

Modelagem do Fluxo Subterrâneo na Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba como Subsídio à Gestão de Recursos Hídricos

Marcondes Loureiro de Carvalho Batista, Janiro Costa Rego, Márcia Maria Rios Ribeiro

José do Patrocínio Tomaz Albuquerque

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

marcondesloureiro@gmail.com, janiro@dec.ufcg.edu.br, mm-ribeiro@uol.com.br, patrociniotomaz@uol.com.br

Recebido: 26/09/10 - revisado: 06/04/11 - aceito: 01/07/11

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi de estabelecer um modelo matemático que representasse o comportamento hidrogeológico em parte da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba, no estado da Paraíba, para subsidiar a gestão conjunta de águas superficiais e subterrâneas. Através do modelo matemático foi simulado o comportamento hidrogeológico do aquífero e obtidos um diagnóstico da situação atual do aquífero confinado, o volume de descarga natural do subsistema e a vazão de exploração pelos poços. A simulação da intrusão salina levou ao estabelecimento de um critério de outorga de águas subterrâneas. Os resultados mostraram que o aquífero encontra-se em intensa exploração e que medidas de Gestão de Recursos Hídricos devem ser tomadas para evitar comprometimento dos aspectos qualitativos e quantitativos das águas subterrâneas na bacia.

Palavras-chave: águas subterrâneas, modelagem conceitual e matemática, gestão de recursos hídricos.

INTRODUÇÃO

A crescente procura pelos recursos hídricos tem provocado o constante aumento do uso da água subterrânea. Por sua vez, a exploração desordenada e descontrolada desses recursos pode levar a vários problemas ambientais, tais como o comprometimento das vazões de base de cursos d'água superficiais, a subsidências de terrenos, intrusão salina em aquíferos costeiros, etc.

A Lei nº 9.433/97 (BRASIL, 1997), ao considerar a água um bem de domínio público, introduziu a necessidade da outorga de direito de uso de recursos hídricos. A Resolução nº 16/01 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2001) dispõe que a extração de água de aquífero para consumo final ou insumo de processo produtivo deve ser outorgada. Para isso, deve-se ter bom conhecimento do comportamento hidrogeológico dos aquíferos.

A Resolução CNRH nº 92/08 estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro (CNRH, 2008). Essa resolução afirma que, para a exploração das águas subterrâneas, os órgãos gestores deverão promover estudos hidrogeológicos para a compreensão do comportamento do aquífe-

ro, com identificação das áreas de recarga, definição de zonas de proteção do aquífero e avaliação das potencialidades, disponibilidades e vulnerabilidade de suas águas subterrâneas (art.2º).

Segundo a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs, 2008), o que se utiliza atualmente como critério de outorga para água subterrânea é a vazão de teste de poço. O critério "potencial", definido como a capacidade de recarga do aquífero, não é utilizado assim como não são adotados outros critérios inerentes à exploração das águas subterrâneas, tais como: rebaixamentos máximos permissíveis, raio de influência, vulnerabilidade, etc.

Com o objetivo de subsidiar a gestão das águas subterrâneas, estão sendo realizados estudos na região do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, Estado da Paraíba (ASUB, 2010), a qual apresenta a maior parte do seu subsolo formado por rochas sedimentares constituintes da denominada Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba. Nessa bacia ocorrem formações aquíferas que são intensamente exploradas por poços, tanto para a irrigação, como para o abastecimento urbano e industrial (inclusive de parte da capital, João Pessoa).

A gestão das águas subterrâneas na Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba encontra-se em um estágio inicial. Neste contexto,

critérios relacionados com os instrumentos de gestão de recursos hídricos devem ser propostos e aplicados para mitigar os impactos da exploração desse recurso na área estudada.

Uma das metas desta pesquisa é a aplicação de modelos matemáticos como subsídio à gestão dos recursos hídricos. A utilização de um modelo de uma determinada parcela da área estudada permitiu nela diagnosticar a situação atual da exploração da água subterrânea, determinar seus limites e simular um critério de outorga de uso de recursos hídricos subterrâneos.

Dois aspectos relevantes da modelagem efetuada são destacados neste artigo. O primeiro relaciona-se com a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual da área estudada, baseada nas informações geológicas e hidrogeológicas coletadas em estudos e banco de dados já existentes (mapas, perfis, dados de poços, etc.), seguido de trabalhos de campo realizados por ASUB (2010). O outro aspecto relevante diz respeito às condições de contorno, onde foram observadas as relações entre a área interna e externa da modelagem considerando, para a definição desses contornos, os contatos e as falhas geológicas, os divisores de água e a relação das formações geológicas com a plataforma e o talude continentais.

ÁREA DE ESTUDO

Em ASUB (2010) e Costa et al. (2011) foram estabelecidas zonas de gerenciamento dos recursos hídricos na parte sedimentar costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba, considerando aspectos hidrogeológicos, sociais e econômicos. Neste trabalho selecionou-se uma das zonas de gerenciamento para estudo, a qual está compreendida entre as coordenadas UTM 288000 W e 9230000 N e 303000E e 9200000 S (Figura 1). Essa área é individualizada pela falha de Cabedelo (oeste), pelo oceano (norte e leste) e pelo divisor das bacias hidrográficas dos rios Paraíba e Gramame (sul). Totaliza uma área de 169,40 km², abrangendo os municípios de João Pessoa e Cabedelo.

A área de estudo apresenta dois subsistemas aquíferos. O subsistema livre superior está contido na Formação Barreiras, de litologia areno-argilosa, nos sedimentos flúvio-marítimos, constituintes da Planície Costeira e nas areias aluviais e de praias. O subsistema confinado, sotoposto, está contido nas formações areníticas Beberibe Inferior e Superior, tendo como camada confinante superior a formação Gramame de calcários argilosos e as rochas do Cristalino como embasamento confinante inferior.

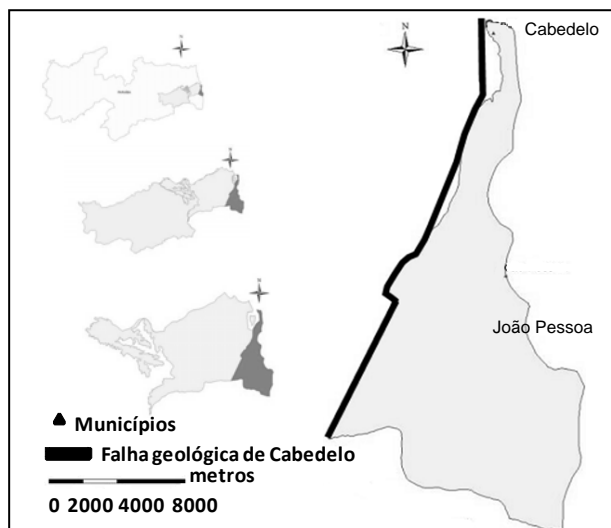


Figura 1 - Área de estudo.

O MODELO CONCEITUAL

As características deste modelo são descritas a seguir, com o auxílio ilustrativo das figuras 2 e 3.

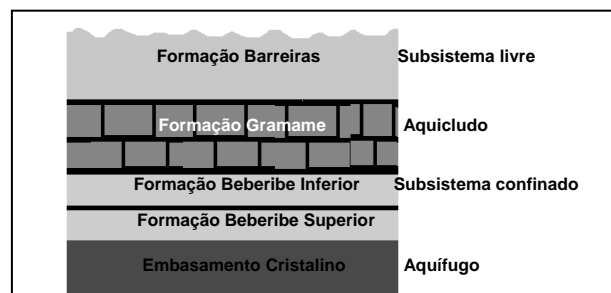


Figura 2 - Distribuição vertical dos subsistemas hidrogeológicos da área de estudo.

1. Formações geológicas ocorrentes na área de estudo: Sedimentos Aluviais, Flúvio-marítimos, Barreiras, Gramame e Beberibe (Inferior e Superior).
2. Composição do Sistema Aquífero: Um subsistema superior, livre, ocorrente em toda a extensão da área constituída pelas formações Barreiras e pelos Sedimentos Aluviais e Flúvio-marítimos, possuindo espessuras entre 20 e 70 metros. Um outro subsistema confinado, inferior, também existente em toda a extensão da área de estudo, constituído pelas formações Beberibe superior e in-

- ferior, com espessuras entre 200 e 350 metros.
- Um aquíclodo constituído pela formação Gramame que ocorre intercalado entre os dois subsistemas e que desempenha, regionalmente, o papel de camada confinante superior do aquífero Beberibe.
 - O Embasamento Cristalino que constitui a base impermeável confinante inferior do aquífero Beberibe.
 - O aquífero livre é recarregado por infiltração de uma parcela das águas das chuvas e, eventualmente, pelo sistema fluvial que devolve o excedente desta recarga à rede hidrográfica e descarrega neste e diretamente ao mar.
 - A recarga do aquífero confinado na área de estudo ocorre, exclusivamente, em alguns trechos da sua fronteira noroeste, através do fluxo subterrâneo horizontal proveniente de regiões vizinhas (Figura 3). Nessas regiões, a formação Beberibe aflora à superfície e o aquífero passa a ser livre e a interagir diretamente com o sistema atmosférico (precipitação e evaporação) e com o sistema hidrográfico. Nos demais trechos a oeste, o aquífero faz contato com o cristalino. Ao sul, o limite da área modelada é o divisor de águas entre as bacias hidrográficas dos rios Paraíba e Gramame. A descarga do subsistema aquífero confinado ocorre diretamente ao mar.

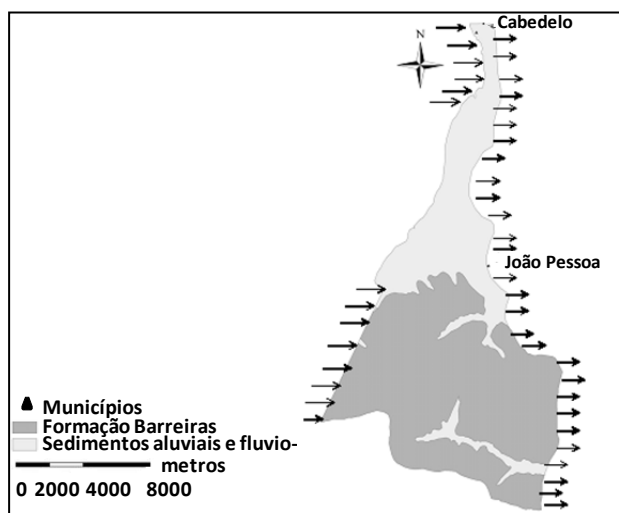


Figura 3 - Mapa de distribuição superficial das formações geológicas e fluxo horizontal (→) no aquífero Beberibe.

Este subsistema é captado, na área de estudo, por vários poços em atividade, fornecendo água de boa qualidade para atender aos diversos tipos de usos. Por outro lado, o subsistema livre tem menor uso por apresentar elevado risco de poluição. Nesta primeira abordagem procurou-se estudar apenas o aquífero Beberibe (confinado) para, através da simulação matemática do seu comportamento hidrogeológico, subsidiar a Gestão dos Recursos Hídricos subterrâneos da área modelada. A Figura 4 ilustra o modelo conceitual do subsistema aquífero confinado, considerado para a implementação do modelo matemático.

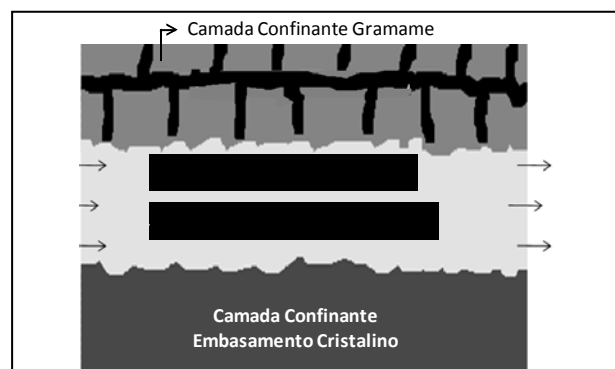


Figura 4 - Modelo conceitual do aquífero confinado a ser implementado no aplicativo matemático.

MODELO MATEMÁTICO

O programa computacional empregado para a construção e operação do modelo matemático da área estudada foi o MODFLOW (McDONALD e HARBAUGH, 1988) contido no pacote PMWIN (Processing Modflow for Windows - versão 7.0), que utiliza o método das diferenças finitas. Na calibração do modelo foi utilizado o programa PEST (Doherty et al., 1994).

Discretização da área modelada

O modelo implementado no aplicativo matemático, apresenta as seguintes características: (i) no plano vertical o modelo foi dividido apenas em uma camada (Figura 4); (ii) Modelo bidimensional horizontal; e (iii) a malha foi discretizada, horizontalmente, com as células possuindo dimensão de 100 m x 100 m em todo o domínio do modelo, perfazendo uma área de 450 km². Condições de Contorno

A Figura 5 apresenta os contornos físicos, os quais estão detalhados adiante. Tais contornos são representados no modelo sob diferentes condições hidráulicas, isto é, de fluxo e/ou de carga hidráulica, conforme apresentados a seguir.

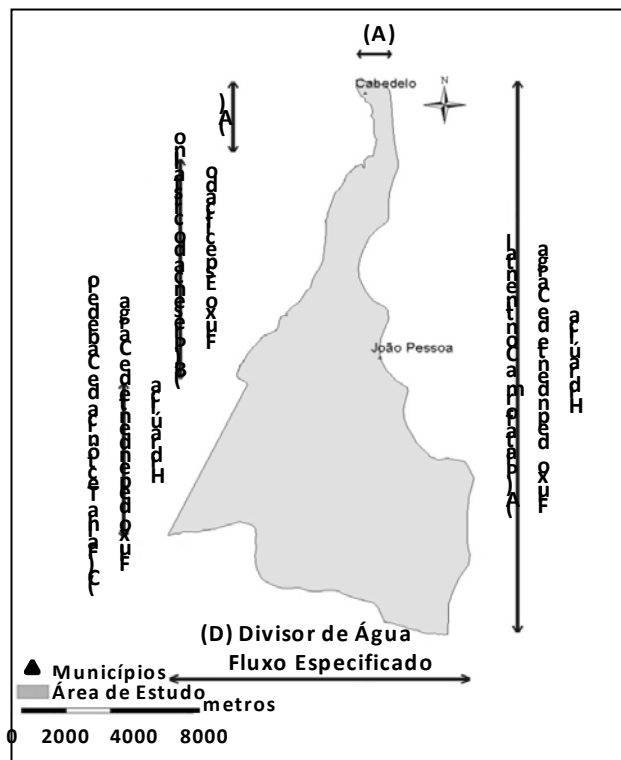


Figura 5 - Condições de contorno estabelecidas para o modelo conceitual.

Condição de Contorno (A)

Engloba todo o contorno leste e norte da área de estudo e parte noroeste dessa área (Figura 5). Apesar desses limites representarem a linha da costa litorânea, a carga hidráulica no aquífero modelado não pode ser considerada constante e igual ao nível médio do mar, pois se trata de aquífero confinado, cujo contato com o oceano deverá ocorrer em algum ponto mais afastado da costa em região de maior profundidade. Considerou-se, portanto, seu comprimento até o final da plataforma continental, a qual possui 50 km de extensão média (Figura 6). Assim, a cota do nível piezométrico, ou seja, a carga hidráulica desse aquífero apresenta-se constante e com valor zero apenas no fim da plataforma continental. Para obtenção das cargas hidráulicas no contorno foi estabelecida, a partir de algumas cargas hidráulicas medidas em campo, uma relação linear,

apresentada na Equação 1 e baseada na Figura 6, para o cálculo da carga hidráulica em cada célula do contorno do modelo na linha da costa litorânea. Quando apresentar cargas variando no tempo, no regime transitório, esse contorno expressará uma condição de carga hidráulica dependente do fluxo (condição de Cauchy).

$$Ch_2 = \frac{Ch_1 \cdot Dist_2}{Dist_1} \quad (1)$$

Onde: Ch_1 é a Carga hidráulica medida em campo (medição de campo); Ch_2 é a Carga hidráulica calculada para inserção no contorno; $Dist_1$ é a distância do ponto de medição ao fim da plataforma continental e $Dist_2$ é a distância da célula do contorno do modelo até a plataforma continental, estimada em 50 km.

Condição de Contorno (B)

Para estabelecer as condições de contorno B e C, utilizou-se a Figura 7 que apresenta o mapa geológico parcial da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba (contendo a área de estudo), com os aspectos de maior interesse para a modelagem pretendida, com destaque para a localização dos cortes geológicos.

A partir do corte geológico EF (Figura 8) observa-se, na fronteira da região modelada, a presença do embasamento cristalino, através do qual o fluxo é nulo caracterizando uma fronteira impermeável, isto é, o aquífero Beberibe não ultrapassa a fronteira da região modelada. Está é, portanto, uma condição de contorno do tipo de fluxo especificado ou condição de Neumann.

Condição de Contorno (C)

O corte geológico AB (Figura 9) mostra a formação aquífera Beberibe estendendo-se para a região vizinha havendo, portanto, fluxo através deste contorno. É um das zonas de recarga do aquífero modelado onde a carga hidráulica no regime transitório depende do fluxo (condição de Cauchy).

Condição de Contorno (D)

O divisor de água entre a Bacia Hidrográfica do Baixo Curso do Rio Paraíba e a Bacia Hidrográfica do Rio Gramame foi admitido como o divisor natural das águas subterrâneas, embora o aquífero

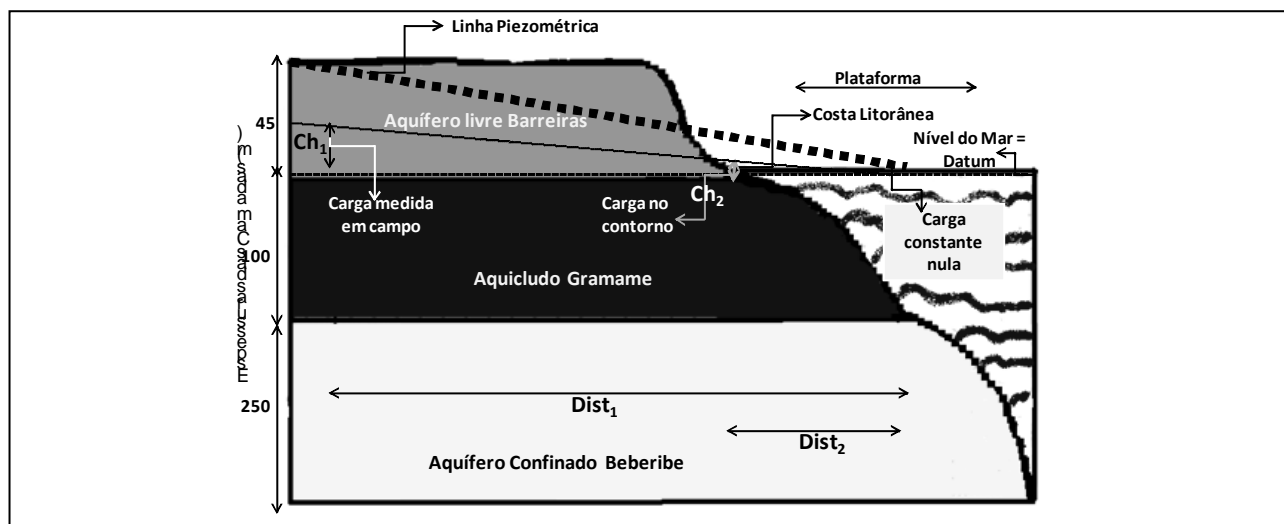


Figura 6 - Esboço da condição de contorno (A).

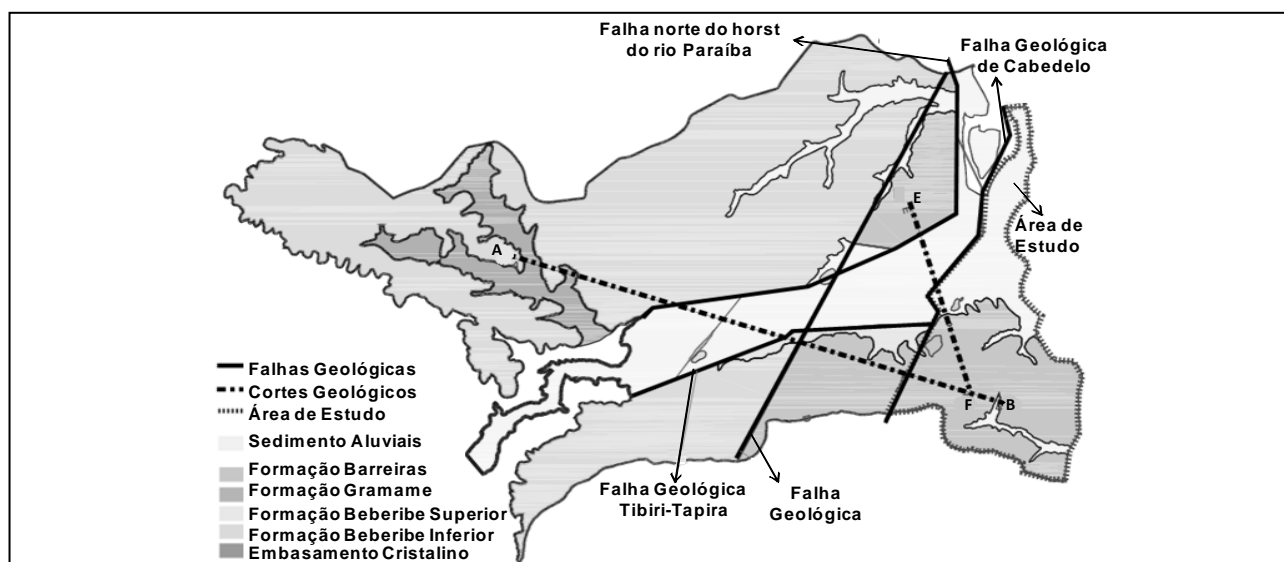


Figura 7 - Mapa geológico parcial da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.

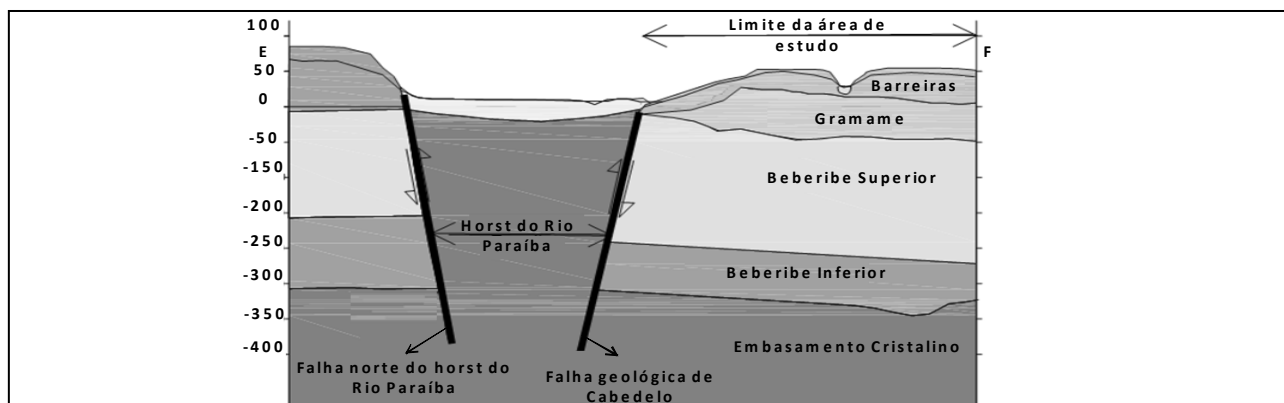


Figura 8 - Corte geológico EF - Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.

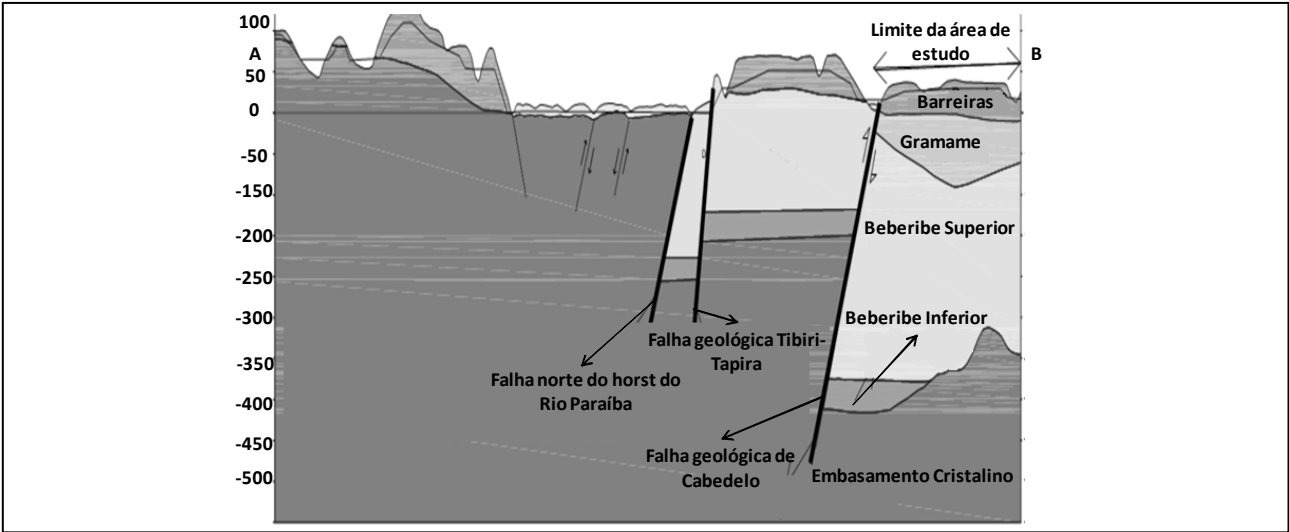


Figura 9 - Corte geológico AB - Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.

se estenda naturalmente além dessa fronteira. Esta hipótese, que poderá ser comprovada mediante observações de campo mais precisas e numerosas, considera o princípio da bacia hidrográfica como divisora natural dos fluxos superficiais e subterrâneos, ambos comandados pelos cursos d’água. Assim estabeleceu-se uma condição de fluxo nulo especificado (condição de Neumann).

CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para a aplicação do modelo, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros hidráulicos do aquífero: condutividade hidráulica e armazenamento específico. Com os valores das cargas hidráulicas observadas e comparadas àquelas obtidas através do modelo matemático, esses parâmetros são determinados através do processo de calibração.

Calibração da Condutividade Hidráulica (K)

Essa etapa foi realizada no regime permanente. Utilizaram-se dados de medição das profundidades dos níveis estáticos de 16 poços (na área de estudo), no mês de julho de 2009.

No modelo matemático, somente foi necessário colocar as condições iniciais nas cargas com valores fixos, ou seja, nas partes leste, norte, noroeste e sudoeste da área de estudo. As condições de contorno (A) e (C) mudam de categoria e passam

de carga dependente de fluxo (condição de Cauchy) no regime transitório, para carga fixa conhecida (condição de Dirichlet) no presente caso de fluxo permanente. Para o contorno (A), as cargas hidráulicas calculadas foram obtidas conforme a hipótese e o procedimento já relatados, que se expressam através da Equação 1. As cargas hidráulicas do contorno (C) foram estabelecidas pela interpolação das medições dos níveis piezométricos dos poços próximos a esse contorno.

A condutividade hidráulica na área modelada não se apresenta de forma homogênea, portanto, delimitaram-se áreas de mesma condutividade empregando-se, para isso, o traçado de isocondutividades. A delimitação foi aperfeiçoada em função das espessuras e litologias das formações Beberibe superior e inferior. Os resultados estão mostrados na Figura 10. Após a determinação das áreas descritas, processou-se a calibração automática com o programa computacional PEST (Doherty et al., 1994). O resultado da calibração está na Tabela 1.

Tabela 1 - Condutividade Hidráulica (K) para a área de estudo.

Áreas	1	2	3	4
K (m/s) x 10 ⁻⁵	7,52	6,94	1,74	0,156

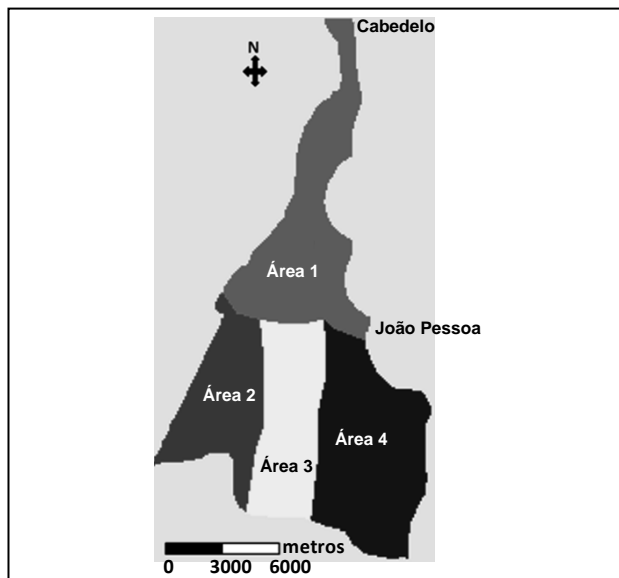


Figura 10 - Áreas de condutividade.

Calibração do Armazenamento Específico (Ss)

Para a calibração do armazenamento específico, o escoamento foi simulado em regime transitório, ou seja, com a carga hidráulica apresentando variações ao longo do tempo.

Os dados de medição da profundidade dos níveis estáticos dos poços, utilizados para a obtenção da cota do nível piezométrico, foram obtidos durante medições. Alguns poços observados em julho de 2009 não puderam ser visitados em outubro do mesmo ano por não ser possível a prévia paralisação durante 24 horas para se efetuar a medição. Somente 11 poços tiveram as medições nos dois meses.

No regime transitório, as condições de contorno das partes noroeste, norte, leste e sudoeste precisaram ser modificadas, uma vez que, nesse caso, há variação das cargas nas fronteiras ao longo do tempo. Nas aplicações anteriores, para obtenção da condutividade hidráulica, empregou-se a condição de contorno de Dirichlet de carga hidráulica constante, correspondente ao regime permanente. Utilizou-se, para a presente etapa, a condição de contorno de Cauchy, de carga variável, dependente de fluxo. A ferramenta GHB (General Head Boundary) do MODFLOW permite o cálculo das cargas hidráulicas dependendo do fluxo. Dois parâmetros constituem essa ferramenta:

A Condutância - expressa o produto da condutividade hidráulica e da distância entre os centros da célula, calculada pela equação seguinte:

$$C = K \cdot d_{cent} \quad (1)$$

Onde: K é a Condutividade Hidráulica [L/T]; C é a Condutância [L²/T] e d_{cent} é a distância entre os centros das células[L], para o estudo de 100 m.

A Carga Externa ao Contorno - com esse parâmetro, através do princípio dos vasos comunicantes, estabelece-se uma inter-relação entre a parte interna e a parte externa da área de estudo. As cargas externas ao contorno, nos meses de julho e outubro, quando foram feitas as campanhas de medição, foram obtidas com a Equação 1, deduzidas das hipóteses já relatadas e esquematizada na Figura 6. Adotando-se como mensal o intervalo das medidas (passo de tempo da simulação), se fazem necessárias as cargas hidráulicas correspondentes aos períodos intermediários entre as medições (agosto e setembro).

No modelo matemático, para que seja simulado o regime transitório, deve ser informada a quantidade de períodos. Nesse caso, foram adotados quatro períodos compreendendo o intervalo entre os meses de julho a outubro de 2009. Admitiram-se as seguintes relações lineares para a obtenção da carga externa nos meses de agosto e setembro (equações 3 e 4):

$$h_{agosto} = h_{julho} - \frac{(h_{julho} - h_{outubro})}{4} \quad (3)$$

$$h_{setembro} = h_{agosto} - \frac{(h_{julho} - h_{outubro})}{4} \quad (4)$$

Onde: h_{agosto} é a carga externa no mês de agosto(m); h_{julho} é a carga medida em julho(m); $h_{setembro}$ é a carga externa no mês de setembro(m) e $h_{outubro}$ é a carga medida em outubro(m).

Outro aspecto considerado para a calibração do armazenamento específico foi o do subsistema confinado estar perturbado, em virtude dos bombeamentos dos poços ocorrentes na área de estudo. Esses bombeamentos representam, juntamente com a circulação natural do subsistema, variações da carga hidráulica no regime transitório. Simultaneamente à calibração do armazenamento específico foram determinadas as vazões de exploração ocorrentes na área modelada. Foram inseridas no modelo matemático, as vazões dos poços (período de julho a outubro) da CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba) totalizando um valor de 20.450 m³/d.

As condições iniciais utilizadas foram as cargas calculadas pelo modelo no regime permanente quando ocorreu a calibração da condutividade hidráulica. Para representar a distribuição espacial do armazenamento específico, foram utilizadas as mesmas áreas determinadas para a calibração da condutividade hidráulica.

Tabela 2 - Armazenamento específicos (Ss) calibrados.

Áreas	Ss(1/m)
1	$1,10 \times 10^{-7}$
2	$1,43 \times 10^{-7}$
3	$1,64 \times 10^{-7}$
4	$1,96 \times 10^{-5}$

Tabela 3 - Poços de bombeamento com vazões calibradas para área de estudo.

Poços*	1	2	3	4	5	6	7
Vazões (m³/d) x 10³	1,32	3,0	1,3	2,0	3,0	0,96	2,5
Poços*	8	9	10	11	12	13	14
Vazões (m³/d) x 10³	0,5	0,5	0,5	1,0	2,0	2,0	2,0
Poços*	15	16	17	18	19	20	21
Vazões (m³/d) x 10³	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Poços*	22	23	24	25	26	27	28
Vazões (m³/d) x 10³	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0

* Poços 1 até 13 de propriedade da CAGEPA, os demais são particulares.

Em uma primeira tentativa de calibração do armazenamento específico, foi verificado que as vazões reais dos poços são maiores do que as simuladas. Por isso, para se determinar o rebaixamento, foram inseridos outros poços de bombeamento presentes no cadastro da AESA para a calibração do armazenamento específico e, conseqüentemente, para a determinação da vazão de exploração do aquífero modelado.

Os parâmetros determinados nesta calibração referem-se, portanto, aos armazenamentos específicos e, simultaneamente, às taxas de bombeamento dos poços do aquífero Beberibe. O processo consistiu em aumentar a vazão bombeada. Foi processada a calibração automática do armazenamento específico (com o programa computacional PEST) até atingir um ajuste aceitável. Os valores do armazenamento específico calibrados estão apresentados na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta as vazões calibradas pelo modelo.

APLICAÇÃO DO MODELO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Diagnóstico atual do subsistema confinado

A aplicação do modelo, depois de formulado, calibrado e verificado, consistiu em analisar a situação atual do aquífero, representado pelo seu comportamento no período compreendido entre os meses de julho a outubro de 2009. Observa-se que, tanto na parte central do perfil AB (Figura 11) como no extremo oeste ocorrem cargas hidráulicas com valores negativos em relação ao nível do mar, ocasionado por bombeamentos, provocando rebaixamentos concentrados dos níveis potenciométricos, induzindo o fluxo para esses locais. Assim, o bombeamento no aquífero provocou a ocorrência de duas regiões de rebaixamentos dos níveis piezométricos, separadas por um divisor de água, conforme Figura 11, ressaltados pelo perfil AB.

Conforme o modelo conceitual, dois locais (partes noroeste e sudoeste) da área de estudo são responsáveis pela recarga do subsistema Beberibe (Figura 11). Com a simulação através da modelagem matemática para os meses de julho a outubro de 2009, foi verificado, na fronteira sudoeste da área modelada (Perfil AB), a ocorrência de níveis potenciométricos negativos em relação ao nível do mar, visto haver uma exploração de 27.500 m³/d em vários poços situados no entorno da fronteira. Esse resultado indica uma concentração da exploração justamente na zona onde deveria haver recarga, o que ressalta a importância de um monitoramento dos níveis freáticos próximos a esse local de recarga, visto ser um local de fundamental importância para a manutenção do subsistema Beberibe. A exploração intensa afetará a circulação, recarga e descarga da água na região do aquífero estudado.

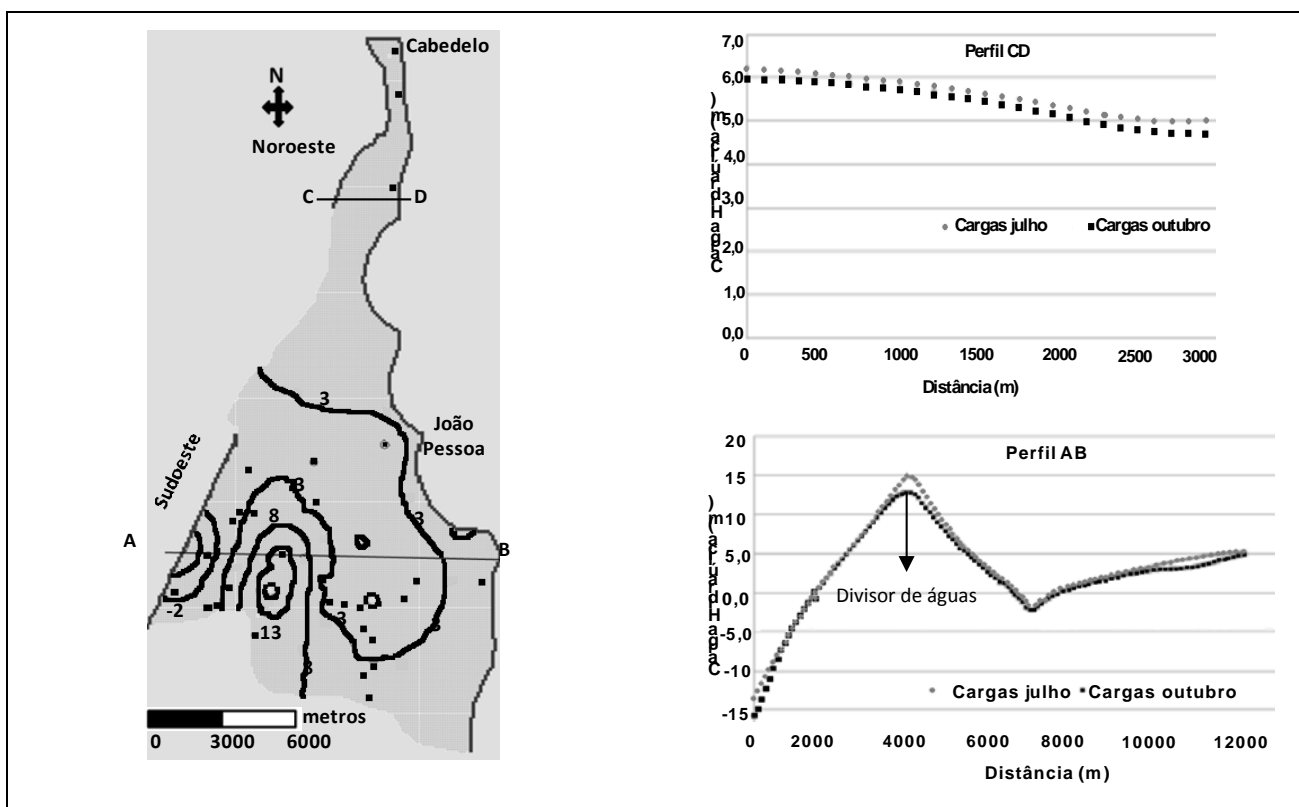


Figura 11 - Perfil AB e Perfil CD - Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009.

O comportamento das linhas potenciométricas (Figura 11- Perfil AB) na entrada sudoeste da área de estudo, indica que, nesse local, ao invés de estar entrando água no subsistema, como esperado, ocorre fluxo na direção contrária motivado pela existência de poços. Todavia, no modelo bidimensional horizontal empregado não se considerou as variações do fluxo na direção vertical.

Assim, é possível que esteja ocorrendo concentrações de fluxo nas partes rasas (superiores) do aquífero onde existe captação, e que, na parte mais inferior do aquífero, continue a haver fluxo de entrada, conforme ilustrado na Figura 12. Uma melhor análise com relação a esse fato pode ser feita a partir de um modelo bidimensional vertical específico para esse local.

Outra informação obtida a partir das cargas calculadas para os meses de julho a outubro (Figura 11 – Perfil CD), diz respeito à parte noroeste, outro local de recarga do aquífero Beberibe. Observaram-se pequenas variações nos níveis freáticos, isto pode ser justificado tanto pela circulação natural das águas subterrâneas como pela pouca quantidade de

água captada por poços. Portanto, o fluxo nessa parte ocorre normalmente do interior para o litoral, ou seja, as perturbações no subsistema ainda não modificaram o seu fluxo subterrâneo natural.

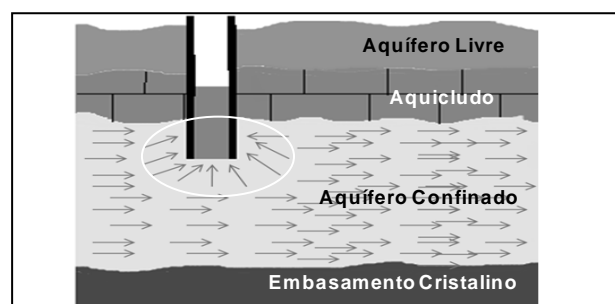


Figura 12 - Esquema do possível comportamento do fluxo na entrada sudoeste da área de estudo.

Os resultados do modelo mostraram, ainda, que a taxa de bombeamento para a área de estudo no período simulado tem valor de 52.700 m³/d. Deste valor, 20.700 m³/d são utilizados pela CAGEPA

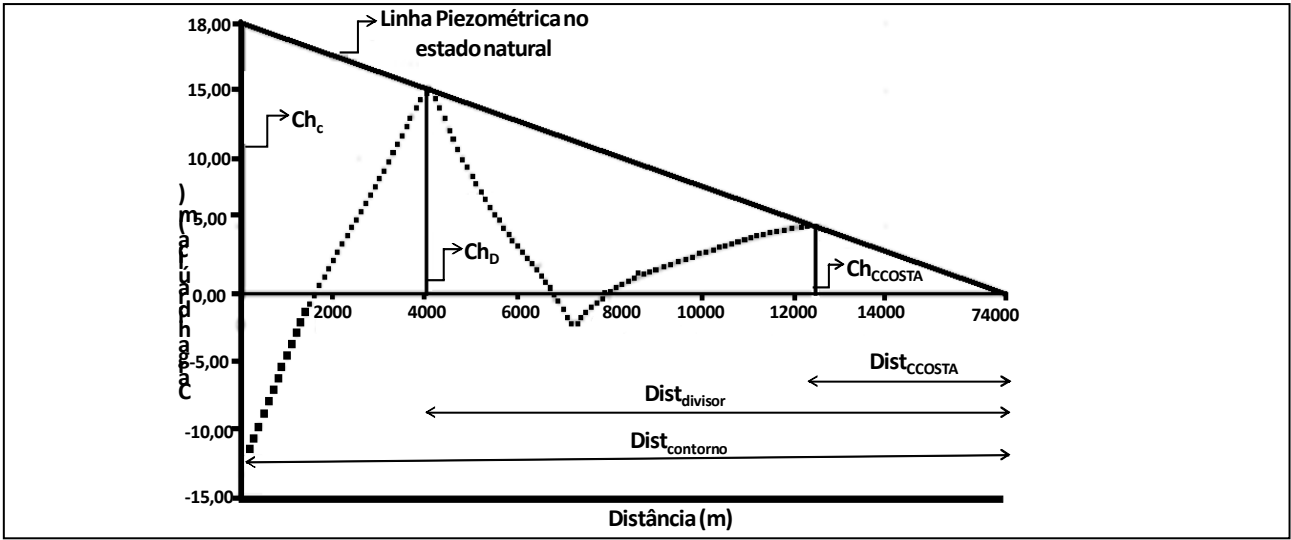


Figura 13 - Esquema para obtenção das cargas hidráulicas no estado natural do subsistema.

e os restantes, 32.000 m³/d, são utilizados por usuários particulares. No cadastro de poços outorgados pela AESA observa-se que a vazão outorgada para os usuários particulares é de 20.346,72 m³/d, ou seja, esse valor outorgado é inferior ao valor obtido pelo modelo matemático por uma diferença de 11.653,28 m³/d (Tabela 4).

Tabela 4 - Diagnóstico das vazões de bombeamento

Quantidade	Proprietário	Modelo (m ³ /d)	Outorgado AESA (2009) (m ³ /d)
11	CAGEPA	20.700,00	20.700,00
17	PARTICULAR	32.000,00	20.346,72
TOTAL		52.700,00	41.046,72

Simulação do estado natural do subsistema

Essa aplicação teve por objetivo verificar o balanço natural do subsistema caso não houvesse exploração para o período de julho a outubro de 2009, visando quantificar o volume de água da descarga natural do subsistema modelado. Essa descarga natural é importante para a Gestão de Recursos Hídricos, pois está associada à disponibilidade de água subterrânea (Albuquerque e Rego, 1999).

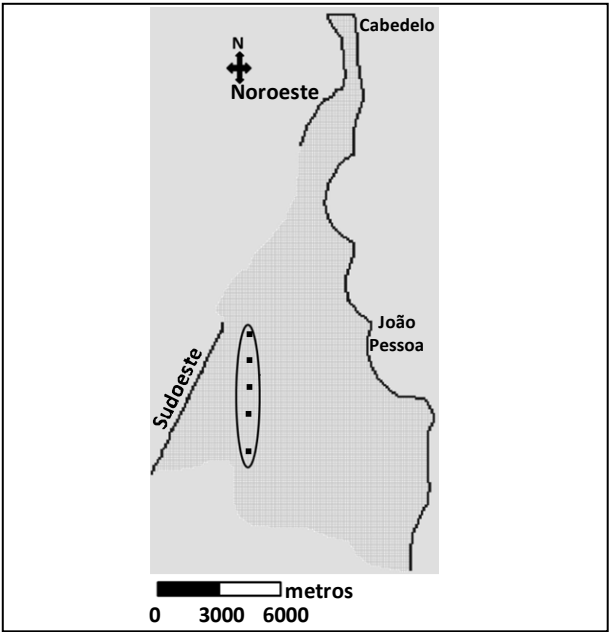


Figura 14 – Cargas fixas (células de cor preta) para o regime permanente.

Nessa simulação foram feitas algumas considerações para a obtenção do estado natural do aquífero Beberibe. A primeira consideração é que as cargas hidráulicas que formam o divisor de água, no centro da área, correspondem aos resquícios do sistema natural anteriormente à exploração. A segunda corresponde à consideração da descarga natural do subsistema confinado ocorrer no final da

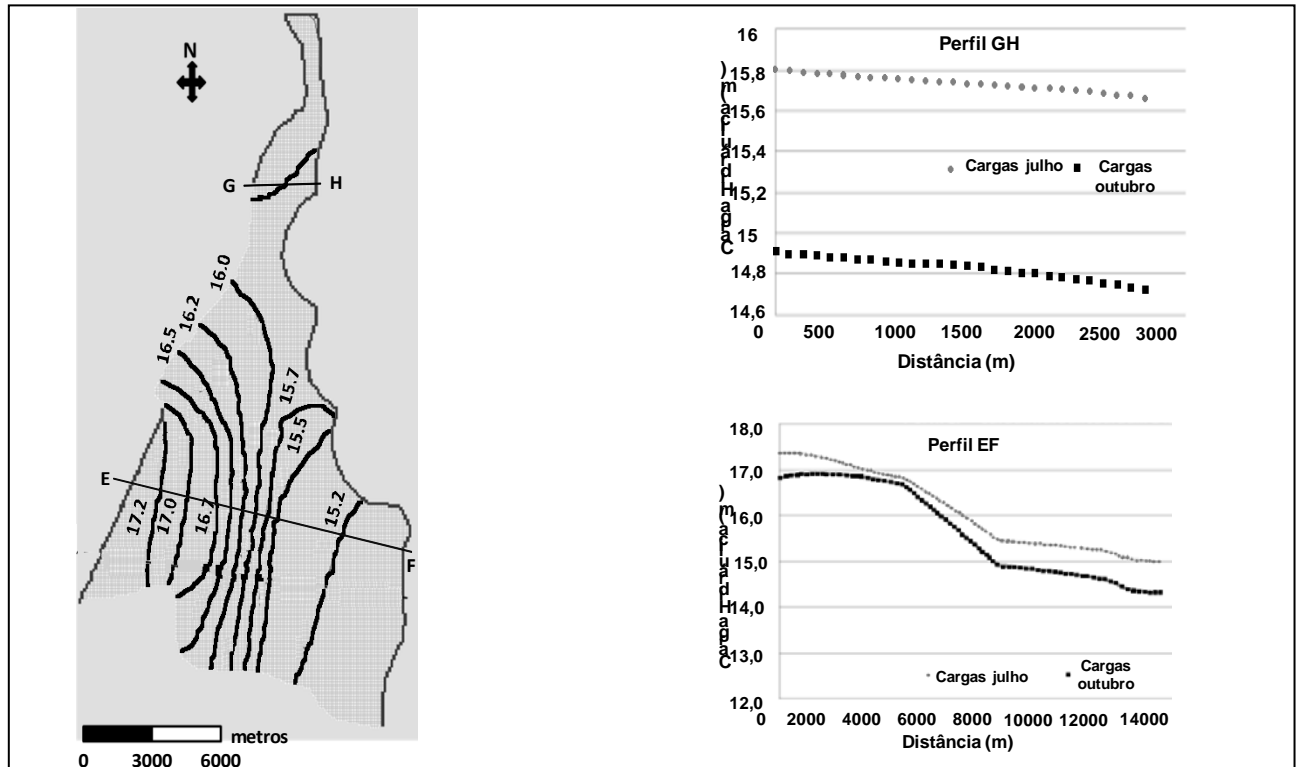


Figura 15 - Perfil EF e Perfil GH - Cargas calculadas pelo modelo matemático para os meses de julho e outubro de 2009 (estado natural).

plataforma continental, com carga hidráulica constante e nula. Portanto, foi estabelecida a relação linear para obtenção das cargas hidráulicas em cada célula do modelo, a partir da carga do divisor de água obtida do diagnóstico atual do subsistema confinado (Figura 13). As relações apresentadas nas equações 5 e 6 foram utilizadas para o cálculo das cargas no contorno para o sistema no estado natural.

$$Ch_c = \frac{Ch_D \cdot Dist_c}{Dist_D} \quad (5)$$

$$Ch_{CCosta} = \frac{Ch_D \cdot Dist_{ccosta}}{Dist_D} \quad (6)$$

Onde: Ch_c é a carga hidráulica no contorno(m); Ch_D é a carga hidráulica no divisor de água(m); Ch_{ccosta} é a carga hidráulica no contorno da costa litorânea(m); $Dist_c$ é a distância do contorno até o final da plataforma (m); $Dist_D$ é a distância do divisor de água até o final da plataforma (m) e

$Dist_{ccosta}$ é a distância do contorno da costa até o final da plataforma (m).

As condições iniciais, importantes dados de entrada no modelo matemático para o regime transitório, foram obtidas a partir da simulação do modelo para o regime permanente. Na simulação do regime permanente, as cargas hidráulicas foram inseridas nas células fixas no contorno (A) e (C) cujos valores foram obtidos a partir das relações das equações 5 e 6, já descritas, para o mês inicial, julho de 2009. As cargas fixas, em destaque na Figura 14, foram assim definidas para especificar o valor da carga hidráulica no divisor de água. Com essa simulação em regime permanente, as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático foram inseridas como condições iniciais para o regime transitório.

A Figura 15 (Perfil EF e Perfil GH) apresenta as cargas calculadas para o subsistema confinado no estado natural. Verifica-se que o fluxo subterrâneo ocorre, como era de se esperar, pelo modelo conceitual, do interior para o litoral.

A realização dessa simulação permitiu quantificar o volume de descarga para os meses de julho a outubro de 2009, uma vez que o subsistema confinado encontra-se sem exploração. Esse volume,

de 4.184.000 m³, pode ser considerado como a descarga natural e tomado como limite para a exploração no período. Porém, o diagnóstico realizado para a situação atual do subsistema confinado mostrou que a exploração por poços totaliza um volume de 6.429.400 m³ para os meses de julho a outubro de 2009. Este é um valor superior ao volume da descarga natural do mesmo subsistema (4.184.000 m³), indicando a ocorrência de uma superexploração, sendo a descarga natural admitida como disponibilidade máxima do aquífero.

Desta forma, a recarga natural não repõe o volume de água explorado, causando um déficit hídrico e diminuindo os níveis potenciométricos do aquífero na região, resultando em um rebaixamento dos níveis potenciométricos ao longo do tempo.

Os valores encontrados nessa simulação devem ser vistos como uma primeira avaliação com poucos dados disponíveis e abrangendo apenas uma parcela do ciclo anual de recarga, circulação e descarga. Com a expansão e uma boa espacialização do monitoramento deverão ser obtidas séries mais longas de observação plurianuais, que darão maior confiança aos resultados do modelo.

Intrusão salina

No presente estudo, a partir do diagnóstico atual do subsistema confinado, e com as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático (Figura 11), foi possível avaliar o estado do aquífero quanto ao problema da intrusão salina. A linha potenciométrica do subsistema confinado em uma seção contendo limites da área modelada (Perfil AB - Figura 11) foi determinada conforme Figura 16.

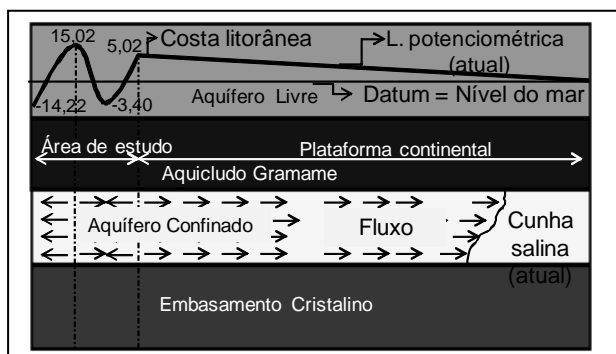


Figura 16 - Esboço da intrusão salina para o aquífero modelado.

Como se observa na Figura 16, considerando as condições de contorno estabelecidas nesta pesquisa, a intrusão salina, problema ocorrente em zonas costeiras, ainda não está presente na área de estudo - apesar de ocorrer alguns níveis potenciométricos negativos na área modelada.

Na Figura 16 verifica-se um divisor de água exatamente no limite da costa litorânea, possuindo cargas hidráulicas positivas que diminuem na direção do litoral até o final da plataforma continental. O escoamento, portanto, ainda ocorre predominantemente em direção ao oceano.

CONCLUSÕES

Observou-se, neste trabalho, a importância da modelagem matemática para o entendimento do subsistema hidrogeológico estudado, uma vez que foi possível verificar as mudanças ocorridas no fluxo subterrâneo quando submetido a explorações. A pesquisa permitiu, também, direcionar as atenções para a necessidade de levantamentos de novos dados.

Os parâmetros calibrados apresentaram valores aceitáveis e coerentes, apesar da pequena quantidade de dados de medição de níveis piezométricos. Essa carência foi compensada pelos cuidados dispensados na elaboração do modelo conceitual tornando-o, o mais próximo possível da realidade.

Na aplicação do modelo matemático foi diagnosticada uma vazão de bombeamento superior àquela atualmente outorgada pelo Órgão Gestor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba, mostrando que é necessária uma fiscalização mais acentuada da vazão de retirada do subsistema confinado. Os resultados das taxas de bombeamento indicam uma concentração da exploração justamente na zona onde deveria haver recarga (parte sudoeste da área modelada), o que traz à tona a importância de um monitoramento dos níveis freáticos próximos a esse local de recarga, visto que, é um local de fundamental importância para a manutenção do subsistema Beberibe e que a exploração intensa afetará a sua sustentabilidade. A consideração da intrusão salina, como critério de outorga de direito de uso dos recursos hídricos, simulada pelo modelo matemático, mostrou uma forma eficiente de análise da outorga de águas subterrâneas. Entretanto, outros critérios devem ser considerados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa - Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas - financiado pelo MCT/FINEP/CT-HIDRO. O primeiro autor recebeu bolsa da CAPES para a realização do seu mestrado. O último autor recebeu bolsa CNPq no âmbito do projeto supracitado. Todos os autores agradecem às instituições mencionadas.

REFERÊNCIAS

- AESA (2008). Comunicação Pessoal. Reunião com a Diretoria de Gestão e Apoio Estratégico.
- ALBUQUERQUE, J. do P. T.; RÊGO, J. C. (1999). Subsídios para o gerenciamento racional e integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do estado da Paraíba. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre, ABRH, 1999.
- ASUB (2010). Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas. Relatório Técnico Parcial nº 2. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB.
- BRASIL (1997). Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União DOU de 09 de janeiro de 1997, Seção 1, Brasília DF, p. 470-474.
- CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2008). Resolução nº. 92. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. Brasília: MMA.
- CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. (2001). Resolução nº. 16. Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso dos recursos hídricos. Brasília: MMA.
- COSTA, M. L. M; RIBEIRO, M. M. R.; REGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. (2011). Proposição de critérios de outorga para águas subterrâneas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH, Vol. 16, nº 1, 105-113.
- DOHERTY, J.; BREBBER, L.; WHITE, P. (1994). PEST - Model Independent Parameter Estimation. User's Manual. Watermark Computing. Austrália.
- McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. (1988). A Modular three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1.

Modeling Groundwater Flow in the Coastal Sedimentary Paraíba River Basin as Support for Water Resources Management

ABSTRACT

This paper aims to provide a mathematical model that represents groundwater flow in the Paraíba River Basin, Paraíba State, Brazil, in order to support the integrated management of surface and groundwater. The hydrogeological behavior of the aquifer was simulated with the following outcomes: current diagnosis of the confined aquifer, natural discharge volume of the subsystem and exploitation flow rate by wells. Simulation of saltwater intrusion into the hydrogeological subsystem led to establishing a criterion for the concession of groundwater rights. The results showed that the aquifer has been intensely used and water resources management measures are needed to avoid deterioration of qualitative and quantitative aspects of groundwater in the basin.

Keywords: groundwater, conceptual and mathematical modeling, water resources management.