

DELINEAMENTO DAS ZONAS DE CAPTURA DE POÇOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS ANALÍTICOS NA REGIÃO DO VALE DO CARIRI – CEARÁ

Carisia Carvalho Gomes¹; Marco Aurélio Holanda de Castro²

RESUMO

O objetivo deste trabalho é mostrar a aplicação do Método de Elementos Analíticos para o delineamento das zonas de captura de poços tubulares através da determinação das trajetórias das partículas em aquíferos regionais. Para aplicação do modelo analítico é escolhido como área de interesse, o Vale do Cariri, no Estado do Ceará, dentro da Região composta pelos municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha. A razão da escolha desta área deve-se ao fato da Região possuir uma das maiores reservas de água subterrânea em rocha sedimentar do Estado, sendo o abastecimento público das cidades feito quase que totalmente com água subterrânea, induzindo problemas de intensa exploração do manancial, desperdícios, agravados pela poluição ambiental. Através do uso simultâneo do método analítico - SPLIT/VBB e do método numérico - MODFLOW/MODPATH, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados para destacar algumas vantagens do modelo analítico perante o modelo numérico, sendo uma das mais importantes a facilidade de uso do modelo analítico, graças à eliminação da necessidade da discretização do domínio. Constituído-se assim uma preciosa ferramenta alternativa para solucionar problemas de fluxo subterrâneo, especialmente de aquíferos de grande porte, pois permite a variação das escalas de detalhamento, sem prejuízo da precisão e credenciando-o como um modelo adequado para apoiar programas de gerenciamento e monitoramento dos recursos hídricos de vastas regiões.

PALAVRAS-CHAVE

modelagem matemática; zona de captura de poços tubulares.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas de exploração dos recursos naturais de água subterrânea e a manutenção de sua qualidade estão recebendo um significativo aumento da atenção por parte das autoridades públicas devido à constante ameaça potencial de contaminação do meio ambiente que ocorre, resultante das atividades industriais, deposição de lixo, inclusive o radioativo, atividades agrícolas, etc. Esta preocupação atinge, em especial, a população da região semi-árida do Nordeste

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Bloco 713 - 1º andar – CEP - 60.451-970 – Fortaleza – CE – Brasil - carisia@ufc.br

2) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Bloco 713 – térreo - CEP - 60.451-970 – Fortaleza – CE – Brasil - marco@ufc.br

Brasileiro que, além do problema agravante da poluição, enfrenta, há séculos, outros graves problemas ligados à falta de água, que acontece durante períodos de chuvas escassas ou até mesmo inexistentes. Neste estágio os pequenos mananciais superficiais geralmente secam e os grandes reservatórios chegam a atingir níveis críticos. Isto causa, muitas vezes, o colapso no abastecimento de água e, como consequência, as populações ficam submetidas a racionamento de água, falta de alimentos, imigração da população afetada para os centros urbanos e, resultante deste panorama, a degradação na qualidade de vida das pessoas.

Diante deste quadro, a importância da água subterrânea é cada vez maior, pois, muitas vezes, representa o único recurso disponível para o suprimento da população e dos rebanhos, atividades industrial e agrícola da região, pois a água de superfície se torna insuficiente e de má qualidade. Além disso, as águas superficiais representam águas em trânsito que se renovam em períodos muito curtos (muitas vezes durante um ano). Para estes problemas de escassez e poluição da água, tanto o Governo Federal como os Estaduais, entre outras medidas emergenciais durante os períodos de seca, costumam promover programas de perfuração de poços na tentativa de aumentar a oferta de água. Como resultado destes programas existe uma significativa quantidade de poços profundos. No entanto, muitos deles estão desativados ou abandonados por motivos diversos e os que estão em uso não estão incluídos em um programa de gerenciamento dos recursos hídricos, evidenciando a vulnerabilidade, tanto quantitativa como a qualitativa das águas subterrâneas que representam uma parcela significativa do potencial hídrico do Nordeste. Os poços desativados poderiam voltar a funcionar, através de pequenas ações de reabilitação, vindo a aumentar o número de poços em uso que também necessitam de um programa de gestão dos recursos dos aquíferos. Para o desenvolvimento deste programa, o planejador deve ter em mãos informações sobre os fatores condicionantes físicos importantes dos aquíferos exploráveis por estes poços, tais como as propriedades hidrogeológicas, perímetros de proteção dos poços, riscos de poluição e outros.

O volume explotável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema como um todo. Sendo necessário o desenvolvimento de modelos de simulação que forneçam informações sobre a resposta do sistema regional de água subterrânea a bombeamentos e recarga artificial e modelos de otimização.

Como os modelos em outros campos de estudo, os modelos de fluxo em água subterrânea são uma simplificação ou abstração do sistema real (mundo natural) existente, no caso, o subsolo. Portanto, um modelo bem sucedido de fluxo de água subterrânea necessita do conhecimento adequado das propriedades fundamentais do meio poroso e das interações entre os processos físicos no sistema de interesse. Infelizmente, a disponibilidade de dados, tanto para descrever tais propriedades fundamentais dos aquíferos como para caracterizar as relações de interação, é limitada nos sistemas de água subterrânea, devido a grande dificuldade financeira em obtê-los. O problema toma maiores proporções pelo fato de que as propriedades naturais relacionadas aos sistemas de água subterrânea podem ser altamente variáveis, tanto no espaço como no tempo e, como resultado, os hidrologistas de recursos subterrâneos se deparam com o desafio de desenvolver ferramentas de previsão de gerenciamento com o objetivo de calcular a quantidade da água subterrânea.

O desafio da modelagem do fluxo de água subterrânea se depara também com a dificuldade que é a descrição detalhada, no espaço e no tempo, das propriedades hidráulicas das formações subterrâneas na escala de interesse. Assim, como uma consequência do alto nível de complexidade dos mecanismos de fluxo, esta dificuldade tem recebido muita atenção por parte dos pesquisadores deste assunto. Hoje, graças ao extraordinário desenvolvimento da informática, a acessibilidade e facilidade de manipulação dos modelos digitais são cada vez maiores, tornando as soluções dos problemas de águas subterrâneas, através dos modernos microcomputadores, uma tarefa relativamente simples. Mas, quando se está diante de um determinado problema para resolver, não se pode ir diretamente ao microcomputador utilizando um programa comercial, supostamente apropriado para resolvê-lo e esperar a solução apertando simplesmente alguns botões. O usuário precisa ter experiência no uso do microcomputador, conhecer profundamente o programa que vai utilizar e, sobretudo, entender o problema que deseja solucionar o qual deve ser apresentado como um mode-

lo conceitual. Sendo assim, a complexidade do modelo não pode ser função apenas dos recursos computacionais nem orçamentários e sim do objetivo que se propõe atingir através dele.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região mencionada compreende o Vale do Cariri, localizada na Bacia do Araripe, sul do Ceará, Nordeste do Brasil, conforme Figura 1. A área de interesse é uma zona de pediplano, onde ocorre a maior concentração de exploração do aquífero. A aplicação simultânea dos dois modelos, método de elementos analíticos e método de diferenças finitas, na mesma área é feita para atender o objetivo específico da determinação das zonas de captura dos poços para planejamento das devidas medidas de proteção das cargas hidráulicas nestes poços.

A área de interesse fica restrita à porção da região onde ocorre maior exploração do aquífero. Esta área localiza-se a 538 km da capital do Estado do Ceará, Fortaleza, entre as coordenadas $07^{\circ} 10'$ e $07^{\circ} 25'$ S, $39^{\circ} 10'$ e $39^{\circ} 30'$ W Gr, sendo constituída por parte dos municípios de Crato (CRA), 170 km^2 , Juazeiro do Norte (JU), 102 km^2 e Barbalha (BAR), 158 km^2 - chamada de CRAJUBAR, termo utilizado por seus habitantes, perfazendo uma área total de aproximadamente 430 km^2 .

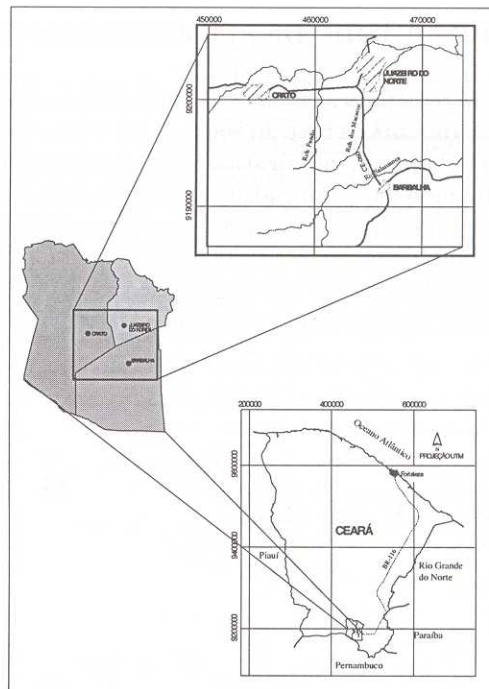


Figura 1 - Localização das áreas de interesse – Vale do Cariri – Ceará

CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO SISTEMA AQUIFERO

Os valores médios dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero (sistema aquífero médio – Formação Batateiras) têm como fonte o trabalho do DNPM (MONT'ALVERNE et al., 1996) e são os seguintes: para a transmissividade (T) do aquífero confinado: $7,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; para a condutividade hidráulica (k): $7,32 \times 10^{-5} \text{ m/s}$; o coeficiente de armazenamento (S): $1,36 \times 10^{-3}$ e a porosidade efetiva (n_e): 20 %.

Os valores correspondentes à reserva, disponibilidades e potencialidade dos sistemas aquíferos da área de interesse são: reserva permanente: $5,31 \times 10^9 \text{ m}^3$; reserva reguladora: $260.500 \text{ m}^3/\text{dia}$; disponibilidade efetiva: $263.800 \text{ m}^3/\text{dia}$; disponibilidade atual: $140.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ e potencialidade: $290.000 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Estima-se que existam mais de 1.200 poços tubulares executados na sub-bacia do Salgado, dentro da Região do Cariri. Foi inventariado, por Veríssimo (1999), um total de 548 poços na área de interesse, mostrados na Figura 2, que estão distribuídos na proporção de 25,2% em Barbalha, 32% no Crato e 42,8% em Juazeiro do Norte, com densidade de $1,3 \text{ poço}/\text{km}^2$, compreendendo poços em situação de uso ou abandonados e do tipo privado ou público. A totalidade dos poços da unidade hidro-estatigráfica 3 (sistema aquífero médio) possui valores médios de profundidade e capacidade específica de 88 m e $2,7 \text{ (m}^3/\text{h)/m}$ respectivamente, produzindo as maiores vazões de bombeamento observadas na área, chegando até $300 \text{ m}^3/\text{h}$ no município do Crato. Cerca de 95% do abastecimento público das principais cidades da região é feito por poços tubulares ou fontes. Os poços são gerenciados, principalmente, pela CAGECE (Companhia de Água e Esgoto do Ceará), SAAEC (Sociedade Anônima de Água e Esgotos do Crato) e Prefeituras Municipais, sendo a taxa média de consumo "per capita" na região aproximada a $340 \text{ l}/\text{hab.}/\text{dia}$.

DADOS DE ENTRADA DO MÉTODO DE ELEMENTOS ANALÍTICOS

Para a modelagem com o método analítico são utilizados os seguintes dados de entrada:

Propriedades do aquífero: Cota da base do aquífero $[L] = 0 \text{ m}$ (referência de nível); Espessura do aquífero (saturada) $[L] = 110 \text{ m}$; Condutividade hidráulica regional $[L/T] = 7.32 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 0,264 \text{ m/h}$ (valor utilizado no modelo) e Porosidade efetiva = 0,2 ou 20%.

Os elementos analíticos utilizados para a área de interesse são 50 poços tubulares no sistema aquífero médio, com taxas de bombeamento $[L^3T^{-1}]$ conhecidas; 02 rios e 02 riachos, de carga hidráulica $[L]$ e gradientes, i , $[L.L^{-1}]$ conhecidos que são Rio da Batateira: $i = 0,00122 \text{ m/m}$; Rio Salamanca: $i = 0,00038 \text{ m/m}$; Riacho Fundo: $i = 0,00358 \text{ m/m}$ e Riacho dos Macacos: $i = 0,00358 \text{ m/m}$.

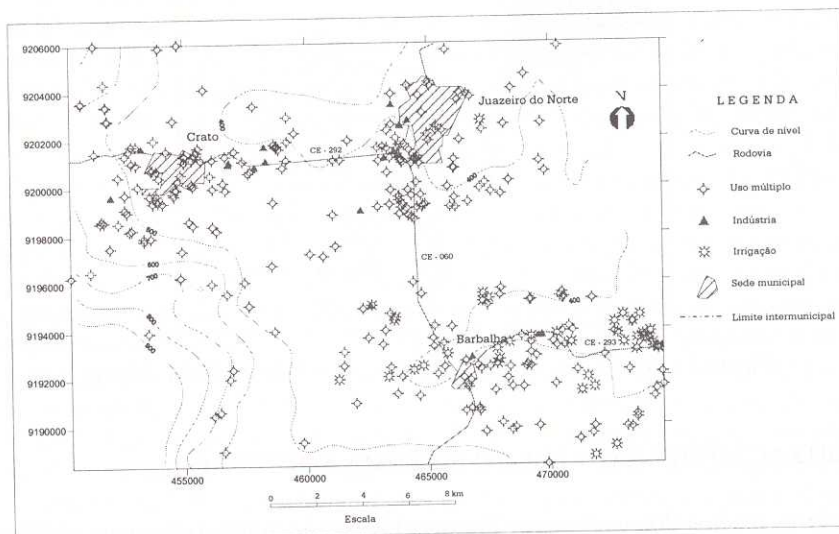


Figura 2 - Distribuição espacial dos 548 poços tubulares dentro da área de interesse.

O elemento área de recarga para a área de interesse que possui área total $[L^2]$ igual a $430.080.000 \text{ m}^2$ ($25.600 \text{ m} \times 16.800 \text{ m}$). A alimentação por recarga do sistema aquífero médio é procedida de duas maneiras principais: por infiltração direta pelas águas das chuvas e por contribuição das fontes.

O valor da taxa de recarga [LT^{-1}], segundo Mont'Alverne et al. (1996), devido à precipitação (970 mm/ano) na região é igual a $109,74 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou ainda $1,66 \text{ l/s/km}^2$. Considerando-se a contribuição (recarga), oriunda das fontes ou exutórios naturais do Sistema Aquífero Superior (Formação Exu/Arajara), que escoam superficialmente sobre os sedimentos do pediplano, propiciando uma infiltração de parte desse escoamento superficial. Este valor pode ser avaliado aproximadamente em $2,32 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Somando-se as duas contribuições chega-se a recarga total igual a $112,06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. A recarga total distribuída em toda a área de estudo (m^2) resulta na taxa de $0,0000297 \text{ m/h}$ que é o valor utilizado na modelagem.

A seleção dos poços para a modelagem reduz o número de 548 poços (Figura 2) para o total de 50 unidades (Figura 3), obedecendo aos seguintes critérios: em primeiro lugar são descartados os poços que estão fora de uso, não instalados, sem dados suficientes ou abandonados; em segundo lugar são selecionados apenas os poços públicos que são utilizados para abastecimento público dos três municípios e como terceiro critério são escolhidos aqueles que têm vazões de bombeamento maiores que $12 \text{ m}^3/\text{h}$. Cabe salientar que os poços públicos possuem dados de vazão mais confiáveis em comparação aos poços privados, pois são operados por empresas que fornecem os valores das vazões de bombeamento e os regimes de bombeamento. Já os poços privados, tendo em vista que a demanda nestes poços não é elevada, o proprietário do poço geralmente coloca uma bomba de baixo consumo energético e portanto de vazão bem inferior à capacidade do poço.

MODELANDO COM O MODFLOW / MODPATH

A modelagem utilizando os programas MODFLOW / MODPATH é realizada na mesma área objetivando a análise comparativa entre os resultados dos dois modelos. Maiores detalhamentos sobre a aplicação destes programas são considerados bem conhecidos pelos modeladores de água subterrânea e não são enfatizados nesta abordagem. Os dados de entrada utilizados para o método numérico são os mesmos para o método analítico. As diferenças que merecem ser destacadas são as seguintes: os rios (2) e os riachos (2) entram como condição de contorno do tipo carga constante especificada em todo os seus percursos e a discretização do domínio que resulta numa malha de 300×300 unidades, ficando o tamanho da célula aproximadamente igual a 85×56 metros (área = 4.760 m^2). Para a trajetória das partículas são escolhidas 02 partículas por poço com raio do círculo igual ao raio do poço e o tempo de captura igual ao do VBB. As condições para a execução do programa são regime de fluxo em estado permanente com carga inicial constante na camada, utilizando o WHS solver, recarga aplicada na célula mais alta da coluna vertical e uma única camada confinada com coeficiente de armazenamento, S , e transmissividade, T , constantes.

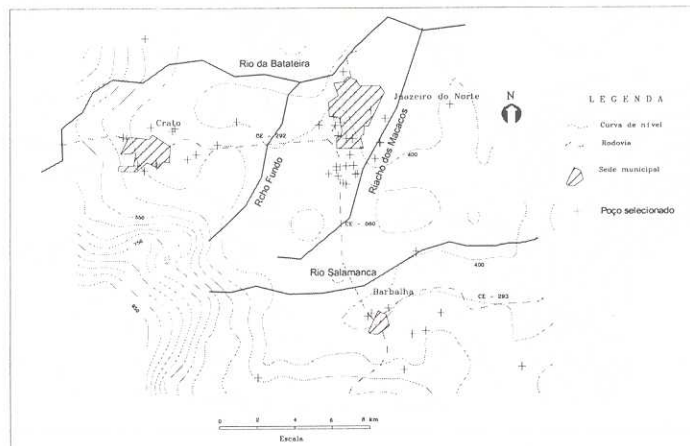


Figura 3 - Mapa da área de interesse com curvas de nível, localização dos municípios, rios, riachos e dos 50 poços selecionados

RESULTADOS

O programa SPLIT/VBB possui um recurso adicional que possibilita a seleção de todos os poços, ao mesmo tempo, através da aplicação da função "capturar todos". A Figura 4 apresenta as zonas de captura dos 50 poços selecionados, com 02 pontos com trajetórias de partículas distribuídas por poço, totalizando 100 partículas para um intervalo de tempo inicial de 05 anos (43.800 horas). Para esta condição mais desfavorável não foi considerada a área de recarga, ou seja, tem-se a estação seca.

Quando o intervalo de tempo das trajetórias das partículas dos poços aumenta para 10 anos (87.600 horas), sob as mesmas condições da Figura 4, obtêm-se na Figura 5 as zonas de captura dos 50 poços calculadas pelo SPLIT/VBB com 02 trajetórias de partículas por poço (100 partículas). Observa-se nesta figura que as zonas de captura dos poços estão divididas em três regiões distintas de rebaixamento do lençol freático que estão bem definidas, evidenciando que cada município possui a sua respectiva bateria de poços. Sendo 14 poços localizados no Crato, 26 em Juazeiro do Norte e 10 em Barbalha. Para o intervalo de tempo de 10 anos, as extensões dos traçados das zonas de captura destes 50 poços de abastecimento público, que estão localizados próximos aos rios e riachos, chegam a atingir estes cursos d'água superficiais que possuem índices de poluição comprovadamente elevados, como por exemplo, o Riacho dos Macacos, em Juazeiro do Norte, aumentando assim o risco de contaminação da água bombeada por estes poços.

As zonas de captura para o intervalo de tempo de 10 anos, juntamente com as curvas equipotenciais da área de interesse podem ser observadas na Figura 6. Esta figura tem também o objetivo de mostrar como é o resultado obtido originado diretamente do programa SPLIT/VBB.

O planejamento da preservação dos recursos hídricos para a área de interesse na questão relacionada à proteção das cargas nos poços de abastecimento público pode se basear em figuras do tipo das 4 a 6 originadas da aplicação do modelo analítico. Estes gráficos fornecem o delineamento das zonas de captura dos 50 poços selecionados para os períodos de 05 e 10 anos.

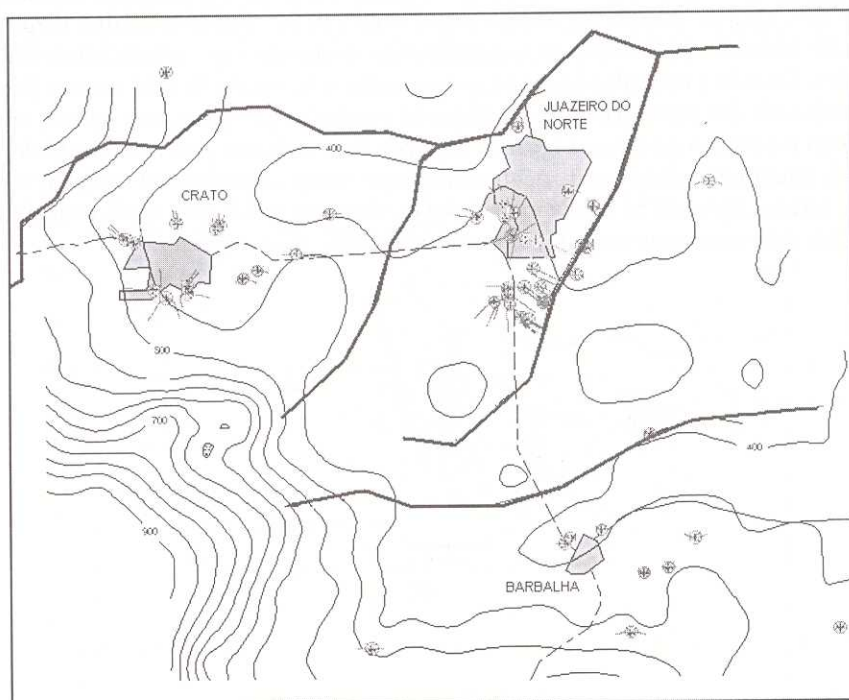


Figura 4 - Zonas de captura dos 50 poços calculadas pelo SPLIT/VBB (05 anos) com as curvas de nível da área de interesse.

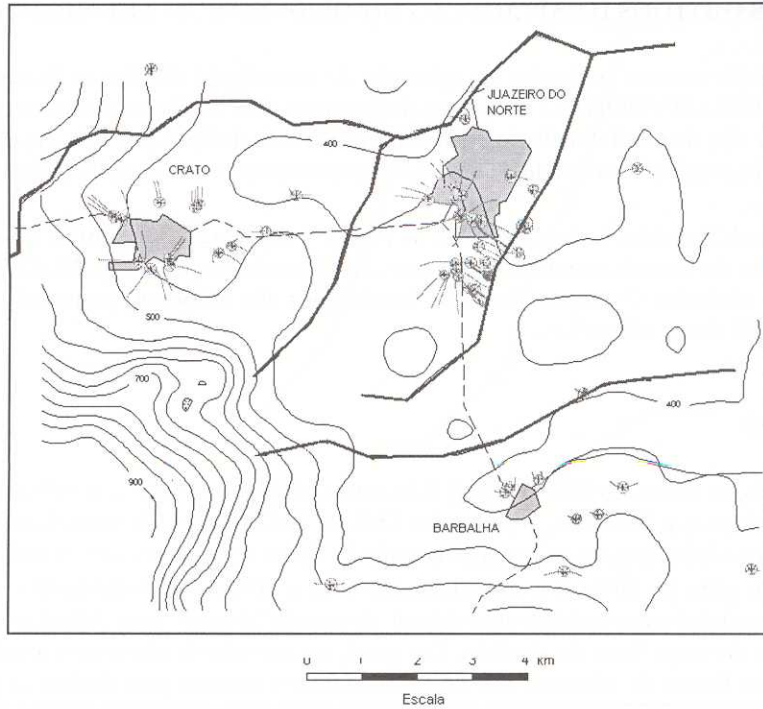


Figura 5 - Zonas de captura dos 50 poços calculadas pelo SPLIT/VBB (10 anos) com as curvas de nível da área de interesse.

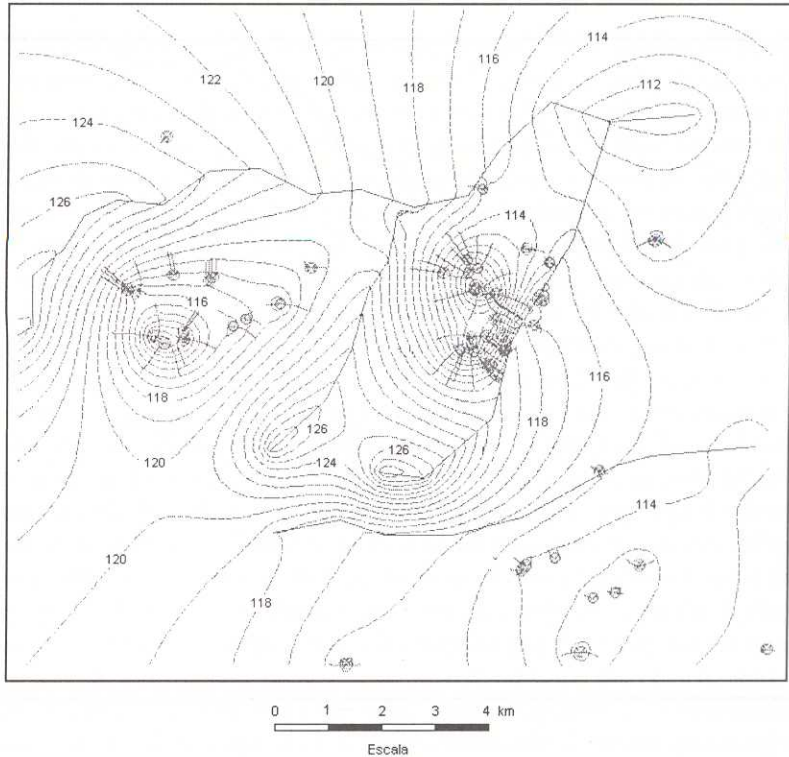


Figura 6 - Zonas de captura dos 50 poços com o traçado das curvas equipotenciais, em metros, originadas diretamente do SPLIT/VBB para o período de 10 anos.

RESULTADOS OBTIDOS DA APLICAÇÃO DO MODFLOW NA ÁREA DE INTERESSE

Os dados de entrada utilizados na aplicação do método de diferenças finitas, através dos programas MODFLOW/MODPATH na área de interesse, são os mesmos utilizados no SPLIT/VBB. Diante da não disponibilidade dos dados de resistência da base dos rios, os 02 rios e os 02 riachos são representados neste modelo como condições de contorno equivalentes às cargas hidráulicas constantes.

Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 8. A Figura 7 apresenta a representação do arranjo dos dados de entrada oriundo diretamente da aplicação do programa MODFLOW na área de interesse, os símbolos (+) representam as localizações dos 50 poços, constando também das curvas de nível, 02 rios e 02 riachos.

CONCLUSÕES

A entrada de dados do SPLIT/VBB é bastante facilitada devido à existência da interface gráfica do usuário para o Windows: o programa VISUALBLUEBIRD, eliminando assim a necessidade da formulação laboriosa de arquivos de entrada de dados. Os arquivos de entrada e de saída do SPLIT são feitos para permitirem a sua integração com o Sistema de Informação Geográfica. A construção do modelo fica reduzida a uma série de cliques de "mouse" para incluir, por exemplo, os poços tubulares do mapa base do modelo. Em geral, no método de elementos analíticos, apenas poucos dados na forma de números são necessários como entrada para definir as propriedades globais do aquífero e os níveis d'água nos rios e lagos. A entrada de dados no modelo MODFLOW requer mais tempo, ou seja, é mais laboriosa e o número de operações é bem maior do que no modelo analítico.

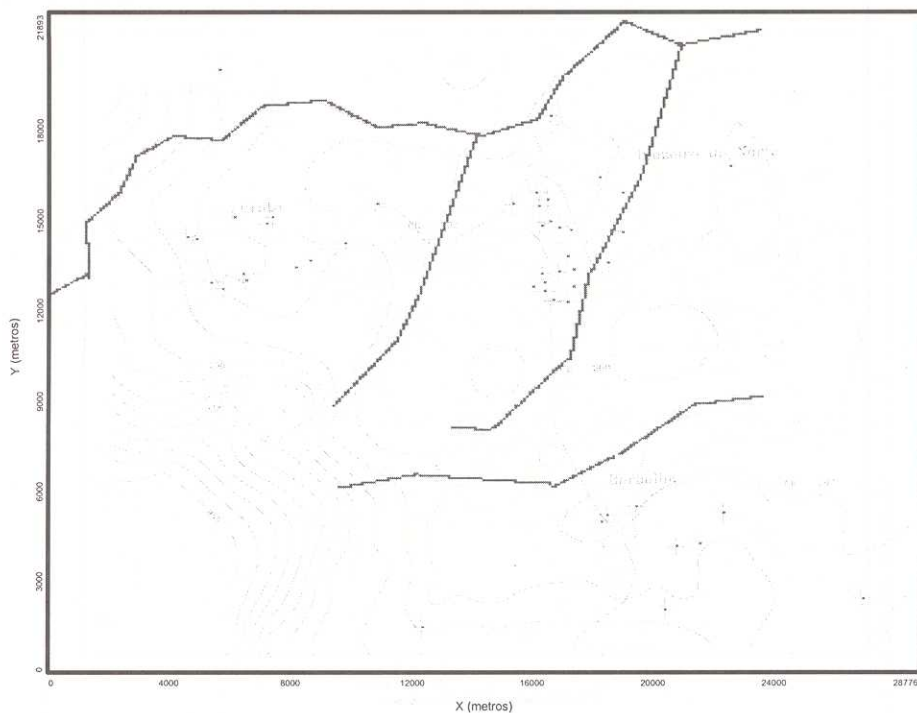


Figura 7 – Arranjo dos dados de entrada para da aplicação do MODFLOW na área de interesse, com curvas de nível.

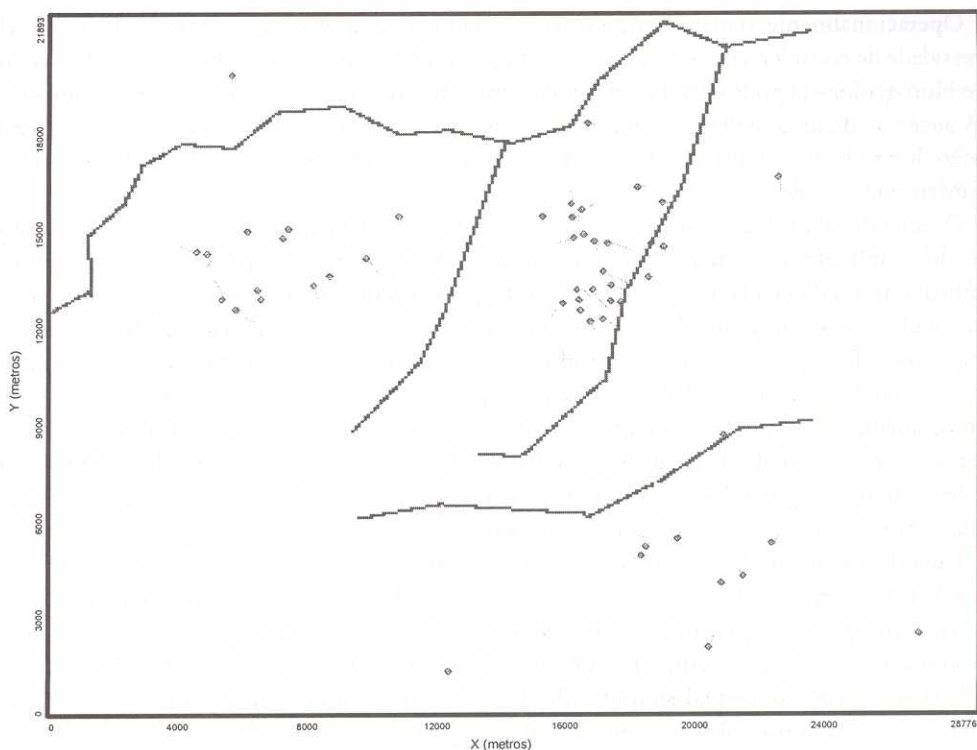


Figura 8 - Definição das zonas de captura dos 50 poços resultante da aplicação do MODPATH.

O método analítico tem como uma de suas características a facilidade de operação com relação à adição ou remoção rápida de elementos, tornando as construções de modelos muito fáceis, como também a realização rápida de alterações, possibilitando a observação, numa escala regional, da influência destes elementos no fluxo. O uso do método pode ser considerado muito dinâmico devido à obtenção de respostas instantâneas para as mudanças no arranjo do modelo e para a adição de novos elementos. As respostas rápidas para problemas de fluxo fazem com que mesmo um forte adepto do MODFLOW considere o método analítico um instrumento valioso para o desenvolvimento preliminar do modelo bidimensional. Quanto ao tempo de operação do modelo, fazendo-se uso do método analítico, em apenas poucas horas, pode-se chegar à solução de problemas bidimensionais complicados de fluxo de água subterrânea, enquanto que se fazendo a opção pelo método de diferenças finitas, para o mesmo problema, este pode levar dias ou semanas para ser resolvido porque o método numérico requer uma discretização precisa do domínio.

Como no método analítico não existe necessidade da discretização do domínio como nos métodos numéricos, pode-se modelar uma vasta área e continuar mantendo grande precisão em pequenas regiões do modelo. Não existe necessidade de definição arbitrária dos limites do modelo – devem apenas ficar afastados o bastante da área de interesse para que sejam atribuídas as condições de contorno reais no aquífero. O método de elementos analíticos não precisa de contorno do modelo como a grade do método de diferenças finitas ou a malha do método de elementos finitos. O ganho com este procedimento é que áreas relativamente pequenas poderão ser representadas por uma grade de alta resolução sem esforço computacional excessivo. Entretanto, as condições especificadas na grade de contorno irão influenciar significativamente na solução do fluxo subterrâneo na área modelada. Onde as cargas piezométricas observadas deveriam apenas ser utilizadas para a validação dos resultados da modelagem, elas agora são também utilizadas para forçar o modelo a reproduzir o que é observado.

Operacionalmente, o método de elementos analíticos se apresenta bastante eficiente, pois não há necessidade de considerações sobre os arranjos para modelar a malha ou rede de elementos; ao invés disso, o hidrogeologista pode entrar com características hidrológicas e geológicas diretamente no modelo. A ausência de uma malha ou uma rede de elementos também elimina o compromisso entre a resolução do modelo e o tamanho da área do modelo. Desta maneira, o modelo analítico é relativamente insensível à escala.

O tamanho da célula da grade ou malha exerce uma influência significativa na precisão do cálculo dos parâmetros no método de diferenças finitas, pois neste modelo a carga hidráulica é determinada no nó da célula que pode estar localizado no centro ou não da célula. Quanto maior a área da célula, menos aproximada da realidade será a resposta. Nos modelos analíticos de forma fechada (closed-form) as soluções são contínuas e diferenciáveis em qualquer ponto, portanto são exatas e nos modelos analíticos baseados no princípio da superposição, que é o caso do método de elementos analíticos, as soluções são aproximadas no ponto. Na aplicação do MODFLOW, na área de interesse, a malha escolhida foi de 300 x 300 unidades, ficando cada célula medindo aproximadamente 85 x 56 metros, ou 4.760 m², sendo necessário interpolações para a determinação das cargas hidráulicas em outros pontos, aumentando ainda mais as imprecisões.

Uma desvantagem do método de elementos analíticos em relação ao método de diferenças finitas é o uso de muitas suposições como o que há muito tempo tem-se utilizado nas soluções analíticas, como por exemplo, na metodologia de Theis. Estas suposições utilizadas pelo modelo para resolução do sistema são, como por exemplo, a de Dupuit-Forchheimer e o uso de potencial de carga. Mas o modelo conceitual simplificado de um aquífero homogêneo pode também fornecer informações importantes sobre o sistema real de aquíferos múltiplos, fornecendo resultados da modelagem para serem apropriadamente interpretados.

Embora a solução básica em cada elemento, no método de diferenças finitas, satisfaça a equação diferencial original, não é garantida nenhuma continuidade do fluxo através dos elementos. Conseqüentemente, as soluções de diferenças finitas, onde a equação diferencial é aproximada não satisfazem a continuidade regional do fluxo automaticamente. De fato, uma revisão na continuidade do fluxo é sempre utilizada para determinar se o procedimento numérico converge ou não para uma solução válida. Já o método de elementos analíticos fornece uma solução analítica composta para o problema de fluxo regional que satisfaz a equação diferencial em qualquer lugar, sendo garantida a continuidade do fluxo e satisfazendo, exatamente, o balanço hídrico do domínio. As cargas e as velocidades do fluxo da água subterrânea são definidas em qualquer ponto no domínio do fluxo; então, não haverá dispersão numérica resultante de imprecisão das velocidades do fluxo de água subterrânea. Outras limitações do método de elementos analíticos que podem ser citadas são, por exemplo: o fluxo transiente e tridimensional que são implementados apenas parcialmente, a variação gradual das propriedades do aquífero não pode ser representada no modelo analítico e ele não abrange fluxo em aquíferos múltiplos, mas, dependendo das circunstâncias e do objetivo da modelagem, estes fenômenos podem ser importantes ou não.

O programa SPLIT/VBB foi aplicado na área de interesse com 50 poços, com o objetivo de determinar o delineamento das zonas de captura de todos os poços através da determinação das trajetórias das partículas, todos ao mesmo tempo, para períodos de 05 e 10 anos. Com isso foi possível demonstrar que o programa funciona para o mapeamento (traçado) das zonas de captura dos poços, podendo auxiliar, tecnicamente, os planos de proteção de cargas dos poços nas baterias de abastecimento público dos três municípios da Região do Cariri. A aplicação prática e rápida do modelo analítico para aquíferos regionais ajuda nas ações de planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos associados a uma política de uso disciplinado e proteção do manancial subterrâneo, tendo como conseqüência o equacionamento da oferta e demanda de água em regiões com conflitos, sem comprometimento do potencial quantitativo e qualitativo das águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling**. San Diego: Academic Press, 1992. 381p. il.
- ATLAS dos recursos hídricos subterrâneos do Ceará: Programa Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará. Fortaleza: CPRM / Serviço Geológico do Brasil, 1999. 1 CD-ROM.
- BLANDFORD, T. N.; HUYAKORN, P. S. **WHPA**: a modular semi-analytical model for delineation of wellhead protection areas. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency/Office of Ground-water Protection, 1990. Technical report.
- CABRAL, J. J. da S. Pereira; DEMETRIO, J. G. Alves. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: **Hidrogeologia - conceitos e aplicações**. 2 ed. Fortaleza: CPRM/REFO. LABHID-UFPE, 2000. cap. 15, p. 369-391. il.
- EVERS, Sarah; LERNER, D. N. How uncertain is our estimate of a wellhead protection zone? **Ground Water**, Westerville, v. 36, n. 1, p. 49-57, Jan./Feb. 1998.
- FITTS, C. R. Well discharge optimization using analytic elements. **Ground Water**, Westerville, v.32, n. 4, p. 547-550, 1994.
- HAITJEMA, H. M.; KRAEMER, S. R. A new analytic function for modeling partially penetrating wells. **Water Resources Research**, Washington D.C., v. 24, n. 5, p. 683-690, 1988.
- HAITJEMA, H. M. Groundwater Flow Modeling. In: LEHR, Jay. **Standard handbook of environmental health, science, & technology**. New York: McGraw-Hill, 2000, cap 8.2, p. 8.11-8.25.
- HARR, Milton E. **Groundwater and seepage**. New York: Dover, 1990. 315 p., il.
- HUNT, R. J.; ZHENG, C. **Debating complexity in modeling**. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Electronic Supplement, v. 80, n. 3, p. 29, Jan. 1999. Disponível em: < <http://hydro.geo.ua.edu/Archive/EosSummary.htm> >. Acesso em: 02 jul. 2002.
- JANKOVIC', Igor. **SPLIT Manual - Version 2.3**. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering. University at Buffalo, USA. 2001. Disponível em: < <http://www.groundwater.buffalo.edu> >. Acesso em: 05 jun. 2001.
- KELSON, V. A.; HUNT, R. J.; HAITJEMA, H. M. Improving a regional model using reduced complexity and parameter estimation. **Ground Water**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 1-12, Jan./Feb. 2002.
- LINDSEY, G.; WITTMAN, J.; RUMMEL, M. Using indices in environmental planning: evaluating policies for wellhead protection. **Journal of Environmental Planning and Management**, Tyne, UK, v. 40, n. 6, p. 685-703, 1997.
- LUTHER, K. H.; HAITJEMA, H. M. An analytic element solution to unconfined flow near partially penetrating wells. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 226, n. 3-4, p. 197-203, 1999.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**. Washington: Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geol. Survey. 1988. Book 6. Chap. A1.
- MONT'ALVERNE, A. A. F.; PONTE, F. C.; DANTAS, J. R. A.; LOPES, C. F.; MELO JÚNIOR, A. H.; PONTE, J. S. A.; FILGUEIRA, J. B. M.; SOUZA, S do R.; SILVA, E. C. C. da. **Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe**. Fase I. Recife: DNPM, 1996. 101 p. il.
- POLLOCK, D. W. **User's guide for MODFLOW/MODPATH-PLOT, Version 3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW**. Reston, VA: The U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. 1994.
- STRACK, Otto D. L. **Groundwater mechanics**. New Jersey: Prentice-Hall, 1989, 732 p.

- _____. Principles of analytic element method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 226, p. 128-138, 1999.
- VERÍSSIMO, L. S. **A importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento socioeconômico do eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental – Estado do Ceará.** 1999. 140 f. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia) - Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- WITTMAN, J.; HAITJEMA, H. M. **Delineation of wellhead protection areas in Marion County, Indiana.** Indianapolis: Center for Urban Policy and the Environment – CUPE, 1995. Technical Report 95-E14.