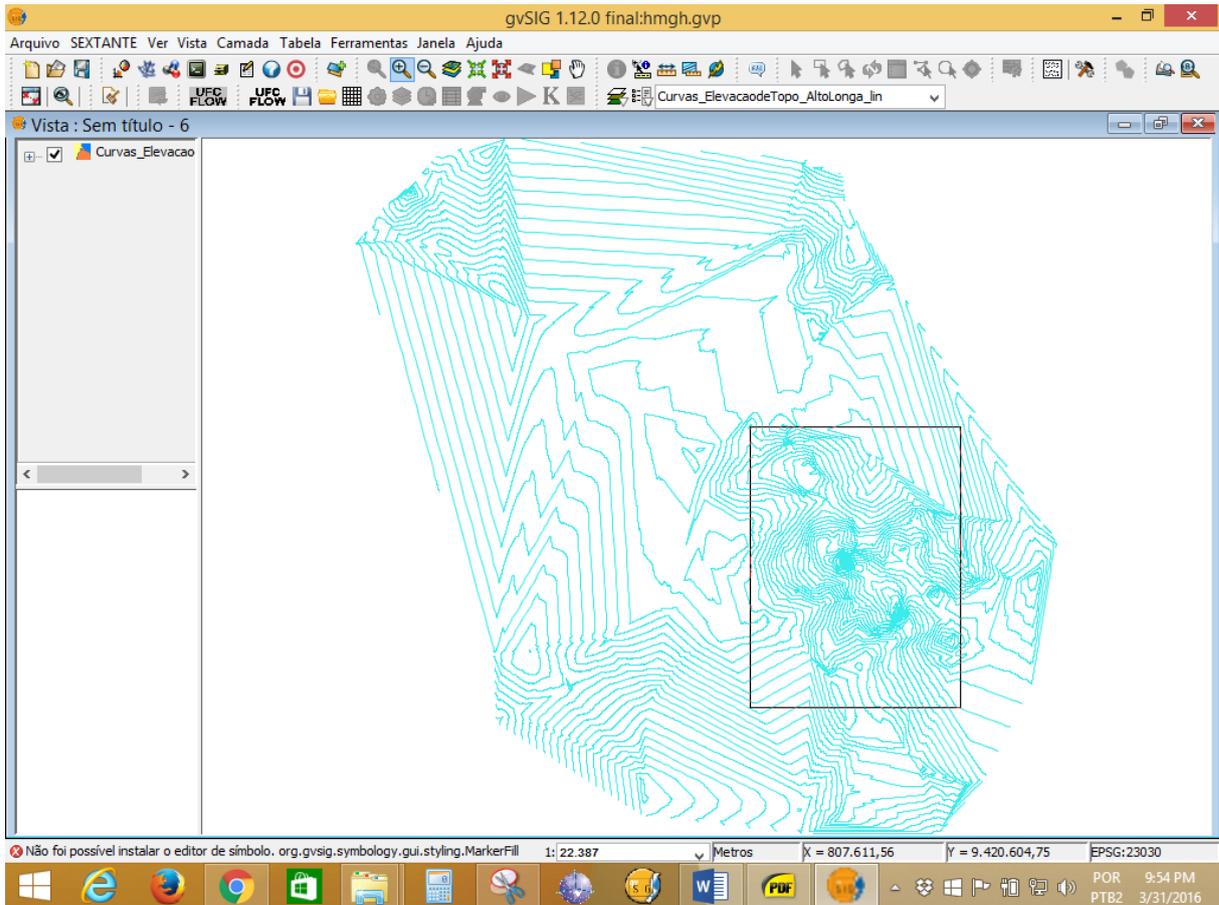
 A imagem mostra a janela 'Criar Nova Malha' com um título amarelo e um botão de fechar vermelho. O conteúdo principal é uma caixa de diálogo com o título 'Criar Nova Malha'. Ela está dividida em seções:
 

- Dimensões da Malha:** Campos de entrada para 'Número de Linhas' e 'Número de Colunas'.
- Dimensões das Células:** Campos de entrada para 'Altura das Linhas' e 'Largura das Colunas'.
- Camadas:** Campo de entrada para 'Número de camadas' (valor 1) com setas de incremento/decremento, e campo de entrada para 'Espessura' (valor 1.00).
- Elevação de Topo:** Campo de entrada com o valor 10.0.
- Editar Espessuras:** Botão com três pontos (...).

 Na base da janela, há dois botões: 'OK' e 'Cancelar'.

Na inserção por retângulo, que será utilizada neste exemplo, o usuário arrasta o mouse de onde será o ponto superior esquerdo da malha até onde será o inferior direito, definindo, assim, um retângulo dentro do qual a malha se inserirá.

Figura A10 - Selecionando retângulo no qual se inserirá a malha.



Assim, surgirá na tela a Janela Criar malha por retângulo, em que se especificam os seguintes parâmetros:

- Na configuração da malha: número de linhas e de colunas;
- Na configuração das camadas: número de camadas, espessura e elevação de topo.

Figura A11 - Janela Criar malha por retângulo.

**Criar malha por retângulo** ✕

**Configuração da Malha**

Número de linhas

Número de colunas

**Dimensões da Malha**

X = 808677,74      Altura = 1688,11

Y = 9417441,77      Largura = 1694,03

**Configuração das Camadas**

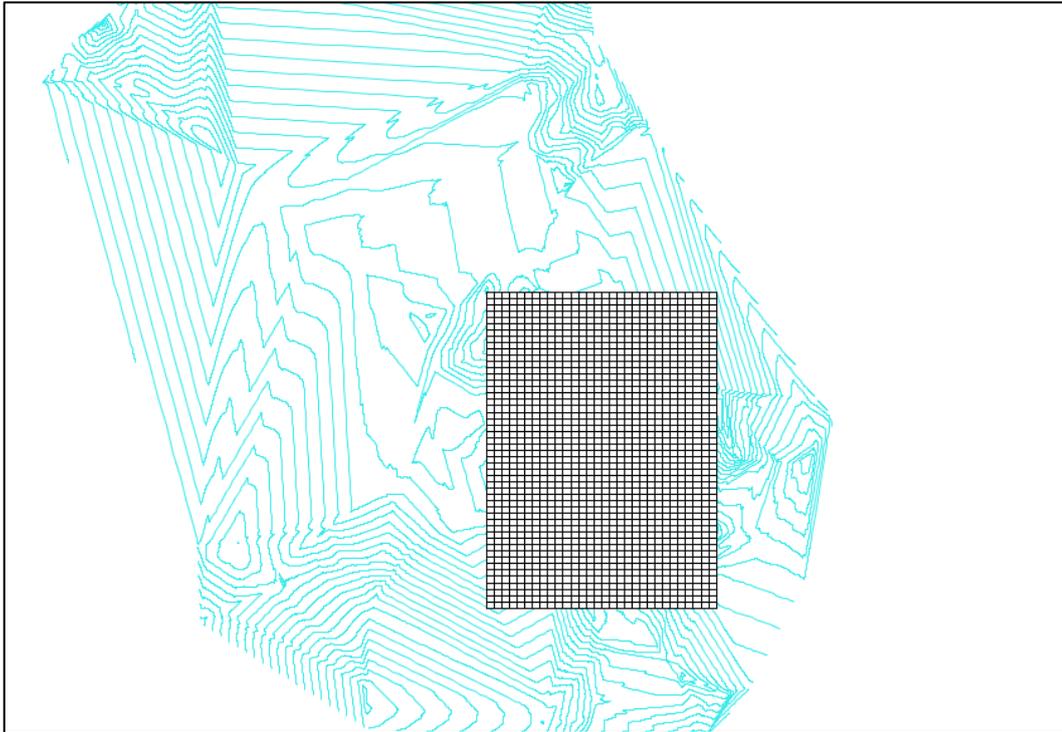
Camadas  ▾

Espessura:

Elevação de Topo

OK

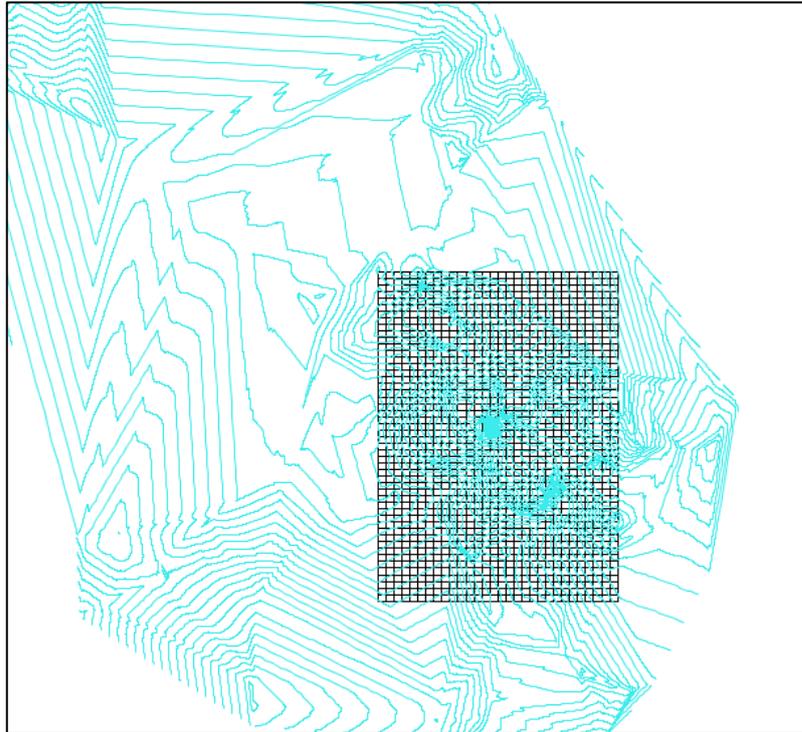
Figura A12 - Malha criada.



A Figura mostra a malha inserida na vista. É necessário dar um duplo clique em alguma parte vazia da vista para promover a atualização da tela. Ao fazer isso, percebe-se que os 8 itens da barra de ferramentas do UFCFLOW que estavam inativos aparecerão.

A nova camada “Malha Camada 1” foi criada sobreposta à camada “Curvas\_ElevaçãodeTopo\_AltoLonga”, inserida anteriormente. Sendo necessário visualizar as curvas dentro do retângulo, podemos modificar esse modo de visualização, arrastando o ícone da camada de curvas de nível para cima.

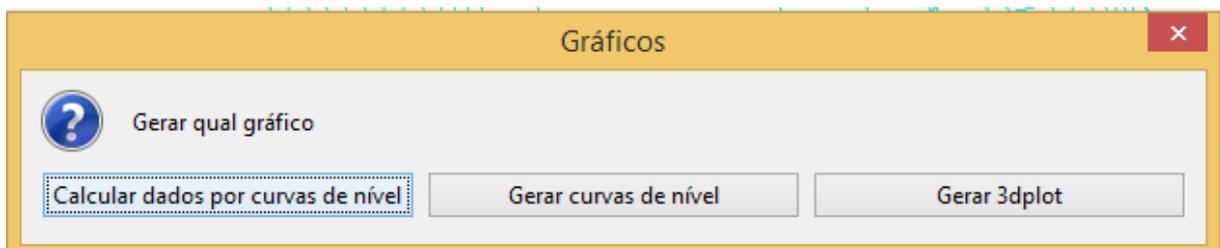
Figura A13 - Modificando a visualização das camadas do gvSIG.



## 5.2 Calcular Elevações pela Curva de Nível

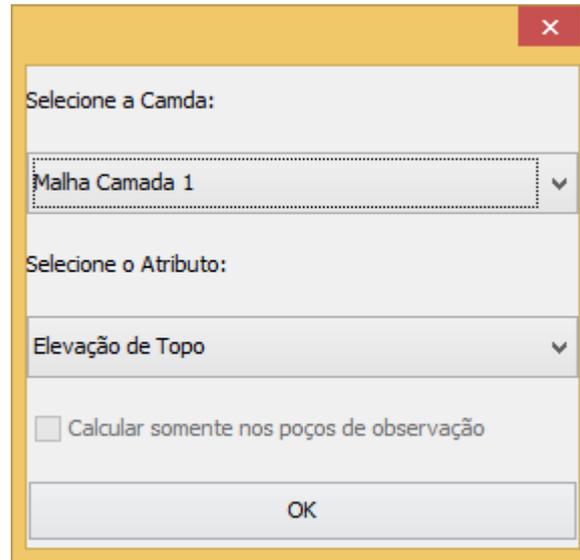
Depois de inserir a malha, deve-se recalcular as elevações de topo das células a partir das curvas de nível inseridas. Para isso clique no botão Criar gráficos  e selecione a opção Calcular dados por curvas de nível, na janela Gráficos.

Figura A14 - Janela Gráficos.



A seguir, a janela mostrada na figura 16 irá aparecer na tela, seleciona-se o atributo Elevação de Topo e a camada em que este atributo será calculado (no nosso caso existe apenas 1 camada) e clica-se em OK (é normal o processamento dessa etapa ser um pouco elevado, cerca de 30 a 60 segundos).

Figura A15 - Janela de seleção de atributo.



Em seguida, clica-se com o botão direito do mouse no ícone referente à camada “Curvas\_ElevaçãodeTopo\_AltoLonga” e seleciona-se a opção remover camada.

Utilizando o passo a passo mostrado no item 2.3 deste manual, deve-se inserir a camada referente às elevações de fundo da camada, ou seja, a cota do fundo impermeável da bacia hidrográfica. No presente exemplo, esse arquivo chama-se ‘Curvas\_ElevacaodeFundo\_AltoLonga\_lin’.

Após a inserção dessa camada, é necessário ir novamente ao ícone Criar gráficos → Calcular dados por curvas de nível só que, desta vez, seleciona-se o atributo Elevação de Fundo e clique em OK e aguarda-se novamente o processamento.

Agora, as elevações de topo e de fundo da camada única da bacia estudada foram calculadas para cada célula da malha criada. Para verificar os resultados, clica-se no botão Abrir Tabela com dados da Malha e examinam-se as tabelas referentes aos atributos Elevação de Topo e Elevação de Fundo. Os valores devem estar próximos das cotas das respectivas curvas de nível, mostrando que as elevações foram calculadas corretamente, como mostra a figura 17.

Figura A16 - Tabela de valores da Elevação de Topo do Sistema.

**Malha Tabela**

Elevação de Topo do Sistema    Camada    1    **EXP**    IMP

|    | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1  | 161.246552... | 160.354798... | 159.401719... | 158.953234... | 158.730568... | 158.904668... | 160.240212... | 161.246552... |
| 2  | 161.268628... | 160.687814... | 160.321962... | 160.449748... | 160.432898... | 160.890198... | 161.727299... | 161.268628... |
| 3  | 161.797959... | 161.309771... | 161.628590... | 161.852091... | 162.168356... | 164.068216... | 163.421486... | 161.797959... |
| 4  | 162.292546... | 162.107169... | 162.599068... | 163.200252... | 164.070556... | 165.104281... | 164.966811... | 162.292546... |
| 5  | 162.878403... | 162.640248... | 163.547551... | 164.457003... | 165.307117... | 166.039158... | 166.461562... | 162.878403... |
| 6  | 163.355672... | 163.494839... | 164.476903... | 165.621550... | 166.369228... | 167.049228... | 167.792723... | 163.355672... |
| 7  | 163.907894... | 164.344012... | 165.263675... | 166.150283... | 166.664645... | 167.338108... | 168.067957... | 163.907894... |
| 8  | 164.385140... | 165.007534... | 165.526093... | 166.135774... | 166.596715... | 167.069379... | 167.995435... | 164.385140... |
| 9  | 164.502068... | 165.085894... | 165.344385... | 165.804964... | 166.152726... | 166.857270... | 167.826069... | 164.502068... |
| 10 | 164.156763... | 164.266825... | 164.424768... | 164.819742... | 165.249623... | 166.113975... | 167.276427... | 164.156763... |
| 11 | 163.314830... | 163.118410... | 163.230181... | 163.639883... | 164.068221... | 164.772665... | 166.144120... | 163.314830... |
| 12 | 162.368962... | 162.170985... | 162.013806... | 162.325685... | 162.667235... | 163.013016... | 163.882612... | 162.368962... |
| 13 | 161.396390... | 161.305956... | 161.017971... | 161.153651... | 161.686343... | 162.361483... | 163.248382... | 161.396390... |
| 14 | 160.420389... | 160.515027... | 160.532970... | 160.791707... | 161.426422... | 162.069404... | 162.849472... | 160.420389... |
| 15 | 159.405908... | 159.680327... | 160.010640... | 160.541493... | 161.137862... | 161.760591... | 162.558546... | 159.405908... |
| 16 | 158.463728... | 158.970223... | 159.579347... | 160.242378... | 161.027262... | 161.874261... | 162.843188... | 158.463728... |
| 17 | 158.010762... | 158.715237... | 159.495350... | 160.363000... | 161.289901... | 162.471080... | 163.570489... | 158.010762... |
| 18 | 158.112445... | 159.016165... | 159.638947... | 160.431447... | 161.757268... | 163.236557... | 164.502137... | 158.112445... |
| 19 | 158.028257... | 159.174957... | 160.109935... | 161.243014... | 162.150578... | 164.082186... | 165.372004... | 158.028257... |
| 20 | 158.095403... | 159.085704... | 160.256685... | 162.074406... | 163.475187... | 164.920317... | 166.227531... | 158.095403... |
| 21 | 157.839947... | 159.342421... | 160.931175... | 162.596999... | 164.403856... | 165.714182... | 166.889806... | 157.839947... |
| 22 | 158.598466... | 159.978377... | 161.398503... | 163.207507... | 165.247377... | 166.765251... | 167.461893... | 158.598466... |
| 23 | 159.317838... | 160.597844... | 161.931844... | 163.814654... | 165.964413... | 167.226111... | 167.902556... | 159.317838... |
| 24 | 159.694242... | 161.113465... | 162.596913... | 164.354281... | 165.809097... | 167.094452... | 168.241922... | 159.694242... |
| 25 | 159.601658... | 161.071152... | 162.718260... | 164.513438... | 165.755933... | 166.852948... | 168.219947... | 159.601658... |
| 26 | 159.459272... | 160.790282... | 162.367249... | 164.129486... | 165.176409... | 166.357532... | 167.763968... | 159.459272... |
| 27 | 159.462207... | 160.534929... | 162.130223... | 163.494048... | 164.691937... | 165.963831... | 167.569314... | 159.462207... |
| 28 | 159.512781... | 160.304006... | 161.648425... | 162.958504... | 164.109951... | 165.595856... | 166.929348... | 159.512781... |
| 29 | 159.579811... | 160.132521... | 161.167395... | 162.297114... | 163.424623... | 164.420889... | 164.560727... | 159.579811... |
| 30 | 159.550551... | 160.163129... | 160.829595... | 161.780232... | 162.733378... | 163.369198... | 164.493078... | 159.550551... |
| 31 | 159.468310... | 160.024227... | 160.554034... | 161.358199... | 161.895204... | 162.047296... | 162.906299... | 159.468310... |

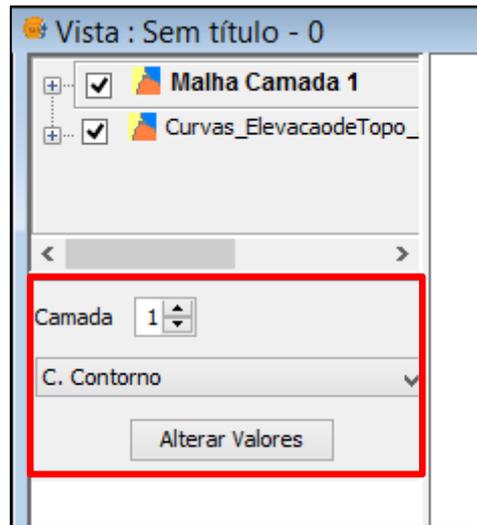
Alterar Valores    Atualizar Malha

Após a inserção das elevações de topo e de fundo, outras camadas de orientação também podem ser adicionadas à vista, pelo passo a passo mostrado no item 2.3, inclusive desenhos dos corpos d'água presentes na região, marcações do posicionamento dos poços, etc. Não é recomendado adicionar essas camadas auxiliares antes do cálculo das cotas, pois isso pode acarretar uso da camada errada pelo programa.

### 5.3 Configurar parâmetros

Depois de inserir a malha, é possível então definir seus parâmetros. O UFCFLOW possui uma ferramenta  que abre um painel de configuração de parâmetros da malha, o qual pode ser observado na figura abaixo.

Figura A17 - Painel de configuração de parâmetros de malha ativado.



Para modificar os dados nas células, necessita-se primeiramente selecionar com quais células desejamos trabalhar. O gvSIG apresenta três ferramentas para seleção   , sendo essas: por ponto, por retângulo e por polígono.

#### 5.3.1 Condições de Contorno

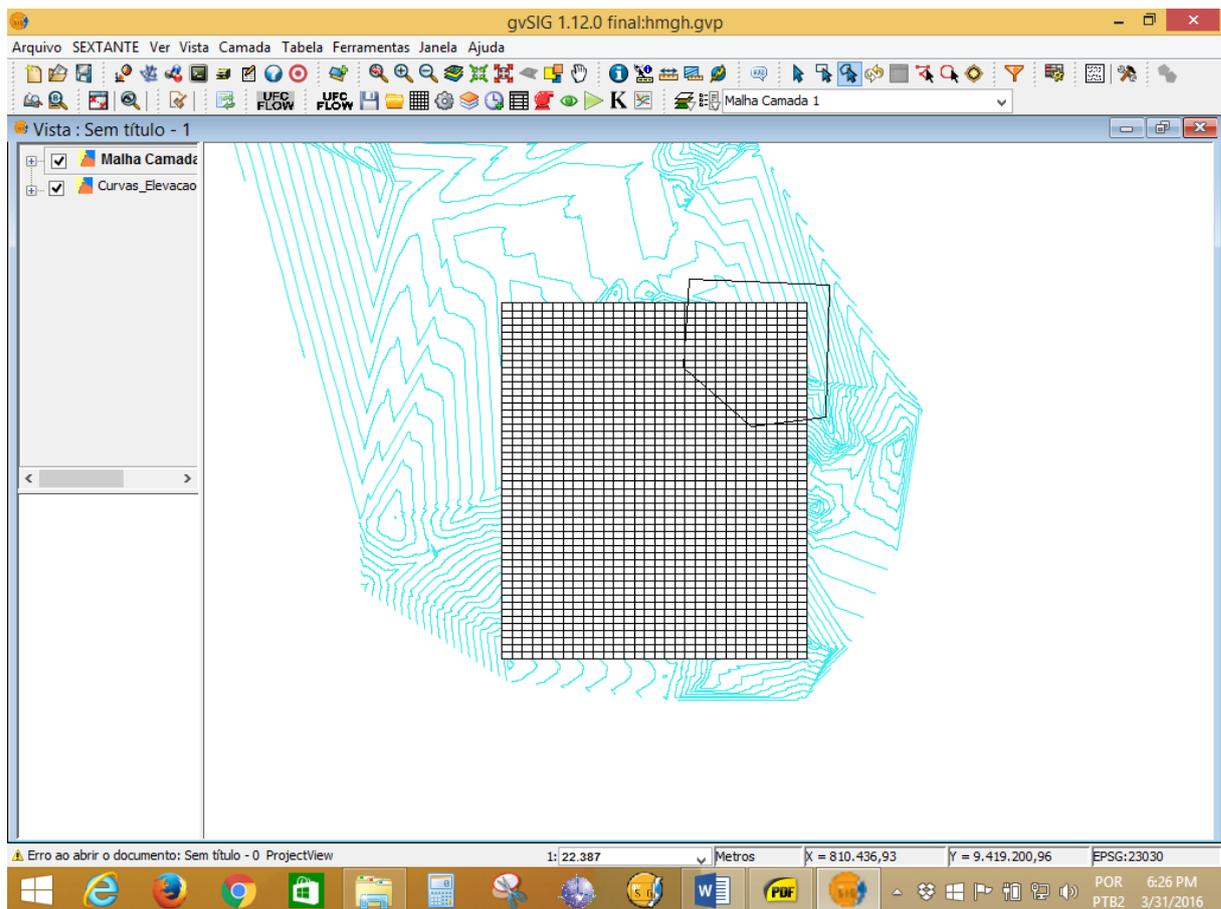
Esse parâmetro pode assumir os valores de Ativa, Inativa e Constante. Células ativas são aquelas em que a carga hidráulica varia e é calculada, permitindo fluxo através das suas 4 fronteiras horizontais (exceto quando vizinha a uma célula inativa); e com células de camadas inferiores e/ou superiores. Permite ainda a inserção de um poço de bombeamento com vazão constante para cima, quando em contato com a superfície do solo. Este tipo de célula não pode ficar em contato direto com os limites horizontais da malha.

As células Inativas representam barreiras impermeáveis, ou seja, que não permitem fluxo com células vizinhas. Lembrando que toda célula de borda que não represente um corpo hídrico, deve ser considerada célula inativa, para evitar que haja células ativas nas bordas.

Já as células constantes são as condições de contorno do problema, no sentido matemático. Durante a simulação e a calibração, elas permanecem com o mesmo valor especificado inicialmente. Fisicamente elas representam os corpos d'água (rios, lagoas e açudes) em que a cota do nível d'água pode ser medido diretamente. Por default, todas as células inicialmente se encontram na condição ativa, sendo necessário especificar as constantes e as inativas.

Primeiramente, para especificar as constantes, clica-se no botão Selecionar por polígono , da barra de ferramentas do gvSIG, por cliques sucessivos nos vértices, desenha um polígono delimitando a região em que se encontra um dos corpos d'água presentes na região e dê um duplo clique no último vértice para encerrar a seleção.

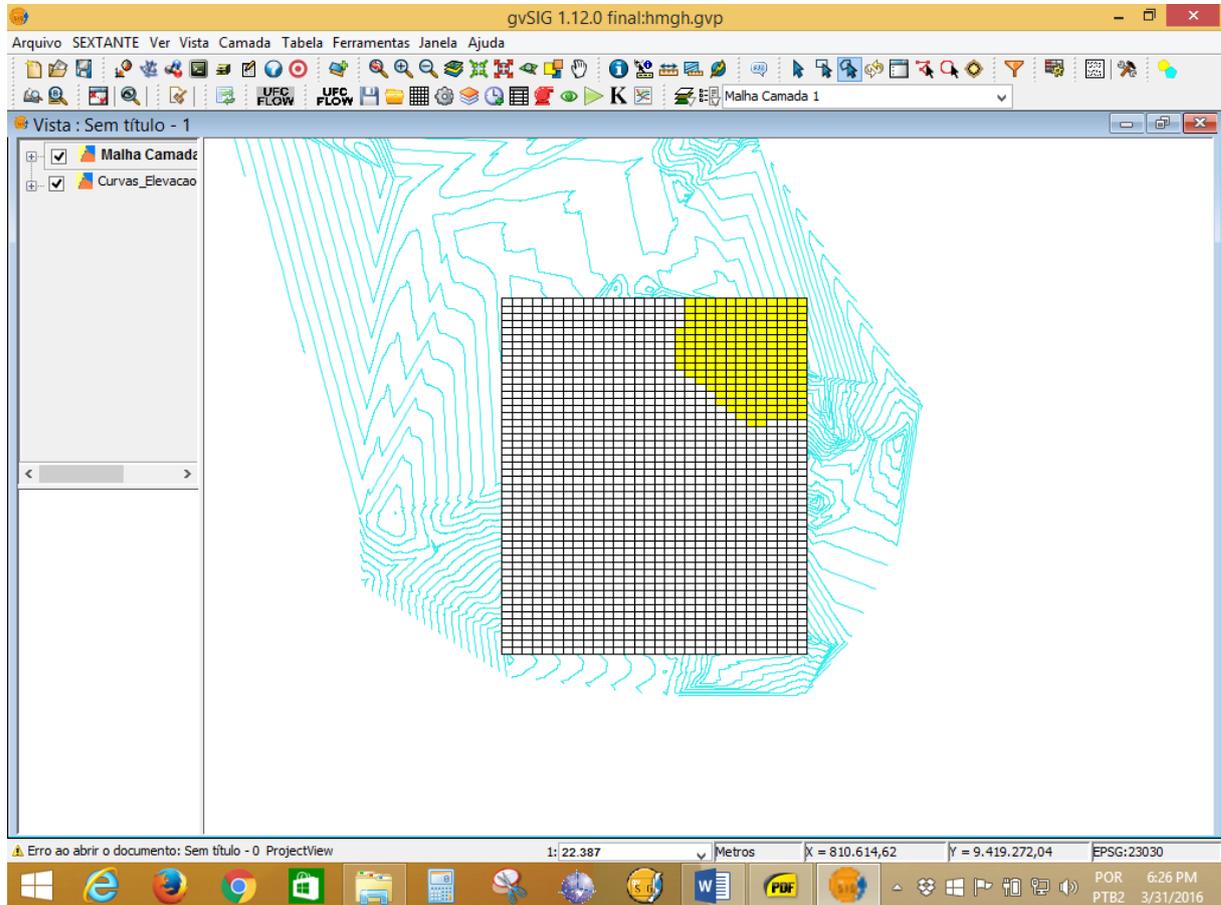
Figura A18 - Selecionando células do corpo d'água por polígono.



Agora que as células estão selecionadas, deve-se ir à tabela de configuração de parâmetros da malha (caso não esteja aparente, clique em ) e seleciona-se a opção 'C. Contorno' e clica-se no botão 'Alterar valores'. A janela 'Alterar Células'

deve aparecer. Nela marca-se a opção ‘constante’ e clique em ‘OK’. Agora estas células estão configuradas como constantes.

Figura A19 - Células do corpo d’água selecionadas.

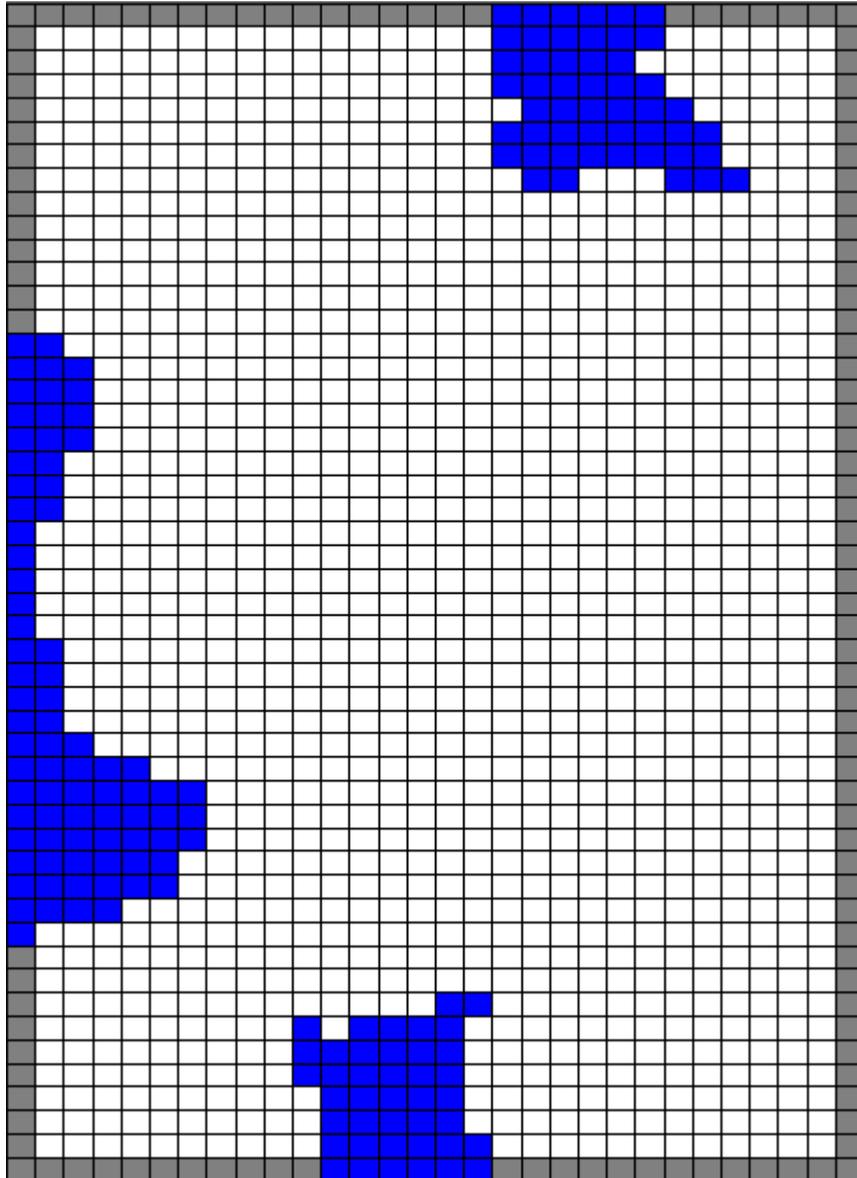


Para configurar as células de borda não constantes como inativas, clica-se no botão ‘Selecionar por retângulo’ , da barra de ferramentas do gvSIG e, segurando o Ctrl, desenham-se os retângulos em cima dessas células.

Assim como foi feito para as células constantes, devemos ir ao painel de configuração de parâmetros e selecionar “”, só que, desta vez, marcar a opção ‘Inativa’.

Para o exercício proposto nesse manual, a malha camada é representada pela figura abaixo.

Figura A20 - Malha Camada do Exemplo Alto-Longá.



### 5.3.2 Carga Hidráulica Inicial

A carga hidráulica é definida, nos corpos d'água, como a cota de superfície da água, e, no terreno, como a cota do limite superior do lençol freático.

Inicialmente, insere-se uma estimativa inicial das cargas hidráulicas em todas as células da malha. Esse valor deve ser próximo das cotas de superfície dos corpos d'água considerados e do nível do lençol freático medido nos poços.

Para fazer isso, utiliza-se a seleção por retângulo  para selecionar todas as células da malha. Dirija-se novamente ao painel de configuração de parâmetros e

selecione 'Carga Hidráulica'. Na janela 'Entrada' digita-se o valor de carga hidráulica inicial escolhido.

Agora, repete-se o passo a passo desenvolvido no item 2.5.1 para selecionar as células dentro de um dos corpos d'água considerados na análise, e, pelo painel de configuração de parâmetros, define-se a carga hidráulica como sendo a cota de superfície desse reservatório. Repita esse procedimento para cada corpo d'água considerado, e as cargas hidráulicas iniciais estarão definidas.

### 5.3.3 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é uma medida da facilidade do solo em permitir a percolação de água, sendo função de diversos fatores como granulometria, composição química, etc. Ela determina a intensidade do fluxo através do solo nas 3 direções, podendo ter um valor diferente para cada direção.

Para realizar a simulação, é preciso especificar as condutividades verticais (quando há mais de uma camada) e as horizontais. No presente exemplo, utilizaremos o valor de  $10^{-6}$  para a condutividade horizontal e, como há somente 1 camada, não é necessário especificar a condutividade vertical.

Da mesma maneira como foi feito anteriormente, selecionam-se todas as células, dirige-se ao painel de configuração de parâmetros, seleciona-se a opção 'Condutividade horizontal' e digite '1E-6'. Agora a condutividade hidráulica está configurada.

### 5.4 Inserir poços de bombeamento

Após definir todos os parâmetros e determinar a localização dos corpos hídricos na malha, deve-se determinar a localização dos poços de bombeamento do nosso terreno.

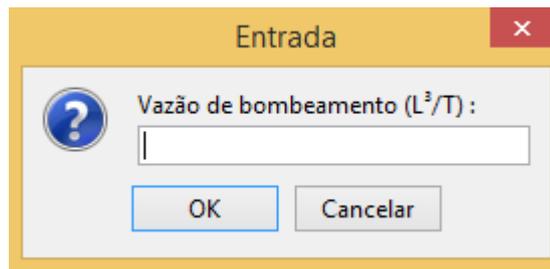
O poço de bombeamento é importante para a calibração do sistema, pois é ele quem provocará um elevado gradiente hidráulico no terreno, permitindo por meio do método MIGH avaliar os dados de condutividade horizontal do solo.

Para inserir um poço, primeiramente deve-se selecionar a célula que representa sua localização, utilizando a ferramenta de seleção por ponto . Depois, clica-se no

ícone de inserção de poço de bombeamento  para adicionar o poço à malha. Uma janela será aberta para determinação da vazão de bombeamento, como mostra a figura abaixo.

O usuário deve considerar que, sendo um poço de bombeamento, a vazão inserida deve ter valor negativo, caso contrário, o sistema entenderá que o solo está recebendo água.

Figura A21 - Janela para determinação da vazão do poço de bombeamento.



## 5.5 Inserir poços de observação

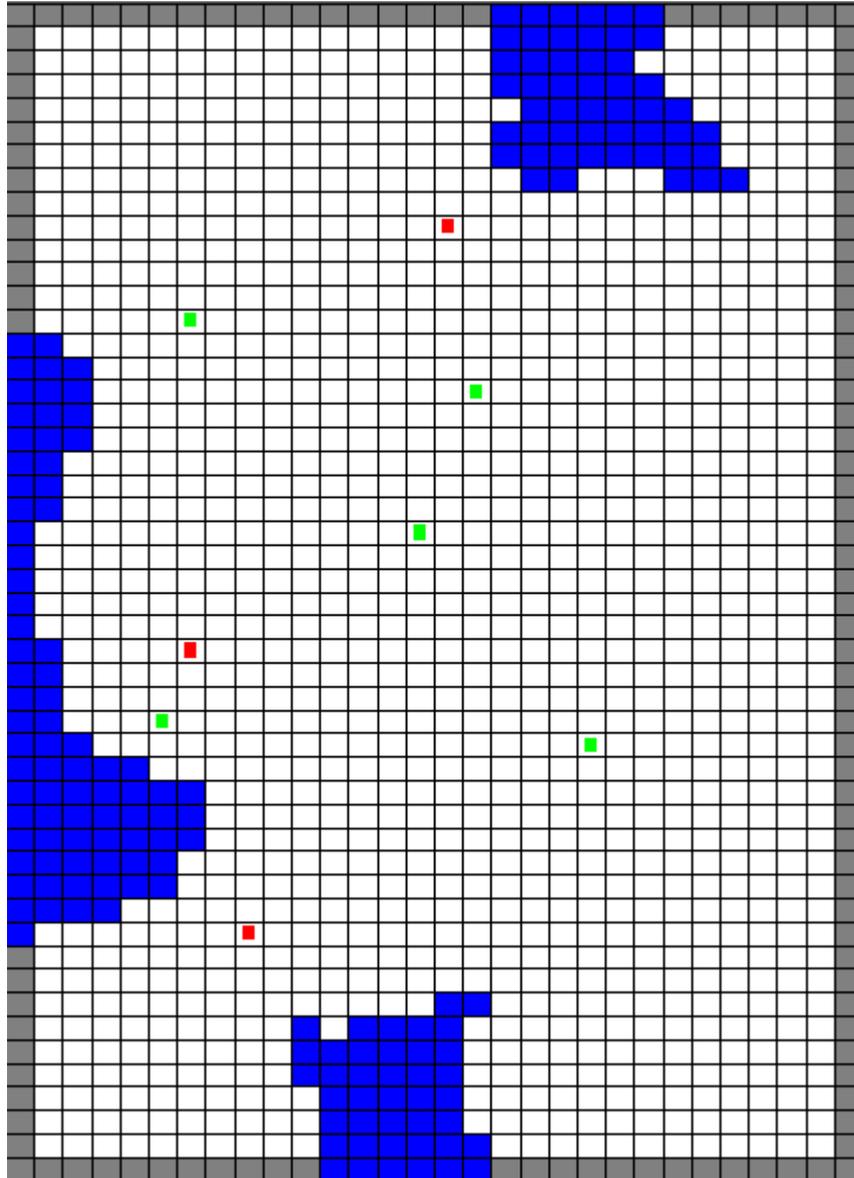
Os poços de observação são pontos de carga hidráulica conhecida. Eles tornam-se necessários na calibração, pois servem de referência na avaliação do erro dos cálculos da condutividade horizontal.

O sistema faz a calibração de duas formas, por meio do modelo fixo e do modelo não fixo. No modelo fixo, o sistema considera as cargas hidráulicas dos poços de observação constantes, não permitindo sua variação durante as iterações. E no modelo não fixo, essas cargas variam normalmente como qualquer célula ativa. O sistema determina assim, o erro do valor encontrado nas variações pelo valor de entrada, e a cada iteração tenta minimizar esse erro.

Para inserir poços de observação, clica-se no ícone de inserção do poço . Sendo necessário especificar a carga hidráulica dessa célula.

Na figura abaixo, é possível visualizar os poços de bombeamento e de observação para o exercício do manual.

Figura A22 - Malha Camada com poços de bombeamento e poços de observação.



## 6. SIMULAÇÃO

Depois de inserir todos os dados de poços, lagos e das células, recomenda-se que o arquivo seja salvo com o nome da região trabalhada (no nosso exemplo Alto\_Longa). O último passo será a simulação e calibração dos dados.

A simulação é realizada pelo botão 'Executar simulação' ►. Quando a simulação termina, uma janela é apresentada, devemos clicar na opção 'Sim', permitindo que o programa atualize os resultados na malha. Em seguida, salva-se o arquivo pela opção 'Salvar como' com o nome Alto\_Longa\_Simulacao.

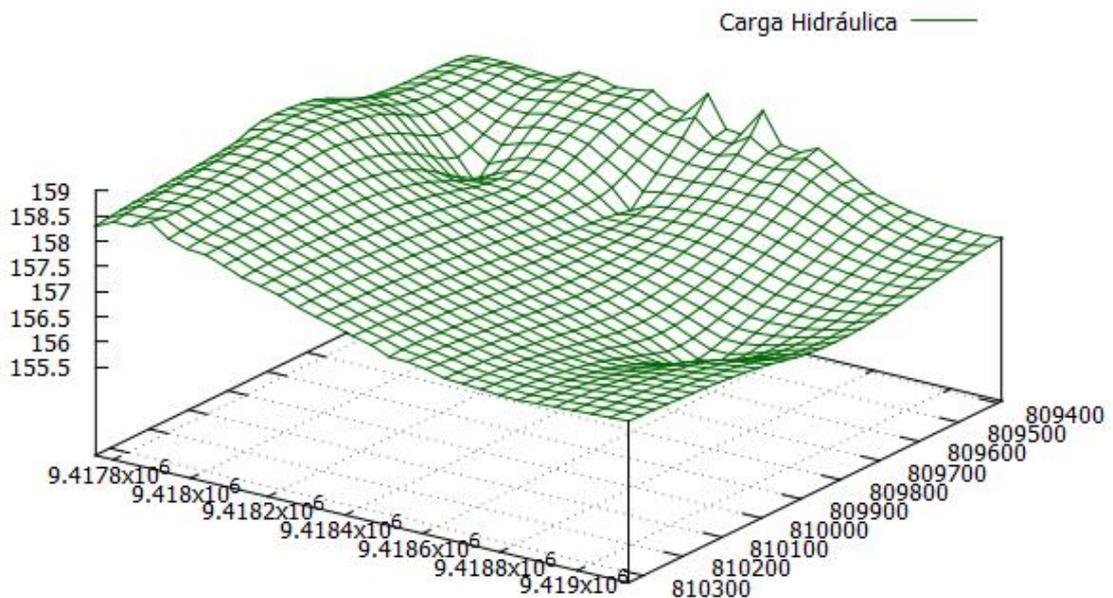
OBS: É muito importante que a malha seja salva em outro arquivo após a simulação ser executada e os dados da malha alterados, pois se salvarmos em cima do arquivo original, perdem-se todos os dados iniciais inseridos.

Após realizar a simulação, ao acessar a tabela referente à carga hidráulica, observa-se que os valores das células ativas se alteraram, confirmando que a simulação foi realizada com sucesso.

Para visualizar a superfície de nível d'água calculada pelo programa, dirija-se à ferramenta "Criar gráficos."  e selecione a opção "Gerar 3dplot". Assim, por meio do Gnuplot, é gerado um gráfico tridimensional da carga hidráulica das células da malha.

Aqui está o gráfico referente ao resultado da simulação realizada para os dados iniciais fornecidos nesse manual.

Figura A23 - Gráfico da carga hidráulica gerado no exemplo Alto-Longá.



Vê-se claramente que existem cones de rebaixamento ao redor das células em que foram colocados poços de bombeamento, o que é justamente o que se esperaria na prática.

## 7. CALIBRAÇÃO

A simulação é realizada pelo botão “Executar calibração de parâmetros hidrogeológicos” **K**.

Quando a calibração termina, uma janela é apresentada, deve-se clicar na opção ‘Sim’, permitindo que o programa atualize os resultados na malha. A seguir, salva-se o arquivo pela opção ‘Salvar como’ com o nome Alto\_Longa\_Calibração.

Na figura abaixo está representado o resultado da calibração para os dados do presente exemplo.

Figura A24 - Mapa visual da condutividade hidráulica do exemplo Alto-Longá.

