SIMULAÇÃO DO FLUXO HÍDRICO SUBTERRÂNEO POR ESTIMATIVA DE PARÂMETROS USANDO CARGAS HIDRÁULICAS OBSERVADAS: CASO DO CARIRI CEARENSE, BRASIL

SIMULATION OF GROUNDWATER FLOW BY ESTIMATION OF PARAMETERS USING OBSERVED HYDRAULIC HEADS: CASE CARIRI CEARENSE, BRAZIL

Claudio Damasceno de Souza
Engenheiro Civil /// Estudante de doutoramento em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará /// Campus do Pici, CEP-60445-760. Bloco 713. Fortaleza-Ceará /// E-mail: claudioufc@gmail.com

Marco Aurélio Holanda de Castro
Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará /// Campus do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza-Ceará /// E-mail: marco@ufc.br

RESUMO: Esta pesquisa simulou o fluxo hídrico subterrâneo, numa área inserida ao sul do estado do Ceará, englobando as cidades de Juazeiro do Norte, Crato e parte de Barbalha, situadas no vale do Cariri. Para isso foi utilizado o pacote MODFLOW, modelo tridimensional de diferenças finitas do fluxo de água subterrânea, contido no programa Processing MODFLOW Pro. Adicionalmente foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN (Fortran 90 – Compaq Visual Fortran Versão 6.5), que utiliza o método do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA), para fazer a calibração do modelo a partir dos dados observados de carga hidráulica. Os resultados indicam o comportamento do fluxo hídrico subterrâneo na região de estudo para cenários seco e chuvoso. O método de calibração iterativa desenvolvido mostrou-se dependente da quantidade dos dados de nível potenciométrico dos poços e de sua distribuição uniforme na área simulada.

Palavras-chave: agua subterrânea, Cariri, PMWIN.

ABSTRACT: The main objective of this research is to use a computer code to simulate groundwater flow in an area in the south of the state of Ceará situated between the cities of Crato, Juazeiro do Norte and Barbalha, in the "Cariri" Valley. The computer code used was MODFLOW, a 3-D finite difference groundwater flow model. Two different scenarios were simulated: the rainy and the dry season. Besides, a code using the computer language FORTRAN was developed, which proposes an alternative to calibrate the model using hydraulic gradients instead of the usual hydraulic heads as the "objective" functions. The results indicate the behavior of the groundwater flow in the study area for sceneries dry and wet. The iterative method of calibration has proven to be dependent on the amount of data potentiometric level of the wells and its uniform distribution in the simulated area.

Keywords: Groundwater, Cariri, PMWIN.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país rico em recursos hídricos, mas esses recursos não são tão bem distribuídos. O semiárido nordestino é um exemplo dessa má distribuição, com suas altas taxas de evapotranspiração e baixos índices pluviométricos, sofrendo secas freqüentes, em média uma vez a cada década. Para aumentar as dificuldades da região, 85% da área encontra-se sobre rochas cristalinas impermeáveis, onde a água subterrânea pode ser localizada nas fraturas das rochas, mas as vezes de má qualidade e a sua distribuição espacial nessa região se faz de maneira extremamente heterogênea. Assim, o problema social a ser enfrentado correlaciona-se com a escassez de oferta de água e com a ausência de planejamento adequado para o aproveitamento dos aqüíferos.

A região do Cariri, na bacia hidrogeológica do Araripe, é abastecida em quase sua totalidade por água subterrânea, possuindo os melhores sistemas aqüíferos do estado do Ceará (VERÍSSIMO, 1999). As cidades de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha se abastecem de poços tubulares, cacimbões e/ou fontes. O acelerado crescimento da população e da indústria na região tem concorrido para um aumento no consumo de água subterrânea. O uso desordenado e a ausência de medidas de proteção desse manancial levam à necessidade mais urgente de uma definição de regras e critérios para gerenciar tais recursos.

A exploração racional e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos requer que sejam realizadas, antes do uso real desses aqüíferos, simulações que possam nos indicar o comportamento dos aqüíferos quando submetidos aos vários tipos de bombeamento e recarga reais. Tais simulações atualmente são feitas através de Modelos Computacionais Numéricos, os quais exigem um conhecimento preciso de características hidrogeológicas dos aqüíferos, tais como Condutividade Hidráulica (principal característica), Coeficiente de Armazenamento e Retenção específica.

Segundo Schuster e Araújo (2004) a calibração de parâmetros é uma etapa muito importante na modelagem de um sistema aqüífero e consome o maior tempo no procedimento de simulação numérica. Inúmeras técnicas têm sido desenvolvidas e são discutidas nos trabalhos de Yeh (1986), Carrera e Neuman (1986), Carrera (1987), Sun (1994), McLaughin e Towley (1996), Guo e Zhang (2000) e Schuster e Araújo (2004).

A abordagem clássica dos procedimentos de estimação de parâmetros hidrodinâmicos fundamenta-se na minimização, através da técnica inversa dos mínimos quadrados, de uma função objetivo composta pela diferença entre as cargas observadas e calculadas. Esta metodologia está implementada em códigos computacionais, destacando o MODINV (DOHERTY, 1990), MODFLOWP (HILL, 1992), PEST (DOHERTY, 1994) e o UCODE (POETER e HILL, 1998).

No início dos anos 2000, Guo e Zhang (2000) e, depois, Schuster e Araújo (2004) desenvolveram a técnica de estimação de parâmetros hidrodinâmicos baseada na minimização do gradiente hidráulico observado e calculado. Esta foi uma tentativa de abandonar a abordagem clássica na estimação de parâmetros hidrodinâmicos.

A utilização da modelagem computacional serve como ferramenta de apoio e fonte de informações adicionais para o acompanhamento da dinâmica local da área estudada. Como os modelos em outros campos de estudo, os modelos de fluxo em água subterrânea são uma simplificação do sistema real existente. A utilização dos modelos pode dar excelentes resultados na previsão do comportamento dos aqüíferos desde que se tenha o conhecimento adequado das propriedades fundamentais do meio poroso e das iterações entre os processos físicos no sistema de interesse, permitindo assim um planejamento racional do aproveitamento dos recursos hídricos em questão.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho objetiva determinar a modelagem, com o Processing MODFLOW Pro, do comportamento do fluxo de água subterrânea em um sistema de aqüífero no Vale do Cariri englobando as cidades de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha e a realização de um procedimento de calibração do modelo utilizando um método inverso de estimativa de parâmetros a partir do gradiente hidráulico das cargas hidráulicas observadas em campo.

3. METODOLOGIA

A metodologia de estudo para a elaboração desta pesquisa consistiu, primeiramente, na definição de uma área, situada na região do Cariri cearense, para a realização da modelagem do fluxo hídrico subterrâneo com o PMWIN. Esta parte do trabalho relata a

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em outubro de 2012, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em fevereiro de 2013. Este artigo é parte integrante da ***Revista Recursos Hídricos***, Vol. 34, Nº 1, 43-61, maio de 2013.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh34n1-4

definição da área de estudo, dos principais aspectos físicos da região, da aquisição de dados necessários para a simulação e do procedimento com o Processing MODFLOW Pro (PMWIN).

3.1. Definição da área de estudo

A área para o estudo engloba os municípios de Juazeiro do Norte, Crato e parte de Barbalha, mas para uma avaliação hidrogeológica é preciso definir fronteiras mais representativas, embasadas nos contornos hidrográficos da região ou em outras estruturas reconhecidas para uma correta simulação que permitam definir todo domínio de contribuição hidrogeológica.

Assim, este domínio foi delimitado a partir da superposição de mapas dos dados disponíveis, sendo estes: localização dos poços com medições de nível estático e com medições de vazões; e os mapas contendo a topografia, a hidrografia e as definições dos sistemas de aqüíferos da bacia sedimentar do Cariri.
Em termos de coordenadas geográficas a área de pesquisa delimitou-se entre os paralelos 449000 e 481000, de longitude leste, e os meridianos 9185000 e 9216000, de latitude norte, na região sul do estado do Ceará, Região Nordeste do Brasil.
A área engloba, em termos geopolíticos, os municípios de Barbalha, Crato e Juazeiro do Norte. E compreende uma superfície de aproximadamente 493 km2 e um perímetro de 131 km.

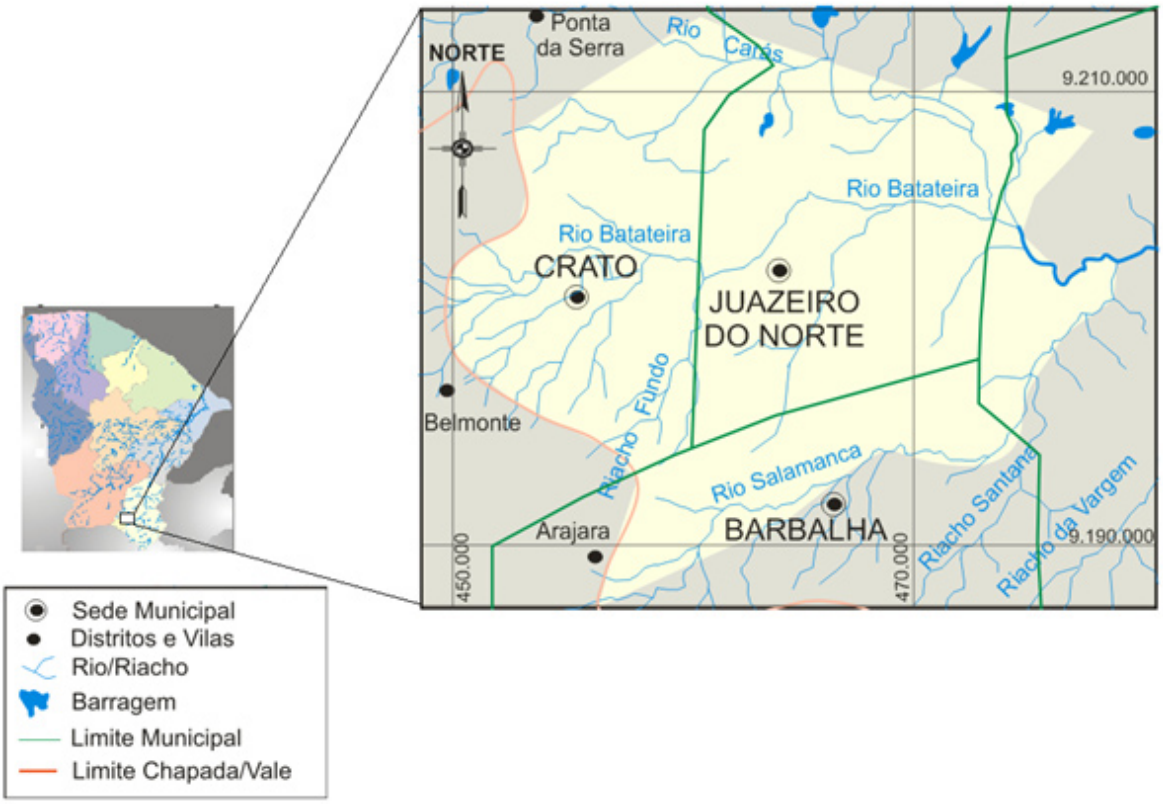

Figura 1 - Localização da área de estudo, ao sul do estado do Ceará, com o contorno destacado em amarelo. Fonte: Modificado da COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do estado do Ceará.

3.2. Descrição da área de estudo

A breve descrição fisiográfica da área de estudo se faz indispensável na metodologia deste trabalho pelo motivo de que esses dados são condições necessárias para a modelagem computacional, tais como a precipitação pluvial e as características geológicas.
O clima na região é o semi-árido, com chuvas concentradas no período de janeiro a abril. A seca estacional ocorre todos os anos, no segundo semestre, aproximadamente de maio a dezembro e faz parte do regime hidrológico da região, e a seca periódica que ocorre de tempos em tempos, impedindo a produção agrícola e prejudicando a pecuária. As temperaturas médias anuais na região de estudo são muito pouco variáveis (entre 24°C e 26°C) (IPLANCE, 1997).
Nesta região, a evapotranspiração potencial apresenta valores elevados, sendo o município de Barbalha o detentor dos maiores índices (1566 mm/ano). De uma maneira geral, observou-se que no período de setembro a dezembro registram-se os maiores valores mensais de evapotranspiração potencial, ao passo que, no período de fevereiro a maio ocorrem os maiores valores mensais de evapotranspiração real (e.g. IPLANCE, 1997; COSTA *et al.* 1998).

3.2.1. Geomorfologia / Geologia

Neste trabalho, seguindo a descrição contida em DNPM (1996, in GOLDER/PIVOT,2005b), optou-se por dividir a Bacia do Araripe em três domínios geomorfológicos distintos: a Zona de Chapada, a Zona de Talude e a Zona de Pediplano, sendo que a nossa área de estudo só engloba os dois últimos domínios geomorfológicos. Seguiu-se essa divisão, pois é mais condizente com os objetivos deste estudo, já que dividimos a área em dois sistemas de aqüífero: inferior e médio. Tendo como limite o sistema de aqüífero médio na Zona de Talude. A zona de talude representa uma unidade de grande importância sob o ponto de vista hidrogeológico: nela ocorrem as principais surgências de água na região (fontes), responsáveis pelo funcionamento da rede de drenagens superficiais que atravessam o Vale do Cariri.
Na zona de pediplano ou depressão sertaneja corresponde a porção de relevos suaves e pouco dissecados, caracterizada por morros alongados entremeados por vales amplos de fundo plano, com cotas médias de aproximadamente 400 metros. Abaixo o mapa geológico da área de trabalho.

3.3. Entrada de Dados do Modelo

O modelo utilizado para simulação do fluxo subterrâneo é o MODFLOW, pacote contido no programa Processing Modflow Pro uma versão avançada do Processing Modflow para Windows. Para a concepção da modelagem, foram adquiridas, em fontes literárias e em órgãos federal e estadual, as informações necessárias para a simulação com o PMWIN.

3.3.1. Malha do modelo

A discretização do modelo é feita em um *grid* em três dimensões onde admitimos as camadas com seus respectivos litotipos. A área do modelo possui dimensões de 32000 x 31000 metros perfazendo uma área de 992 km^2 , sendo 493 km^2 de área ativa. A distribuição horizontal da malha foi discretizada em células retangulares de 320 x 310 metros.
Em profundidade o modelo foi dividido em cinco camadas. Por questões didáticas e de simplificação dividiu-se o sistema aqüífero em dois: aqüífero inferior e médio. Na parte norte, onde se encontra o sistema aqüífero inferior, formação Maurití e parte basal da Formação Brejo Santo, apenas uma camada foi considerada com as características da formação Maurití. Na parte sul, onde se têm o sistema aqüífero médio, a formação Maurití fica na base do sistema aqüífero. Na ordem de baixo para cima, no sistema aqüífero médio, as formações são: Maurití, Brejo Santo, Missão Velha, Abaiara e Rio da Batateira. O nível altimétrico da superfície varia de 399 a 716 metros e da base da última camada de -1299 a -800 metros.

3.3.2. Topografia

Os dados de topografia foram editados a partir dos mapas de curva de nível, fornecidos pela COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do estado do Ceará. Os arquivos fornecidos em CAD, com extensão *.dwg, possuem as curvas de nível de 40 em 40 metros. Foi realizado então um corte selecionando as curvas topográficas que estavam dentro na malha escolhida para o modelo. Em seguida foram alterados os tipos de entidades da curva, com a ferramenta UFC2 desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Essa edição com o UFC2 converteu as curvas de nível de Line para Spline. Em seguida, foi utilizado, um aplicativo denominado de expcurva.lsp, que transformava o arquivo *.dwg em arquivo texto (*.txt) e limitava o número de vértices com dados topográficos em 2000 pontos, uma vez que o pacote do PMWIN, Field Interpolator, que interpola dados para toda área do modelo, restringe os números de pontos para a interpolação.
Os dados para formação das camadas foram coletados de três seções geológicas na área de estudo

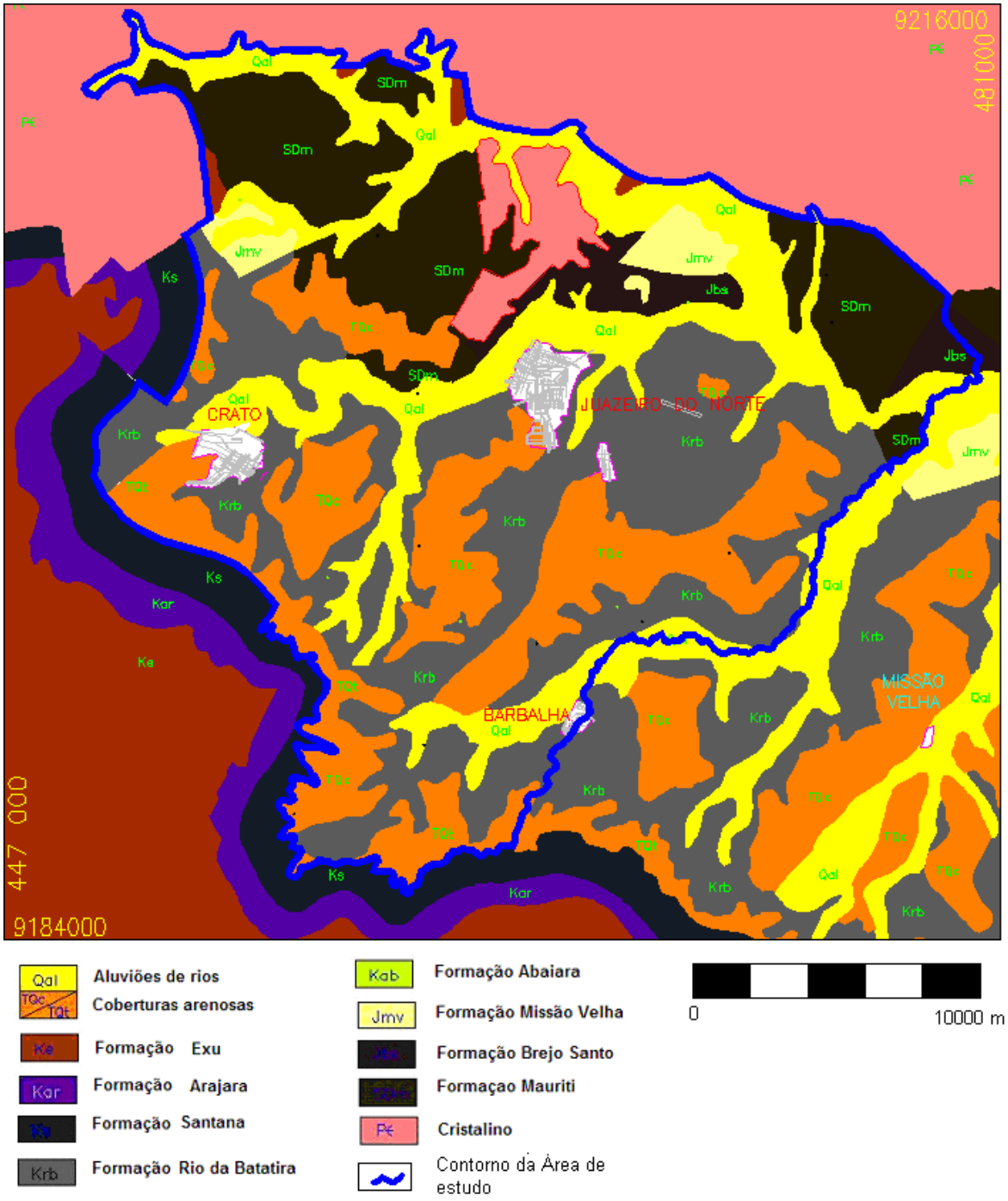

Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005b.

fornecidos pela COGERH, que foram retirados do projeto: *Implantação do Sistema de Monitoramento/ Gestão de uma Área Piloto do Aqüífero Missão Velha, na Bacia Sedimentar do Cariri* onde fizeram uma revisão bibliográfica da geofísica em trabalhos anteriores na área de estudo, não só os relacionados diretamente ao tema (geofísica), mas também outros, principalmente os de cunho estratigráfico, inclusive os perfis litológicos dos poços, de forma a auxiliar a interpretação das sondagens elétricas (SEV's).
O embasamento cristalino foi retirado de um trabalho realizado pelo laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR/UFC) em parceria com a Divisão de Geociências do IBGE, realizado no Vale do Cariri, intitulado: Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D.

3.3.3. Poços

Os poços da região foram fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Com os arquivos em forma de planilha contendo informações de poços de toda a região do Cariri, foi necessário realizar então uma triagem com os dados de nível estático e também com os dados de vazões dos poços.
Foi considerada uma média de 16 horas de bombeamento para os poços públicos e 8 horas de bombeamento para os poços privados.
Na região de talude, entre o vale e a chapada, considerou-se como condição de contorno as nascentes que afloram no pé da chapada, e como não existe um pacote de fluxo específico pra este caso utilizamos o pacote Well do PMWIN para simular água injetada no sistema Aqüífero Médio. Este valor de drenança é de $2{,}0 \times 10^6$ m^3/ano para o sistema Aqüífero Médio (Kimura, 2003).

3.3.4. Rio Salamanca e rio Batateira

O rio Salamanca é uma das condições de contorno, limitando toda a área estudada na porção leste. Já o rio Batateira está inserido dentro da área de estudo sendo então necessário conhecer as características hidráulicas destes rios. Os dados utilizados neste trabalho foram baseados na observação dos rios da região e em trabalhos anteriores.
Para a entrada no pacote River do PMWIN, são necessários cinco dados: a condutância hidráulica do leito do rio, a carga hidráulica do rio, a elevação do fundo do rio, a largura do rio e a espessura do leito do rio. Os valores do nível de água no leito dos rios, em relação ao fundo, variam de 2 a 3 metros. A condutância hidráulica do leito do rio foi de 10^{-5} m/s, valor compatível com outros estudos efetuados em regiões semi-áridas, segundo relatório final do "*Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aqüífero Açu, Rio Grande do Norte*", desenvolvido através do Programa de Água Subterrânea no Nordeste do Brasil (PROASNE).

3.3.5. Recarga

Para a simulação do modelo foi determinada a recarga através do balanço hídrico da região a partir dos dados pluviométricos dos postos Crato (latitude 07º 13' S, longitude 39º 23' W, altitude 421 m) e Juazeiro do Norte (latitude 07º 23' S, longitude 39º 23' W, altitude 650 m), que foram editados por uma rede cooperativa de pesquisa denominada: "*Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro*", nas respectivas cidades. Neste balanço tem-se como resultado uma infiltração efetiva de aproximadamente 108.7 mm/ano em Juazeiro do Norte e 281.3 mm/ano em Crato.
Os dados resultantes do balanço hídrico executado, a partir dos dados de precipitação de 23 anos situados no período entre 1962 e 1987, eliminando as falhas, constam na Tabela 1.

3.3.6. Características Hidráulicas e Físicas do Aqüífero

Em termos hidrogeológicos, para os sistemas de aqüífero Médio e Inferior, as formações Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, e Maurití comportam-se, de modo geral, como unidades aqüíferas (DNPM, 1996), enquanto a formação Brejo Santo se comporta predominantemente como aqüitardo (*e.g.* KIMURA, 2003). Assim a divisão hidrogeológica da bacia é feita da seguinte maneira:

- Sistema de Aqüífero Médio (formações Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha) -± 500 m de espessura.
- Aqüitardo Brejo Santo - ± 400 m de espessura; e,
- Sistema de Aqüífero Inferior (formação Maurití e parte basal da formação Brejo Santo) - ± 60 a 100 m de espessura.

Na Tabela 2 é mostrado os parâmetros hidrogeológicos adotados da literatura.

3.3.7. Calibração

Para a calibração ser realizada pelo pacote PEST contido no PMWIN é necessário o conhecimento prévio do zoneamento das condutividades hidráulicas, e não

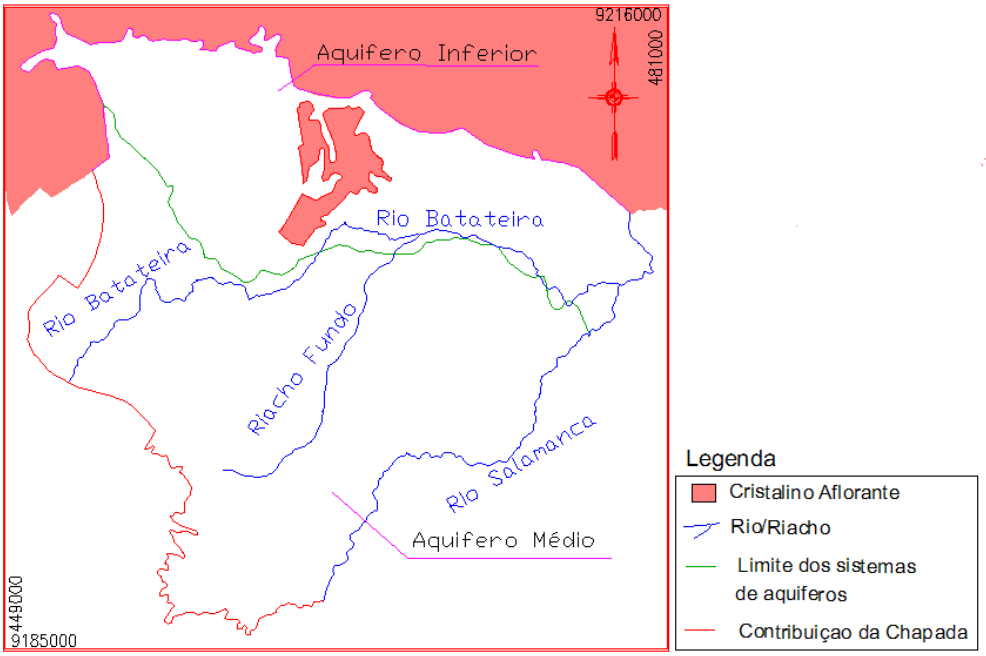

Figura 3 - Área de estudo delimitada pelos contornos utilizados no modelo conceitual. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005b.

Tabela 1 - Valores do balanço hídrico dos postos de Crato e Juazeiro do Norte.

	Juazeiro do Norte	Crato
Precipitação (mm)	918.60	1155.60
Evapotranspiração potencial (mm)	1524.30	1444.30
Evapotranspiração Real (mm)	709.90	755.70
Infiltração Efetiva (mm)	108.70	281.30

Tabela 2 - Parâmetros Hidrogeológicos para as unidades hidroestratigráficas que compõem os sistemas aqüíferos da área de trabalho. Fonte: (1)SUDENE (1967); (2)DNPM (1996); (3)IPLANCE (1997); (4)DOMENICO & SCHWARTZ (1997); (5)ANJOS (2000); (6)MENDONÇA (2001); (7)KIMURA (2003).

Unidade	Condutividade Hidráulica K (m/s)	Armazenamento específico-S_s (1/m)	Coef. armazen. efetivo S_y	Porosidade efetiva	Porosidade total
Rio da Batateira	$4.17x10^{-6}$ a $6.90x10^{-6}$ [6]	$1.0x10^{-7}$ [6]	$2.0x10^{-4}$ [2] a $8.0x10^{-3}$ [3]	0.1 [2]	0.32 a 0.48 [7]
Abaiara	$1.6x10^{-5}$ a $5.0x10^{-5}$ [2]	$1.0x10^{-7}$ [6]	$2.0x10^{-4}$[2] a $8.0x10^{-3}$ [3]	0.1 [2]	0.32 a 0.48 [7]
Missão Velha	$1.6x10^{-5}$ a $5.0x10^{-5}$ [2]	$1.0x10^{-7}$ [6]	$2.0x10^{-4}$ [2] a $8.0x10^{-3}$ [3]	0.1 [2]	0.32 a 0.48 [7]
Brejo Santo	$1.0x10^{-11}$ a $4.7x10^{-9}$ [7]	$1.3x10^{-3}$ [7]	0.01 a 0.18 [7]	0.005 a 0.05 [4]	0.45 a 0.55 [7]
Mauriti	$4.0x10^{-6}$ [2]	-	$1.0x10^{-4}$ [2]	0.02 [2]	0.1 a 0.2 [7]

se dispões desta informação, por isso foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN (Fortran 90 – Compaq Visual Fortran Versão 6.5), pelo método do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA), para se fazer a calibração a partir dos dados observados de carga hidráulica. Este método foi desenvolvido por Schuster (2002) para um projeto de consultoria. O exemplo de validação do método encontra-se na figura 4.

O exemplo foi aplicado a um modelamento estacionário de um estudo de caso hipotético aplicada em um aqüífero aluvial não confinado, isotrópico e heterogêneo constituído por 4 zonas de condutividade hidráulica diferentes (Figura 4 à esquerda) (K_1=1x10^{-3} m/s, K_2=4.9x10^{-3} m/s, K_3=5x10^{-4} m/s, K_4=9.9x10^{-5} m/s). Porosidade efetiva é 0.1. Domínio discretizado em 42 células na direção x e 27 células na direção y com dimensões constantes de Δx=Δy=100 m. Total de 1134 células, onde apenas 764 células são ativas. As condições de contorno do modelo são:

- Na parte Norte encontra se um rio com uma condutividade hidráulica do leito do rio de K_{rio}=1.3x10^{-7} m/s;
- Contribuição da fronteira montanhosa de Q=0.012 m^3/s distribuído em 30 células, na parte Oeste;
- Na parte Sul fronteira impermeável;
- Contorno no lado Leste é do tipo carga hidráulica especificada com h=23 m;
- Dois poços estão bombeando com as respectivas taxas de W_1=0.02 m^3/s e W_2=0.015 m^3/s;
- Recarga média anual de R=5x10^{-9} m/s distribuída uniformemente;
- São instalados 22 poços de observação e com os dois de bombeamento, o número de observações dos níveis de água é 24.

Para fazer a calibração pelo pacote PEST contido no Processing Modflow Pro (Wen-Hsing Chiang, 2005) seria necessário conhecer o zoneamento como na figura 4. O MIGHA faz a mesma calibração, com a vantagem de não ser necessário conhecer esse zoneamento, a partir de uma matriz de cargas observadas obtidas dos poços observados em campo.

O MIGHA diferentemente do PEST faz o ajuste tanto das cargas hidráulicas quanto do fluxo, já que se baseia na minimização das diferenças de gradientes hidráulicos. O que fornece equações com independência espacial, tornando o problema da otimização multidimensional (PEST) em um problema que pode ser resolvido através de múltiplos procedimentos simultâneos de otimização unidimensional.

O gradiente hidráulico $\nabla \boldsymbol{h}$ é calculado em cada ponto ($\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$):

na direção $\boldsymbol{x}$:

$$\nabla h_x(x_i, y_i) = \left(\frac{h(x_{i+1}, y_i) - h(x_{i-1}, y_i)}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right) \qquad (1)$$

na direção y:

$$\nabla h_y(x_i, y_i) = \left(\frac{h(x_i, y_{i+1}) - h(x_i, y_{i-1})}{y_{i+1} - y_{i-1}} \right) \qquad (2)$$

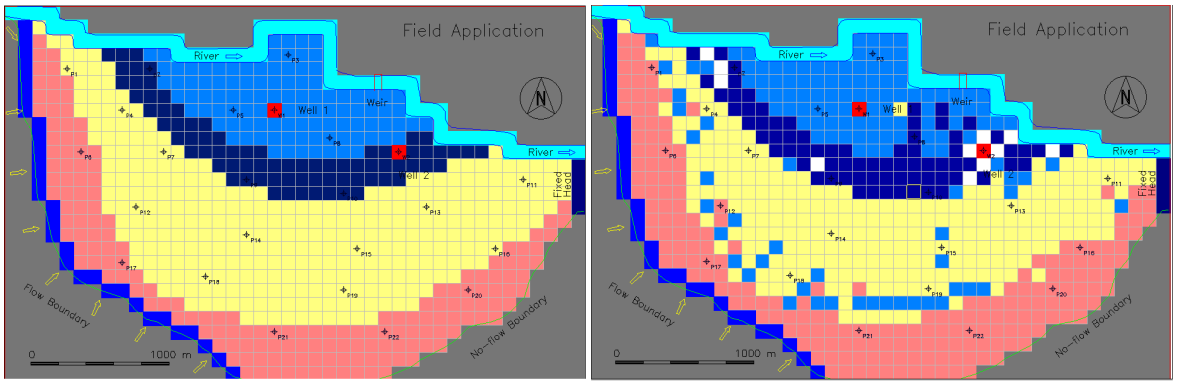

Figura 4 - Zoneamento da área com as respectivas condutividades hidráulicas e os contornos do modelo (á esquerda) e o zoneamento depois do processo de calibração pelo MIGHA (à direita).

O módulo do gradiente hidráulico, $|\nabla h|$, obtém-se pela expressão:

$$|\nabla h| = \sqrt{\nabla h_x^2 + \nabla h_y^2} \qquad (3)$$

O critério de convergência é avaliado pela diminuição da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) e da diminuição da média do somatório dos ângulos formados entre os vetores dos gradientes hidráulicos observados ($\nabla h^{i\,obs}$) e calculados ($\nabla h^{i\,calc}$).

$$\phi_j = \arccos\left(\frac{\nabla h_j^{i\,obs} \cdot \nabla h_j^{i\,calc}}{\left|\nabla h_j^{\,obs}\right| \cdot \left|\nabla h_j^{\,calc}\right|}\right) \qquad (4)$$

$$RMSEH = \left[\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left(h^{obs} - h^{calc}\right)_i^2\right]^{1/2} \qquad (5)$$

onde M é o numero de células ativas e h^{obs} é a carga hidráulica observada e h^{calc} carga hidráulica calculada na célula i no respectivo ciclo de iteração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram simulados 3 cenários visando a caracterização do fluxo da água subterrânea no período chuvoso e no período seco. Uma simulação em regime permanente no período chuvoso e duas simulações em regime transiente nos períodos chuvoso e seco.

A primeira simulação, em regime estacionário, usou-se considerando a evapotranspiração, ou seja, recarga pela infiltração efetiva no período chuvoso. A segunda simulação em regime transiente foi feita no período chuvoso considerando os dados pluviométricos de dezembro a maio e a terceira simulação no período seco com os dados pluviométricos de junho a novembro.

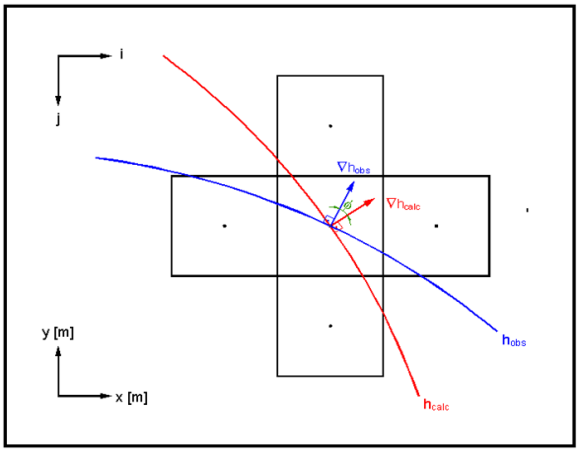

Figura 5 - Ângulo entre os vetores dos gradientes hidráulicos calculados e observados.

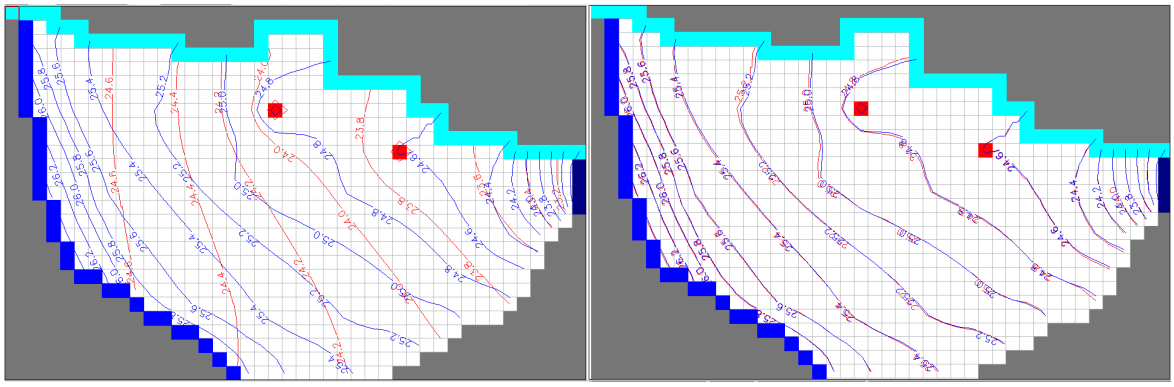

Figura 6 - Linhas potenciométricas observadas (medidas) em azul e calculadas (simuladas) em vermelho, iteração número 1(à esquerda) e linhas potenciométricas observadas (medidas) em azul e calculadas (simuladas) em vermelho, iteração número 39, usando MIGHA (á direita).

Simulação 1 – Fluxo da água subterrânea em regime permanente no período chuvoso

A Simulação 1 realizada em regime permanente tem suas características mostradas na tabela.

Esta simulação apresentou linhas equipotenciais variando de 337.32 m a 453.44 m ao longo do aqüífero, como mostrado na Figura 7, com um gradiente médio de 4.71 x 10^{-3} m/m. E velocidade média para cada camada mostrada na Tabela 4.

Tabela 3 - Características da simulação 1.

Parâmetros	Valores	
Condutividade Hidráulica (K)	Camada 1	Aquífero inferior - $9x10^{-6}$ m/s
		Aquífero médio - $5x10^{-6}$ m/s
	Camada 2	$1x10^{-5}$ m/s
	Camada 3	$1x10^{-5}$ m/s
	Camada 4	$1x10^{-10}$ m/s
	Camada 5	$4x10^{-6}$ m/s
Porosidade Efetiva	Camada 1	Aquífero inferior - 0.02
		Aquífero médio - 0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Infiltração Efetiva	283 mm	

Tabela 4 - Velocidades médias das camadas para estado estacionário chuvoso.

	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Velocidade Média	6.28 cm/dia	3.69 cm/dia	3.16 cm/dia	0.0407 cm/dia	1.08 cm/dia

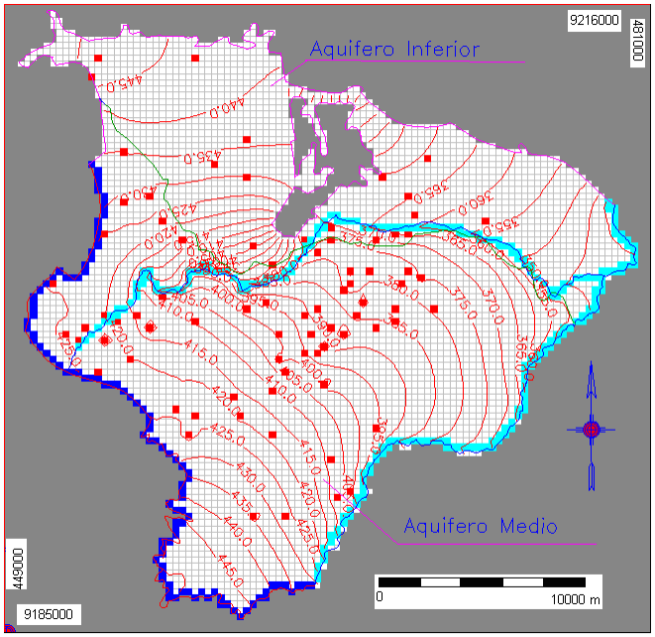

Figura 7 - Variação das linhas equipotenciais, de 5.0 em 5.0 metros, para a Simulação 1. *Simbologia*: Cursos d'água; Poços em uso; Contribuição da Chapada; Células inativas do modelo; ~~~ Divisão dos sistemas aqüíferos.

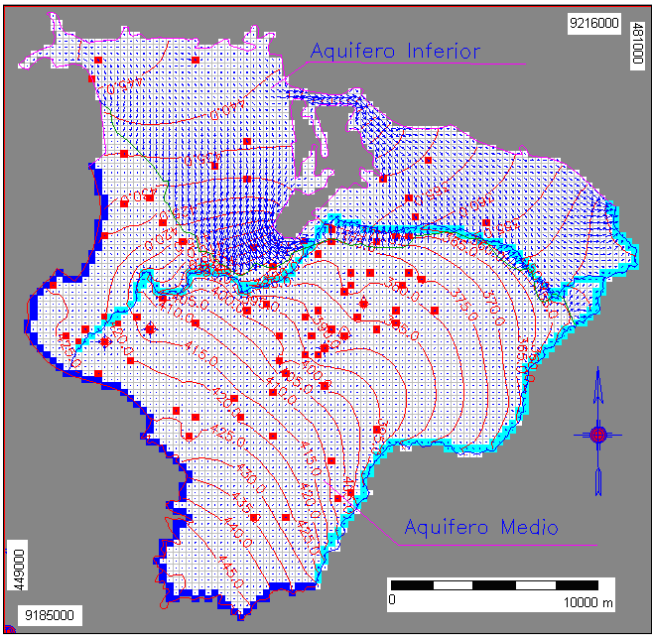

Figura 8 - Fluxo na camada superior para a Simulação 1. *Simbologia*: Cursos d'água; Poços em uso; Contribuição da Chapada; Células inativas do modelo; ~~~ Divisão dos sistemas aqüíferos. ↓ Vetor de Fluxo.

Simulação 2 – Fluxo da Água Subterrânea em Regime Transiente no Período Chuvoso

A Simulação 2 foi realizada em regime transiente para avaliar o comportamento do aquífero durante o período chuvoso, e suas características estão mostradas na tabela 5.
Esta simulação apresentou linhas equipotenciais variando de 337.34 m a 461.84 m ao longo do aquífero, como mostrado na Figura 9, com um gradiente médio de 5.05 x 10^{-3} m/m. E velocidade média para cada camada mostrada na Tabela 6.
Era esperado que os resultados da Simulação 1 e 2 fossem semelhantes, já que os dados de entrada foram os mesmos, mudando-se apenas o regime de escoamento. Comparando as duas simulações podemos perceber uma diferença entre as linhas potenciométricas e entre os gradientes de velocidades, isso pode ser explicado pelos valores de armazenamento específico, não muito confiáveis, utilizados na Simulação 2.

Simulação 3 – Fluxo da Água Subterrânea em Regime Transiente no Período Seco

A Simulação 3 foi realizada em regime transiente e suas características estão na tabela abaixo:
Esta simulação apresentou linhas equipotenciais variando de 337.33 m a 444.78 m ao longo do aquífero, como mostrado na Figura 11, com um gradiente médio de 3.69 x 10^{-3} m/m. E velocidade média para cada camada mostrada na Tabela 8.

4.1. Calibração

Com os dados disponíveis de duas fontes diferentes (COGERH e CPRM) foi possível obter as linhas potenciométricas observadas. Após se avaliar o comportamento do aqüífero com os dados disponíveis da área fez-se uma tentativa de calibrar o modelo. Por não possuir dados de testes de bombeamento distribuídos em toda área pra que fosse possível elaborar os contornos da condutividade hidráulica, resolveu-se utilizar um método de calibração que leva em conta o gradiente hidráulico. Como citado, nos exemplos de validação o método mostrou-se eficiente e vantajoso.
Com os dados disponíveis foram geradas as linhas potenciométricas observadas a partir da distribuição dos níveis estáticos observados. Com os dados fornecidos pela COGERH conseguiu-se um total de 76 poços com nível estático e da CPRM apenas 12 poços na área de estudo. Abaixo têm se o mapa gerado pelos dados da COGERH.
Primeiramente utilizou-se os dados da COGERH por serem em maior quantidade e melhor distribuídos na área e o resultado da raiz do erro quadrático médio variaram entre 49.35 metros no inicio do processo iterativo até 329.58 metros na iteração 15.
Com esses resultados pode-se ver que não foi possível calibrar o modelo com os dados observados. Uma explicação para o fato é que os dados fornecidos pela COGERH foram coletados em campanhas diferentes e com diferença de 2 anos de coleta (2001 e 2002). E ao longo do ano os níveis estáticos variam muito, além do que a distribuição e a quantidade destes poços é muito pequena comparada com a área de trabalho.
Apesar de não ter conseguido resultados satisfatórios com os poços da COGERH tentou-se fazer a calibração com a bateria de 12 poços (CPRM), com medições feitas em quatro campanhas entre os anos de 2005 e 2006, devido à freqüência nessas medições e serem mais confiáveis. Os valores da raiz do erro quadrático médio foram melhores do que a tentativa anterior de calibração, mas mesmo assim não satisfatórios. A média dos ângulos φ (formado pelo vetor do gradiente hidráulico calculado e observado) chegou a um mínimo de 34.36 graus e a variância 74.47 m.
Alcançaram-se resultados melhores com a utilização de apenas 12 poços devido serem mais confiáveis e medidos em campanha regulares sem intervalos muito grandes como observamos nos dados da COGERH. Há uma impressão da convergência do modelo, mas com as condutividades hidráulicas obtidas na iteração 7 não foi possível rodar o modelo no PMWIN-Pro, devido os valores de condutividade hidráulica serem irreais pra a região.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados das simulações dos cenários no período chuvoso e seco disponibilizam dados sobre o comportamento do aqüífero e dão uma idéia da utilização dos recursos hídricos na área.
Apesar dos dados disponíveis e o modelo não conter todos os poços em funcionamento com os respectivos tempos de bombeamento diário, o modelo simulado mostra o comportamento do aquífero e a coerência do fluxo na direção do exultório dos rios da região, além de dar uma idéia na velocidade do fluxo em todas as camadas.
A diferença entre os resultados das simulações e os níveis potenciométricos obtidos dos níveis estáticos medidos em campo mostra que é necessário um melhor monitoramento e um planejamento prévio para a obtenção dos dados de campo. Assim os resultados serão mais fiéis à realidade.

Tabela 5 - Características da Simulação 2.

Parâmetros	Valores	
Condutividade Hidráulica (K)	Camada 1	Aqüífero inferior – $9x10^{-6}$ m/s
		Aqüífero médio – $5x10^{-6}$ m/s
	Camada 2	1×10^{-5} m/s
	Camada 3	1×10^{-5} m/s
	Camada 4	1×10^{-10} m/s
	Camada 5	4×10^{-6} m/s
Porosidade Efetiva	Camada 1	Aqüífero inferior – 0.02
		Aqüífero médio – 0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Armazenamento Específico	Camada 1	1×10^{-7} 1/m
	Camada 2	1×10^{-7} 1/m
	Camada 3	1×10^{-7} 1/m
	Camada 4	1.3×10^{-3} 1/m
	Camada 5	1×10^{-4} 1/m
Coeficiente de Armazenamento	Camada 1	Aqüífero inferior – 1×10^{-4}
		Aqüífero médio – 2×10^{-4}
	Camada 2	2×10^{-4}
	Camada 3	2×10^{-4}
	Camada 4	1×10^{-2}
	Camada 5	1×10^{-4}
Duração (tempo)	180 dias	
Infiltração Efetiva	283 mm	
Regime de Escoamento	Transiente	
Resultado	Após 180 dias	

Na tentativa de se calibrar o modelo com um novo método de calibração inversa foi aplicado e desenvolvido um programa em linguagem de programação FORTRAN. Essa tentativa de calibração do modelo da área de estudo não apresentou resultados satisfatórios devido à má distribuição espacial e falta de confiabilidade dos dados disponíveis; mas o programa que utiliza o método do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA), para fazer a calibração a partir de gradientes hidráulicos observados, mostrou pelos exemplos de validação (mostrado apenas um aqui) que é aplicável desde que se tenha dados de cargas hidráulicas bem distribuídos e confiáveis e em quantidade representativa da área.

Entre as sugestões para a calibração e refinamento desse modelo são necessários os seguintes procedimentos:

- Coletar dados altimétrico do fundo e do nível de água do rio Batateira e Salamanca, além da vazão destes corpos de água;
- Monitorar o nível estático e dinâmico, assim como o tempo de utilização e a vazão dos poços, em pelo menos duas campanhas, uma no período seco e outra no período chuvoso;
- Instalar postos pluviométricos distribuídos na região e determinação do zoneamento do solo para melhor quantificação da evapotranspiração;
- Instalar infiltrômetros e tensiômetros regularmente distribuídos em toda a área de modo a determinar com maior precisão a recarga.

Tabela 6 - Velocidades médias das camadas para estado transiente no período chuvoso.

	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Velocidade Média	6.47 cm/dia	4.09 cm/dia	3.48 cm/dia	0.0672 cm/dia	9.16 cm/dia

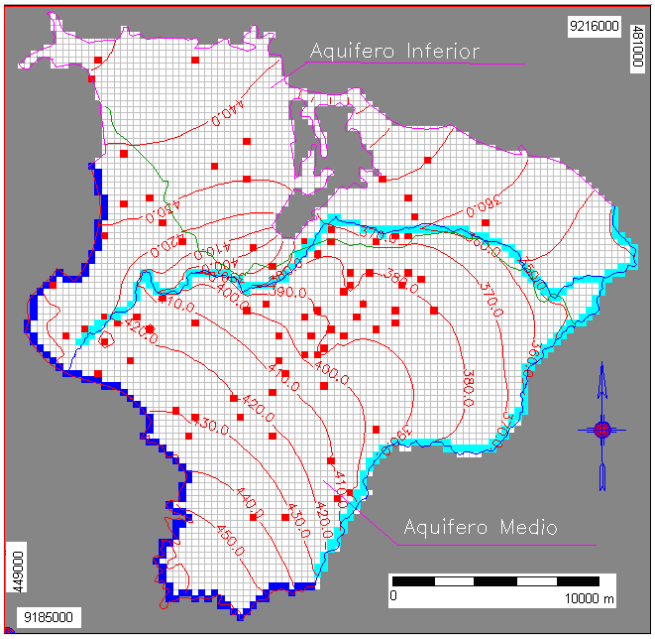

Figura 9 - Variação das linhas equipotenciais, de 10.0 em 10.0 metros, para a Simulação 2. *Simbologia*: Cursos d'água; Poços em uso; Contribuição da Chapada; Células inativas do modelo; Divisão dos sistemas aqüíferos.

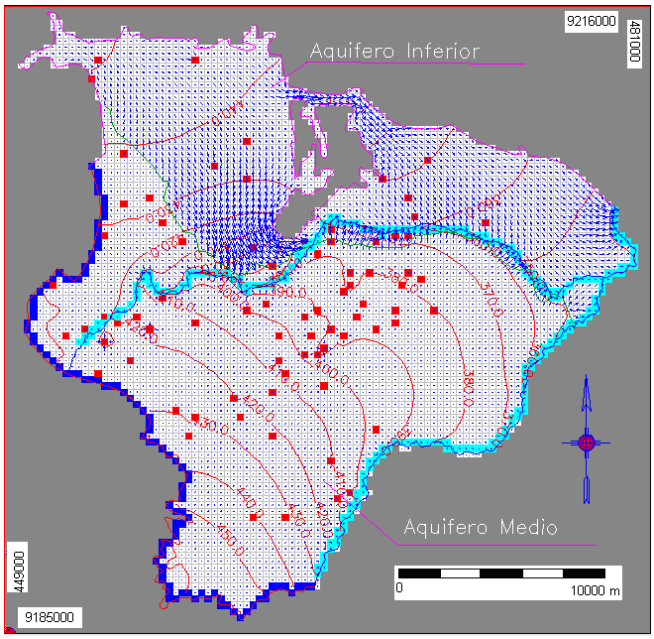

Figura 10 - Fluxo na camada 1, e curvas potenciométricas de 10.0 em 10.0 metros, para a Simulação 2. *Simbologia*: Cursos d'água; Poços em uso; Contribuição da Chapada; Células inativas do modelo; Divisão dos sistemas aqüíferos. Vetor de Fluxo.

Tabela 7 - Características da Simulação 3.

Parâmetros	Valores	
Condutividade Hidráulica (K)	Camada 1	Aqüífero inferior – $9x10^{-6}$ m/s
		Aqüífero médio – $5x10^{-6}$ m/s
	Camada 2	1×10^{-5} m/s
	Camada 3	1×10^{-5} m/s
	Camada 4	1×10^{-10} m/s
	Camada 5	4×10^{-6} m/s

(continua na próxima página)

Tabela 7 - Características da Simulação 3 (continuação da página anterior).

Porosidade Efetiva	Camada 1	Aqüífero inferior – 0.02
		Aqüífero médio – 0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Armazenamento Específico	Camada 1	1×10^{-7} 1/m
	Camada 2	1×10^{-7} 1/m
	Camada 3	1×10^{-7} 1/m
	Camada 4	1.3×10^{-3} 1/m
	Camada 5	1×10^{-4} 1/m
Coeficiente de Armazenamento	Camada 1	Aqüífero inferior – 1×10^{-4}
		Aqüífero médio – 2×10^{-4}
	Camada 2	2×10^{-4}
	Camada 3	2×10^{-4}
	Camada 4	1×10^{-2}
	Camada 5	1×10^{-4}
Duração (tempo)	180 dias	
Infiltração Efetiva	11 mm	
Regime de Escoamento	Transiente	
Resultado	Após 180 dias	

Tabela 8 - Velocidades médias das camadas para estado transiente no período seco.

	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Velocidade Média	5.48 cm/dia	4.09 cm/dia	2.46 cm/dia	0.0675 cm/dia	9.16 cm/dia

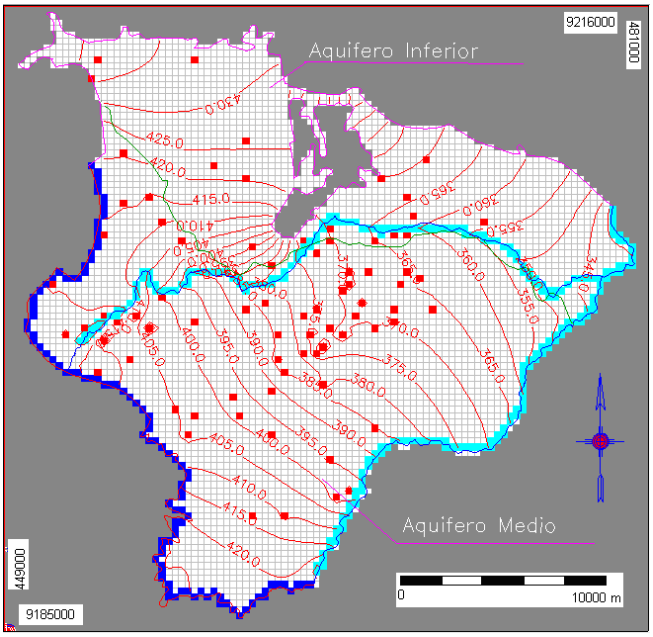

Figura 11 - Variação das linhas equipotenciais, de 10.0 em 10.0 metros, para a Simulação 3. *Simbologia*: Cursos d'água; Poços em uso; Contribuição da Chapada; Células inativas do modelo; ~~~ Divisão dos sistemas aqüíferos.

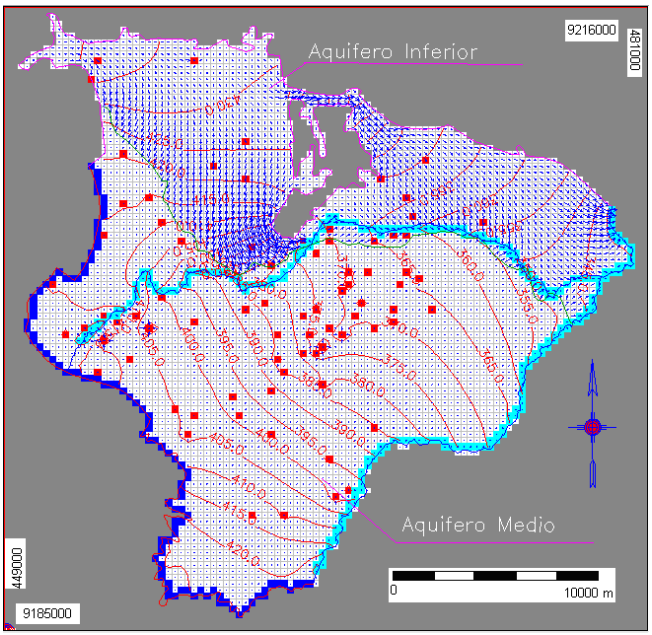

Figura 12 - Fluxo na camada 1, e curvas potenciométricas de 5.0 em 5.0 metros, para a Simulação 3. Simbologia: Cursos d'água; Poços em uso; Contribuição da Chapada; Células inativas do modelo; ~~~ Divisão dos sistemas aqüíferos. ↓ Vetor de Fluxo.

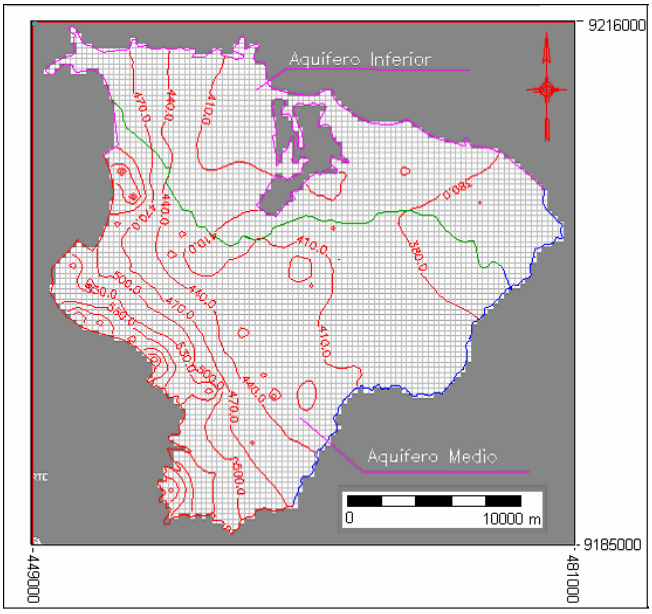

Figura 13 - Linhas potenciométricas de 20 em 20 m, geradas a partir do nível estático de 76 poços com dados fornecidos pela COGERH.

BIBLIOGRAFIA

ANJOS, F.T. (2000). Estudo Hidrogeológico do Aqüífero Rio da Batateira e Caracterização da Possibilidade de Abastecimento d'água nos Municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha - CE, no ano de 2020. Centro de Tecnologia e Geociencias, Universidade Federal do Ceará.

CARRERA, (1987). 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.: 549-585.

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

CHIANG, Wen-Hsing. (2005). A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes, 2nd ed., XXV, 397 p

COSTA, W. D.; NETO, M. S. C. C.; SOUZA, F. J. A. (1998). Plano de Gestão da APA da Chapada do Araripe - CE/PE/PI - Estudos dos Recursos Hídricos. FUNDETEC, 99 p.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. (1996). Programa Nacional de Estudos dos Distritos Mineiros: Projeto Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Recife: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Distritos Regionais Pernambuco e Ceará. 101 p.

DOHERTY, J. MODINV. (1990). Townsville, Autralia: Australian Center for Tropical Fresh-Water Resources.

DOHERTY, J. PEST. (1994). Corinda, Australia: Watermark Computing.

DOMENICO, P. A. & Schwartz, W. (1997). Physical and Chemical Hidrogeology. 2 ed. New York: John Wiley & Sons. 506 p.

GOLDER/PIVOT. (2005). Implantação do Sistema de Monitoramento/Gestão de Uma Área Piloto do Aqüífero Missão Velha na Bacia Sedimentar do Cariri, no Estado do Ceará. Relatório Final do Projeto. IX volumes.

GUO, X; ZHANG, C.-M. (2000). Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions. Ground Water. v. 38, n. 6, p. 815-826.

HILL, M. C. (1992). A computer program (MODFLOWP) for estimation parameters of a transient, three-dimensional groundwater flow model using nonlinear regression. USGS Open-File Report 91-484.

IPLANCE – Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. (1997). Atlas do Ceará. Governo do Estado do Ceará. Secretaria do Planejamento e Coordenação – SEPLAN. 65 p.

KIMURA, G. (2003). Caracterização Hidrogeológica do Sistema Sedimentar do Gráben Crato-Juazeiro, no Vale do Cariri (CE). Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, 198 p.

MCLAUGHIN, D; TOWNLEY, L. R. (1996). A reassessment of the ground-water inverse problem. Water Resources Research. v. 32, n. 5, p. 1131-1161.

MENDONÇA, L. A. R. (2001). Recursos Hídricos da Chapada do Araripe. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Tese de Doutorado, Fortaleza, 193 p.

POETER, E. P.; HILL, M. C. (1998). Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modeling. USGS WRI 98-4048.

PONTE, F. C. & PONTE-FILHO, F. C. (1996). Estutura Geológica e Evolução Tectônica da Bacia do Araripe. Recife. DNPM, 68 p.

SCHUSTER, H. D. M. (2002). Modelagem Matemática do Uso Conjunto das Águas Superficiais e Subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Femeas – Bahia. - Projeto de gerenciamento integrado das atividades na bacia do São Francisco – Ana/GEF/PNUMA/OEA,Salvador-BA, 59 p.

SCHUSTER, H. D. M.; ARAÚJO, H. D. B. (2004). Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aqüífero. RBRH – Revista brasileira de recursos hídricos. Volume 9, no 2: 31-37.

SUDENE. (1967). Estudo geral de base do Vale do Jaguaribe. Recife, Série Hidrogeologia 7, 245 p.

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

VERISSIMO, L. S. (1999). A importância das Águas Subterrâneas para o Desenvolvimento Socioeconômico do Eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental - Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. UFC. 140p.

YEH, W. W.-G. (1986). Review of parameter identification procedure in groundwater hydrology: Inverse problem. Water Resources Research, v. 22, n. 2, p. 95-108.