



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34879>



## Calibração das Condutividades Hidráulicas do Aquífero Missão Velha usando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico

### *Calibration of the Hydraulic Conductivities of the Missão Velha Aquifer using the Iterative Hydraulic Gradient Method*

Maísa de Calda Lopes<sup>1</sup>; Thayná Barbosa Mello <sup>2</sup>; João da Silva Cavalcante<sup>3</sup>; Luiz Felipe Cavalcante da Silva<sup>4</sup>; Marco Aurélio Holanda de Castro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. Email: maísa.lopes@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4950-828X>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. Email: thaynamello@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6956-2345>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. Email: joaocavalcante@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6002-8971>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. Email: felipe.cavalcante@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0359-2502>

<sup>5</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza-CE, Brasil. Email: marco@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>

**Resumo:** Este trabalho analisa a eficiência do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH) para calibração de modelos numéricos de água subterrânea a partir da modelagem do aquífero Missão Velha localizado ao norte do município de Brejo Santo-CE. O MIGH converge quando a média dos ângulos  $\phi$  e/ou o valor do RMSEH atingem um valor mínimo predefinido. Na análise foi obtido RMSEH (raiz do erro quadrático médio) de  $2.1651 \times 10^{-4}$ , no qual resultou a condutividade hidráulica máxima de  $1.01 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  e valor mínimo de  $9.96 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ . Estes valores são consistentes com as expectativas para a região estudada. O trabalho conclui que o MIGH demonstra ser um método eficiente e confiável para calibrar a condutividade hidráulica em aquíferos. Adicionalmente, o aplicativo UFC-FLOW mostrou-se como uma ferramenta computacional robusta para a modelagem de fluxo subterrâneo, provando ser essencial na tomada de decisões relacionadas ao planejamento e gestão de recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Calibração; Condutividade hidráulica; Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.

**Abstract:** This paper analyzes the efficiency of the Iterative Hydraulic Gradient Method (IHGM) for calibrating numerical groundwater models through the modeling of the Missão Velha aquifer located in the northern part of the municipality of Brejo Santo-CE. The IHGM converges when the average of the  $\phi$  angles and/or the RMSEH value reach a predefined minimum value. In the analysis, an RMSEH (root mean square error) of  $2.1651 \times 10^{-4}$ , was obtained, which resulted in a maximum hydraulic conductivity of  $1.01 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  and a minimum value of  $9.96 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ . These values are consistent with the expectations for the studied region. The paper concludes that the IHGM proves to be an efficient and reliable method for calibrating hydraulic conductivity in aquifers. Additionally, the UFC-FLOW application proved to be a robust computational tool for modeling underground flow, proving essential in decision-making related to the planning and management of water resources.

**Keywords:** Calibration; Hydraulic conductivities; Iterative Hydraulic Gradient Method.

Recebido: 15/12/2023; Aceito: 29/02/2024; Publicado: 15/03/2024.

## 1. Introdução

Atualmente, os recursos hídricos superficiais estão cada vez mais inapropriados para consumo humano, devido às diversas fontes poluidoras que emitem contaminantes diariamente (PEIXOTO, PEREIRA; 2019). Devido a isso, a água subterrânea é uma alternativa para suprir as necessidades da população, principalmente para regiões de difícil acesso, ou seja, onde não se tem rede de água disponível (FERNANDES, *et al.* 2020). Além disso, segundo Lopes *et al.* (2023) a exploração de águas subterrâneas tem se intensificado, em grande parte, pelo favorável custo-benefício.

No Brasil, o maior volume de água subterrânea é destinado ao abastecimento público, cerca de 61%, com 43% de autoabastecimento por água oriunda de poços profundos, 12% de nascentes ou fontes e 6% de poços rasos, segundo o censo de 2000 (IBGE, 2000).

Diante disso, torna-se evidente a importância do desenvolvimento de metodologias focadas na análise do fluxo de água subterrânea. Entre as abordagens mais eficazes, destaca-se a modelagem computacional. Conforme exposto por Fetter (2001), a modelagem matemática hidrogeológica é capaz de representar os processos que ocorrem no aquífero por meio de algoritmos numéricos. Esta técnica, que emprega formulações matemáticas avançadas, é uma ferramenta valiosa em estudos hidrogeológicos.

Trabalhos que utilizam a modelagem computacional em contextos hidrogeológicos são amplamente aplicados, principalmente na análise de aquíferos. Engelbrecht e Chag (2015) utilizaram a modelagem computacional para quantificar o balanço hidrológico e compreender a dinâmica do fluxo das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuiá (SAU), a partir do uso do algoritmo computacional FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System*). Galvão *et al.* (2023) utilizou o aplicativo MODFLOW (*Modular Three dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*) para realizar o balanço hídrico do aquífero Içá-Solimões, localizado na província petrolífera de Urucu-AM.

Para maximizar a eficiência dos modelos computacionais em hidrogeologia, é necessário que a modelagem descreva a realidade geológica e hidrológica, envolvendo as condições iniciais e de contorno que descrevem o fluxo subterrâneo. Além disso, o processo de calibração deve assegurar que o modelo não apenas reproduz, mas também preveja de forma confiável o comportamento do aquífero. Essa situação inclui o ajuste das variáveis e dos parâmetros de acordo com observações empíricas e dados coletados, para que o modelo possa fornecer resultados precisos. Dentre os métodos de calibração, tem-se o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH) é um método implícito que foi desenvolvido inicialmente por Guo e Zhang (2000) para a calibração da transmissividade hidráulica em aquíferos subterrâneos. O Método foi aplicado em alguns trabalhos, como McLaughlin e Townley (1996), Guo e Zhang (2000), Schuster e Araújo (2004) e Tavares (2010). Segundo Schuster e Araújo (2004), uma das vantagens do MIGH é sua capacidade de transformar o procedimento da otimização multidimensional em múltiplos procedimentos unidimensionais, ou seja, uma redução significativa no tempo computacional, além de desviar os problemas de convergência e o mau posicionamento do sistema linear são resolvidos.

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é verificar a eficiência do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH) na calibração da condutividade hidráulica do Sistema Aquífero Missão Velha, situado ao norte do município de Brejo Santos, no Ceará, utilizando o aplicado UFC-Flow. Além disso, a partir dos resultados, foi possível analisar a situação atual do fluxo subterrâneo da região.

## 2. Área de Estudo

A área de estudo está situada ao norte do município de Brejo Santo, o qual está localizado na zona sul do Estado do Ceará, como mostra a Figura 1.

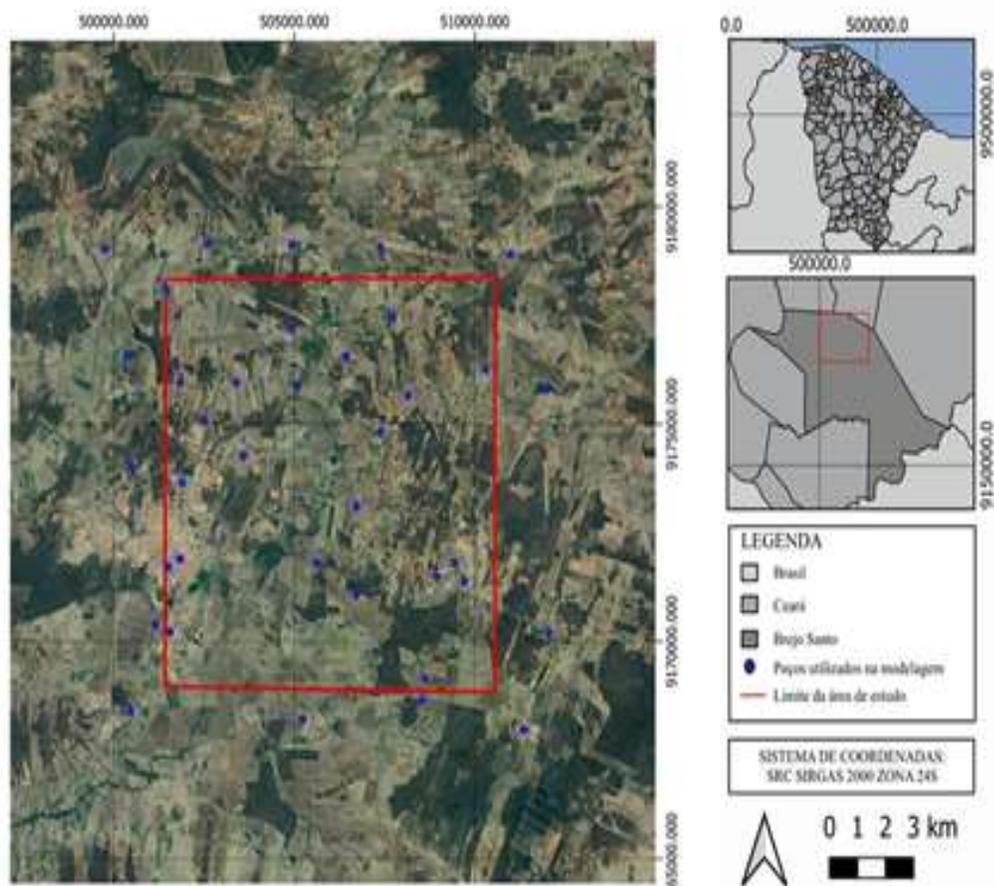


Figura 1 – Mapa de localização  
Fonte: Authors (2023)

Segundo o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2023), o município apresenta clima tropical quente semiárido com temperaturas entre 24°C e 26°C. Além disso, a pluviosidade é de 895,8 mm/ano, onde o período chuvoso se concentra entre janeiro e abril.

A área de Brejo Santo está inserida no relevo da Chapada do Araripe. Assim, a região apresenta altitude máxima de 1001 m, com altitude mínima e a média de, respectivamente, 344 m e 515 m. Além disso, a região está incluída na bacia do Salgado, tendo como rede de drenagem os riachos dos Oitis, do Bálamo, Jenipapeiro, dos Porcos e Cana Brava.

São destacados dois domínios hidrogeológicos distintos, as rochas sedimentares e os depósitos aluvionares. Vale destacar que as rochas sedimentares, segundo a CPRM (1998), são caracterizadas por possuírem uma porosidade primária e, nos termos arenosos, uma elevada permeabilidade, traduzindo-se em unidades geológicas com excelentes condições de armazenamento e fornecimento d'água, o que destaca o fato de que 98% da população urbana é abastecida por água subterrânea oriunda de fonte natural, com adução de 6 m<sup>3</sup>/h.

Ademais, a CPRM (1998) destaca a área como parte da formação de Missão Velha, onde o Relatório de Caracterização Hidrogeológica do Sistema Sedimentar do Gráben Crato-Juazeiro, no Vale do Cariri (CE) (SRH, 2005), a condutividade hidráulica dessa formação corresponde a faixa de  $1.65 \times 10^{-5}$  a  $6.00 \times 10^{-5}$  m/s.

### 3. Metodologia

O UFC-FLOW foi desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional, pertencente ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará.

A versão mais recente do UFC-FLOW apresenta uma interface gráfica que simplifica a interação com o programa MODFLOW (modular three dimensional finite difference groundwater flow model). Para o processo de calibração, o aplicativo utiliza o MIGH.

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico, conforme Guo e Zhang (1990, 1994) e Schuster e Araújo (2004), foca em minimizar a diferença entre o gradiente hidráulico observado ( $\nabla h_{obs}$ ) e calculado ( $\nabla h_{calc}$ ). Utiliza-se uma função Lagrangeana ( $L$ ), que integra a equação governante e um multiplicador Lagrangeano ( $\lambda$ ) para otimizar o processo. A expressão da função Lagrangeana é dada pela Equação 1.

$$L = \int_R \{(\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) \cdot (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs}) + \lambda[-\nabla(T\nabla h^{calc}) + q]\} dx dy \quad (1)$$

Onde:

$\lambda = \lambda(x, y)$  é um multiplicador Lagrangeano no espaço;  
 $-\nabla(T\nabla h^{calc}) + q$  é a equação governante.

No caso do fluxo subterrâneo, a equação governante é dada pela Equação 2 para aquíferos livres considerando a anisotropia e o escoamento bidimensional, e a Equação 3 para aquíferos confinados, anisotrópicos com fluxo tridimensional.

$$\frac{\partial L}{\partial T_i} = -\frac{2}{T_i} \int_{r_i} \nabla h_i^{calc} \cdot (\nabla h_i^{calc} - \nabla h_i^{obs}) dx dy \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Onde:

$r_i$  é um pequeno subdomínio do domínio R;  
 $T_i$  é a transmissividade média no subdomínio  $r_i$ .  
 $N$  é o número total de subdomínios em R.

$$\frac{\partial F_{obj}}{\partial K_i} = -\frac{1}{2K_i} \int_{r_i} [\nabla(h_i^{calc})^2 - \nabla(h_i^{obs})^2] \cdot (\nabla h_i^{calc})^2 dx dy = 0 \quad (3)$$

$K_i$  é condutividade hidráulica [L/T]

O procedimento numérico envolve a expressão da equação em diferenças finitas e a realização de um processo iterativo, começando com uma estimativa inicial e ajustando o valor do parâmetro hidrodinâmico em cada iteração até atingir os critérios de convergência. O ajuste do parâmetro pode ser feito pelo método de descida profunda, originalmente, representado na Equação 4.

$$K_i^{j+1} = K_i^j - \lambda \left( \frac{\partial F_{obj}}{\partial K_i} \right)^j \quad (4)$$

Onde:

$\lambda$  é fator de comprimento do passo;  
 $i$  é índice da célula;  
 $j$  é índice da iteração.

Na adaptação de Schuster e Araújo (2004), substituíram a Equação (4) pela Equação 5 com as restrições expressas na Equação 6.

$$K_i^{j+1} = K_i^j \frac{|\nabla h_i^{calcj}|}{|\nabla h_i^{obsj}|} \quad (5)$$

$$K_i^{min} < K_i < K_i^{max} \quad (6)$$

Durante cada etapa do processo iterativo, determina-se o ângulo  $\phi$ , que é formado entre os vetores do gradiente hidráulico observado e calculado, conforme descrito na Equação (7). Paralelamente, calcula-se também a raiz do erro

quadrático médio (RMSEH), conforme indicado pela Equação (8). O ciclo iterativo é concluído quando a média dos ângulos  $\phi$  e/ou o valor do RMSEH atingem um valor mínimo predefinido.

$$\phi_j = \arccos \frac{\nabla h_j^{obs} \cdot \nabla h_j^{calc}}{|\nabla h_j^{obs}| |\nabla h_j^{calc}|} \quad (7)$$

$$RMSEH = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h^{obs} - h^{calc})_i^2} \quad (8)$$

N é a quantidade de pontos observados ou número de células ativas.

### 3.1 Obtenção dos dados

Os dados dos poços a serem utilizados na modelagem foram obtidos a partir do arquivo shapefile (.shp) obtido na Rede Integrada de Monitoramento de Água Subterrânea (RIMAS) para uma melhor delimitação da área de estudo (Figura 2) e para obtenção dos dados através da tabela de atributos. Para os poços de bombeamento, foram consideradas as coordenadas UTM e a vazão; para o poço de monitoramento, foram consideradas as coordenadas UTM, a vazão, o nível estático e o nível dinâmico; por fim, para os poços auxiliares foram consideradas as coordenadas UTM e o nível dinâmico. Os dados de vazão utilizados neste estudo foram obtidos a partir de testes de bombeamento realizados em poços ao período compreendido entre os anos de 1979 e 2015.

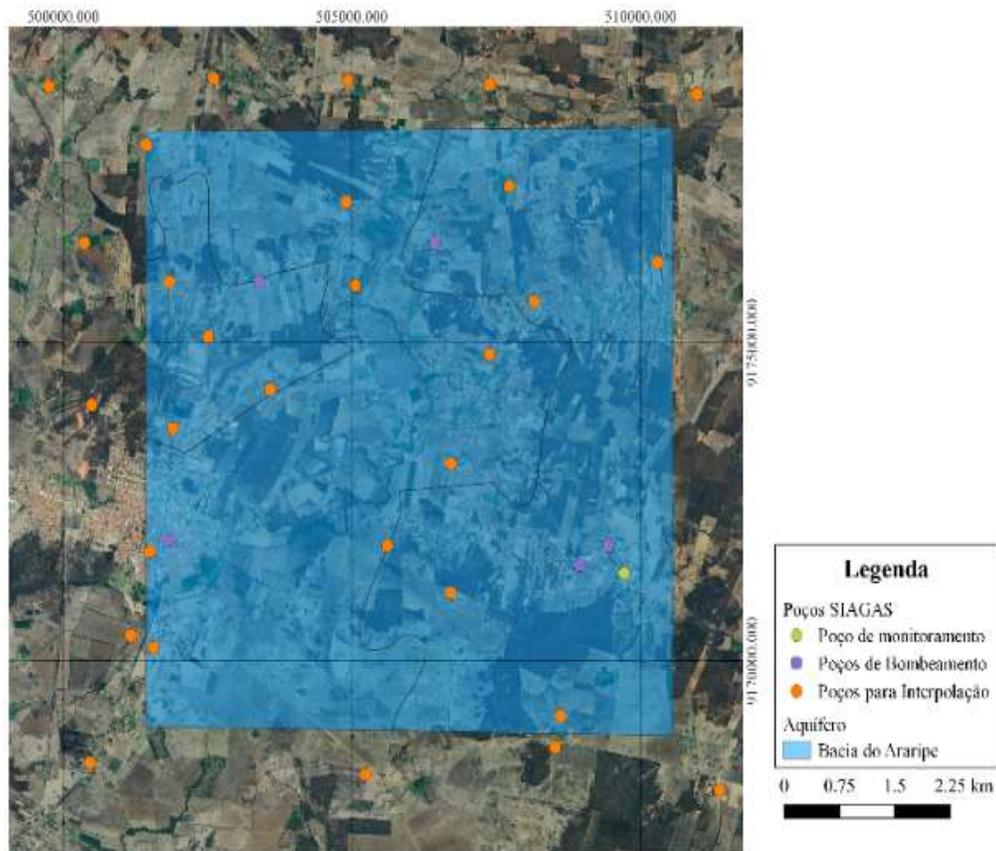


Figura 2 – QGIS  
Fonte: Autores (2023)

Posteriormente, foram obtidas as cotas topográficas a partir do aplicativo UFC-FLOW. Vale ressaltar que a cota de fundo foi gerada de acordo com a Equação 9.

$$C_{f,i} = C_{t,i} - p \quad (9)$$

Onde:

$C_{f,i}$  é a cota de fundo;

$C_{t,i}$  é a cota do topo;

$p$  é a profundidade.

### 3.2 Criação do modelo conceitual, aplicação das condições de contorno e condições iniciais

No aplicativo UFC-FLOW o modelo conceitual foi discretizado em uma malha 40x40. Aplicando a simplificação de que o meio é homogêneo e isotrópico, foi considerada apenas 1 camada, caracterizando um modelo conceitual tridimensional de 40 linhas, 40 colunas e 1 camada.

Para a simulação, foi considerada a condição de contorno de carga constante nas extremidades da malha da área de estudo e a condição de célula ativa no restante da malha (Figura 3). Vale ressaltar que não foram inseridas células inativas, pois não foram verificadas áreas impermeáveis ou de formação cristalina na área.

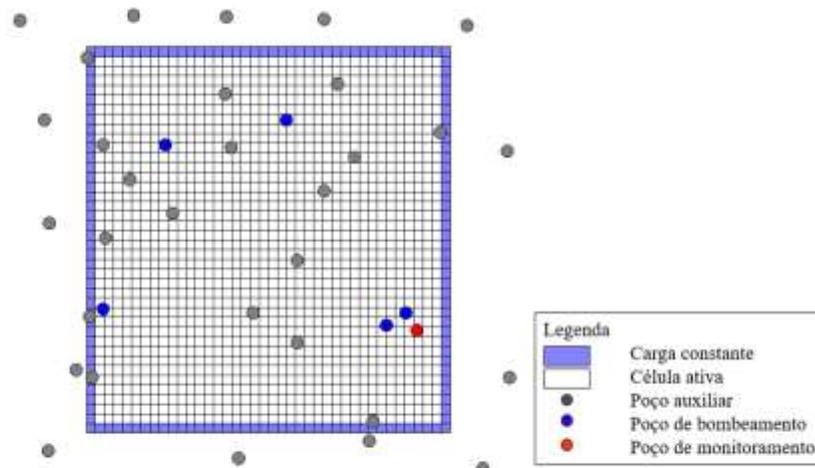


Figura 3 – Condições de contorno

Fonte: Autores (2023)

Ainda na figura 3 podem ser observados os poços inseridos. Ademais, o valor inicial da condutividade hidráulica horizontal foi baseado na faixa de valor informado por (SRH, 2005), sendo adotado o valor de  $1 \times 10^{-5} m/s$ .

### 3.3 Análise da acurácia do modelo

Para avaliação da precisão do modelo e, conseqüentemente, o uso do MIGH no processo de calibração, foi utilizado o coeficiente de determinação (Equação 10), analisando a correlação entre a carga observada e a carga calculada.

$$r = \frac{[\sum_i (X_{m,i} - \bar{X}_m)(X_{s,i} - \bar{X}_s)]}{\sqrt{\sum_i (X_{m,i} - \bar{X}_m) \sum_i (X_{s,i} - \bar{X}_s)}} \quad (10)$$

Dancey e Reidy (2005) apontam para uma classificação ligeiramente diferente:  $r = 0,10$  até  $0,30$  (fraco);  $r = 0,40$  até  $0,6$  (moderado);  $r = 0,70$  até  $1$  (forte).

#### 4. Resultados e discussões

Após o processo de calibração, onde o RMSEH foi de  $2.1651 \times 10^{-4}$ . Foram geradas matrizes  $40 \times 40$  da carga hidráulica e da condutividade hidráulica horizontal. A matriz de carga hidráulica possibilitou a aplicação da Equação 10. Foi obtido o coeficiente de correlação de  $0.70$ . Este valor é particularmente significativo pois, de acordo com Dancey e Reidy (2005), indica uma correlação positiva e forte entre as variáveis estudadas. Isso permite concluir que, à medida que a carga hidráulica observada varia, seja aumentando ou diminuindo, o programa ajusta seus cálculos da carga hidráulica de forma correspondente, mantendo um alto nível de correlação. Essa forte concordância valida a precisão e a confiabilidade do MIGH no processo de calibração.

A análise da matriz de condutividade hidráulica horizontal revelou uma média calculada de  $1.00 \times 10^{-5} m/s$ . Este valor é significativo porque fornece uma medida da facilidade com que a água pode se mover através do substrato do aquífero. Além da média, observou-se um valor máximo de  $1.01 \times 10^{-5} m/s$ , que é consideravelmente menor que o valor de referência máximo estabelecido em  $6.00 \times 10^{-5} m/s$ . Da mesma forma, o valor mínimo registrado foi de  $9,96 \times 10^{-6} m/s$ , que também fica abaixo do valor de referência máximo previamente definido em  $1.65 \times 10^{-5} m/s$ . Esses resultados indicam que o modelo conceitual adotado para a área de estudo, juntamente com as simplificações aplicadas, como a consideração de um meio isotrópico e o regime estacionário, traduz de forma adequada as condições reais do aquífero de Missão Velha, sugerindo que as condições de contorno aplicadas e as simplificações feitas são representativas do sistema aquífero estudado, permitindo assim uma calibração eficiente do modelo.

O software UFC-FLOW permite aos usuários gerar isolinhas representativas da carga hidráulica, conforme ilustrado na Figura 4. Essas isolinhas são linhas contínuas que conectam pontos de igual valor de carga hidráulica dentro de um campo de fluxo, proporcionando uma visualização clara e detalhada de como a carga hidráulica se distribui através do campo em estudo.

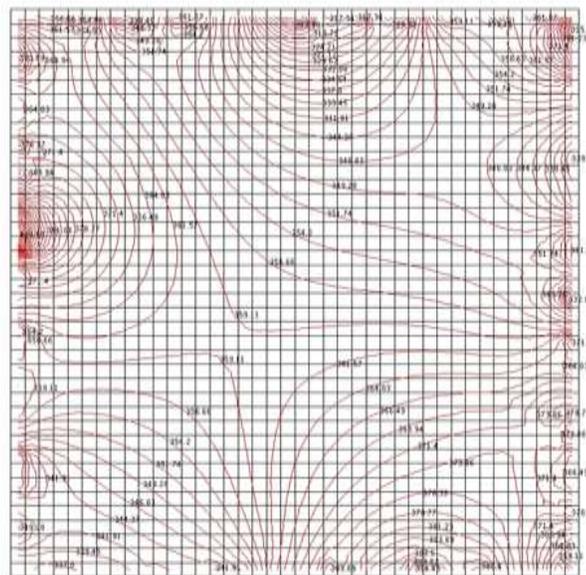


Figura 4 – Isolinhas da carga hidráulica  
Fonte: Autores (2023)

A análise detalhada das isolinhas de carga hidráulica na região estudada revela um padrão distinto nas extremidades leste e oeste, onde as isolinhas apresentam-se mais próximas umas das outras. Esta proximidade entre as isolinhas sugere um gradiente hidráulico mais acentuado nessas áreas, o que implica em um movimento da água subterrânea mais rápido através do subsolo. Em contraste, na região central, observa-se um padrão diferente: as isolinhas estão mais afastadas entre si, indicando que o gradiente hidráulico é mais suave. Este espaçamento maior entre as isolinhas na parte central sugere que o fluxo subterrâneo é mais lento nessa área.

Essas observações sobre a velocidade e direção do fluxo subterrâneo não se baseiam apenas na análise das isolinhas de carga hidráulica, essa situação também pode ser observada pelos vetores de fluxo apresentados na Figura 5. Os vetores de fluxo, que representam a direção e a magnitude do movimento da água subterrânea, fornecem uma representação visual adicional que confirma a existência de um fluxo subterrâneo mais rápido nas extremidades leste e oeste da região estudada, e um fluxo mais lento na área central.

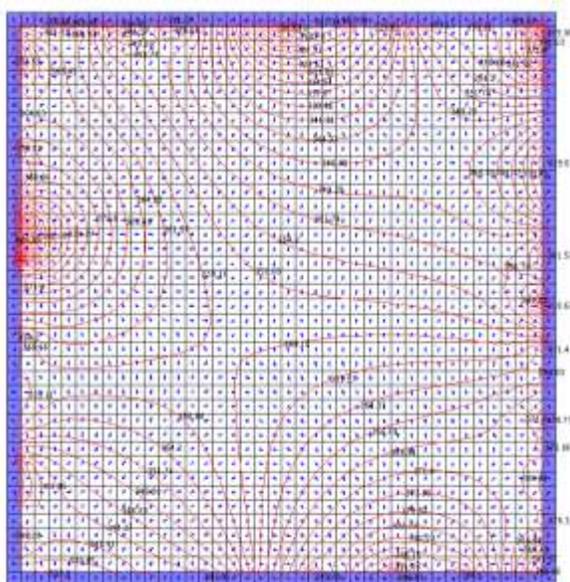


Figura 5 – Isolinhas e vetores do fluxo subterrâneo  
Fonte: Autores (2023)

## 5. Considerações finais

Os resultados obtidos indicam que o MIGH provou ser uma técnica eficaz na calibração da condutividade hidráulica dos aquíferos, possibilitando garantir resultados confiáveis e possam ser usadas com confiança para tomada de decisões e gestão dos recursos hídricos. O método alcançou um valor de RMSEH baixo, o que evidencia a alta precisão na calibração e a adequação da modelagem conceitual em representar a realidade física do aquífero analisado.

Além disso, o software UFC-FLOW mostrou-se uma ferramenta eficiente para a gestão eficiente dos recursos hídricos subterrâneos. Através das isolinhas que o programa fornece, é possível observar não apenas a distribuição da carga hidráulica, mas também identificar os gradientes de carga, ou seja, as variações na intensidade da carga hidráulica ao longo do campo. Ademais, os vetores de fluxo oferece uma compreensão mais completa e detalhada do comportamento hidráulico da região, facilitando a identificação de áreas com diferentes dinâmicas de fluxo subterrâneo.

A metodologia exposta fornece orientações fundamentais para a planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Com um entendimento mais aprofundado e preciso do comportamento dos aquíferos, os gestores podem desenvolver estratégias mais eficazes para mitigar problemas críticos, como a contaminação das águas subterrâneas e o esgotamento dos aquíferos, que são desafios iminentes diante das crescentes demandas por água doce e das alterações climáticas. Além disso, a capacidade de prever e modelar o comportamento dos aquíferos com precisão é indispensável para o desenvolvimento sustentável, garantindo que o uso dos recursos hídricos subterrâneos seja feito de maneira a preservar sua disponibilidade

e qualidade para as gerações futuras. Ademais, destaca-se a necessidade de implementar a metodologia em regiões que apresentam faixa de valores de condutividade hidráulica diferentes daquela utilizada neste trabalho, para que possa ser avaliado a capacidade do software UFC-FLOW em lidar com distintos níveis de condutividade hidráulica.

### Agradecimento

Os autores agradecem à CAPES, à CNPq e à Funcap pela concessão de bolsas de mestrado; à UFC e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (POSDEHA).

### Referências

- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). *Diagnóstico do Município de Brejo Santo*. Fortaleza: CPRM, 2005. Disponível em: [https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15853/1/Rel\\_Brejo%20Santo.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15853/1/Rel_Brejo%20Santo.pdf). Acesso em: 02 de nov. 2023. Fortaleza, 1998.
- CORREA, M.R; LOULA, A.F.D; GARCIA, E.L.M. Métodos de Diferenças Finitas de Direções Alternadas Implícitos para Modelagem de Águas Subterrânea. *Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional*, v. 5, No. 1 (2004), 65-76.
- DANCEY, Christine & REIDY, John. (2005), Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. *Armed*, Porto Alegre.
- ENGELBRECHT, Bruno Zanon; CHANG, Hung Kiang. Simulação numérica do fluxo de águas do sistema aquífero urucuia na bacia hidrogeológica do rio corrente (BA), *Águas Subterrâneas* (2015) 29(2): 244-256.
- FERNANDES, G. D.et al., Estimativa da Vulnerabilidade Natural à Contaminação do Aquífero em Escala Municipal: Estudo de Caso em Panambi/RS *Revista de Geociências do Nordeste*, Caicó, v.6, n.2, (Jul-Dez) p.126-132, 2020.
- FETTER, C.W. Applied Hydrogeology. Upper Sad-dle River, N.J: Prentice Hall, 2001.
- GALVÃO, Paulo; DEMÉTRIO, José Geilson Alves; SOUZA, Eliene Lopes de; BAESSA, Marcus Martins. Modelagem Numérica do Sistema Aquífero Içá-Solimões para Fins de Disponibilidade e Demanda Hídrica da Província Petrolífera de Urucu, Amazonas, Brasil, *Águas Subterrâneas*, v. 37, n. 3, e-30216, 2023.
- 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, 2000.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico –Paraná. 2000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>. Acesso em 25 fev. 2023.
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). *Perfil Socioeconômico do Município de Brejo Santo - 2017*. Fortaleza: IPECE, 2023. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>. Acesso em: 15 dez. 2023.
- LOPES, M. C.; VIEIRA, V. C.; MORGADO, L. G. M.; TAVARES, P. R. L. Caracterização qualitativa da água subterrânea da microbacia hidrográfica do Rio Saco Lobo através do índice relativo de qualidade (IRQ). *Revista observatorio de la economia latino-americana*, Curitiba-PR, v.21, n.10, p. 16079-16093. 2023.
- MCLAUGHIN, D; TOWNLEY, L. R. A reassessment of the ground-water inverse problem. *Water Resources Research*. v. 32, n. 5, p. 1131-1161, 1996.
- PEIXOTO, F. S.; PEREIRA, T. C. Abastecimento e qualidade da água subterrânea no Município de Serra do Mel – RN/Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, Vol. 5, Nº 1(2019).

---

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

Secretaria de Recursos Hídricos (SRH). *Caracterização hidrogeológica do sistema sedimentar do Gráben Crato-Juazeiro, no vale do cariri (CE)*. Fortaleza, 2005.

TAVARES, P. R. L. *Modelagem computacional e calibração da condutividade hidráulica horizontal em aquífero da Bacia Sedimentar do Araripe utilizando o método iterativo do gradiente hidráulico*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2010.