

SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS DO AQUÍFERO BARREIRAS NA REGIÃO DA LAGOA DO BONFIM RN POR ELEMENTOS ANALÍTICOS

José Anderson do N. Batista¹; Harry Edmar Schulz¹; Edson Wendland¹

Resumo – No Estado do Rio Grande do Norte, o aquífero Barreiras constitui-se no principal manancial subterrâneo, sendo estimado para o ano de 2020 um crescimento de 35% sobre a atual demanda do aquífero. Nesse contexto, o escoamento subterrâneo na região da Lagoa do Bonfim tem sido amplamente estudado em função da implantação e ampliação da infra-estrutura hídrica na região. O objetivo principal deste trabalho é contribuir para o conhecimento do escoamento no aquífero Barreiras e demonstrar a funcionalidade do Método de Elementos Analíticos (AEM) em aquíferos estreitos, com uma aplicação do método combinado ao clássico Método de Imagens. Embora o balanço hídrico da Lagoa seja ainda uma questão aberta, os resultados indicam uma redução de 0,60m no nível de Lagoa do Bonfim devido à captação feita na região.

Abstract – In Rio Grande do Norte State, Barreiras aquifer is the most important groundwater reservoir. Local water resources planning for year 2020 estimates a raise of 35% on demands in that aquifer. In this sense, groundwater flow in Bonfim Lake area has been hardly studied in order to evaluate how groundwater pumping interacts to surface water. The main objective in this work is to contribute to groundwater flow knowledge in the area and secondly to demonstrate the Analytic Element Method (AEM) functionality in strait aquifers using the method coupled to the classical Image Method. Although water budget in Bonfim Lake is still an open question, results can give an approximation of the pumping effect over the local water bodies.

Palavras-chave – Lagoa do Bonfim, Elementos Analíticos, Método de Imagens

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP). End: Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, São Carlos-SP, Cep 13566-590, Tel (16) 273-9555, Fax (16) 273-9550, e-mail: nbatista@sc.usp.br.

INTRODUÇÃO

O escoamento subterrâneo na região da Lagoa do Bonfim tem sido amplamente estudado em função da implantação e ampliação da infra-estrutura hídrica na região. Com o objetivo de fornecer $5.133,92 \text{ m}^3/\text{h}$ para o abastecimento de uma população de 815.511 hab, localizada nas regiões Agreste e Sertão do Estado do Rio Grande do Norte, foi iniciado em 1997 um dos maiores programas de abastecimento realizados no Estado. O sistema adutor Trairi/Potengi, por sua vez, integra-se ao programa, atendendo 226.336 hab e uma demanda de $1.628,35 \text{ m}^3/\text{h}$. A captação do sistema Trairi/Potengi é feita na região da Lagoa do Bonfim situada no litoral leste do Estado sobre o aquífero Barreiras (Figura 1) operando de forma mista, com poços tubulares e bombeamento direto da Lagoa.

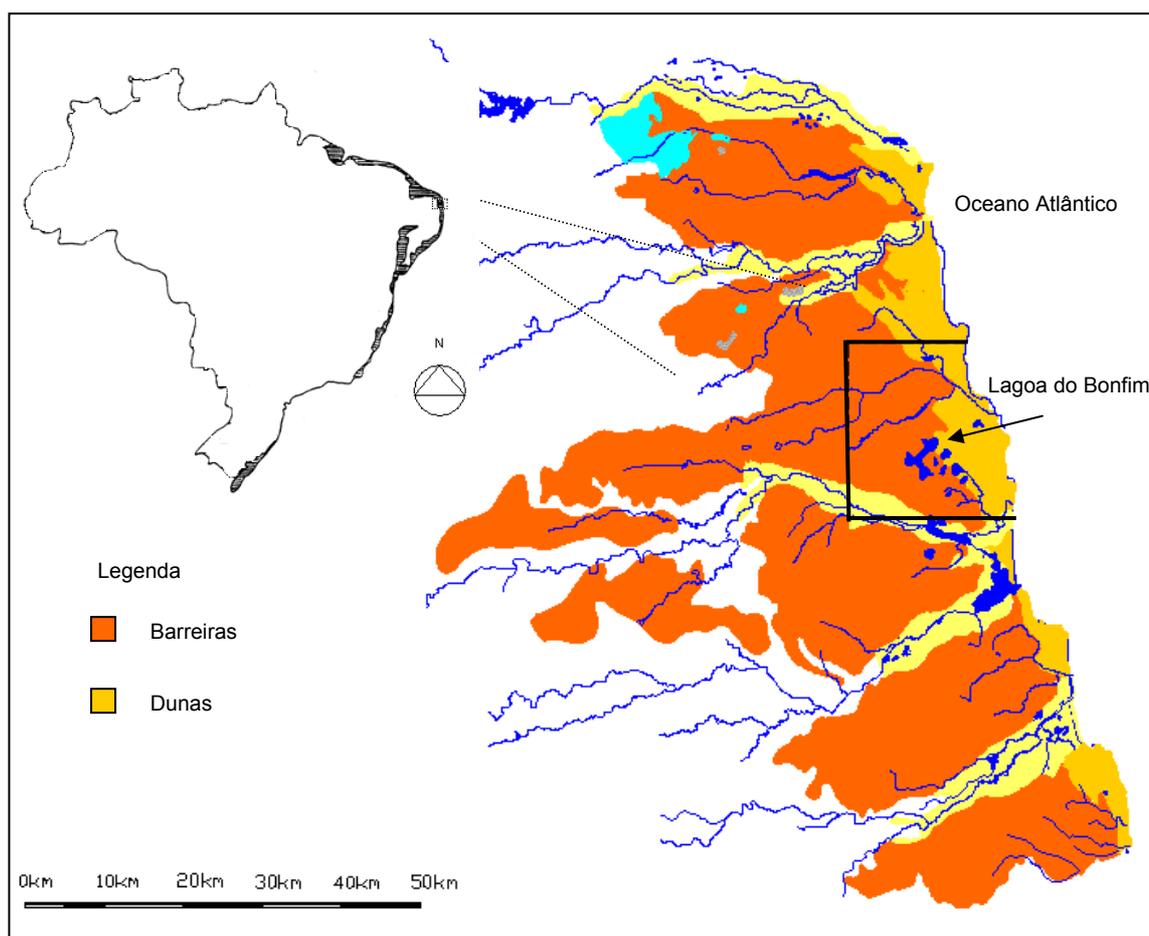


Figura 1 – Localização da Área de Estudo (Fonte: SERHID/RN)

Estudos hidrogeológicos concluíram pela perfuração dos poços em uma região a montante da Lagoa [1]. Com a configuração de um expressivo rebaixamento do nível de água na Lagoa do Bonfim, novas opções de perfuração foram investigadas para o suplemento do sistema e redução do impacto acarretado à Lagoa [2].

O aquífero Barreiras constitui-se no principal manancial subterrâneo do Estado, fornecendo atualmente cerca de 12.803,60 m³/h. Até o ano de 2020, é estimado ainda um crescimento de 4.550,54 m³/h, ou seja de 35%, sobre a atual demanda do aquífero [3]. Trabalhos anteriores têm abordado o escoamento subterrâneo na região da Lagoa do Bonfim utilizando-se de métodos de campo (monitoramento) [4], numéricos [2] e de balanço hídrico [5, 6], buscando descrever o comportamento natural do escoamento e avaliar os impactos da captação de água na região.

O Método de Elementos Analíticos (AEM) tem sido desenvolvido especificamente para problemas de escoamento subterrâneo, embora sua formulação permita a aplicação para qualquer campo vetorial [7]. Embora os primeiros resultados do método tenham sido obtidos já nos anos setenta [8, 9], o AEM tem crescido com maior intensidade desde os anos noventa, com importantes contribuições para o método [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Diversas aplicações também têm demonstrado a utilização do método em comparação a outras técnicas [20, 21]. Por ser um método aplicável a domínios abertos, o AEM torna-se especialmente adequado em problemas de escala regional. O leitor interessado poderá encontrar apresentações detalhadas de aplicações do método disponíveis em diversas páginas da Internet (<http://www.pca.state.mn.us/water/groundwater/metromodel.html>; http://www.epa.gov/ATHENS/publications/reports/EPA_600_R00_022.pdf; etc.).

Uma das facilidades essenciais encontradas no método é a compatibilidade com técnicas analíticas clássicas, como técnicas de mapeamento, Método de Imagens, etc [22]. Com o objetivo de contribuir para o conhecimento do escoamento no aquífero Barreiras e demonstrar a funcionalidade do AEM em aquíferos costeiros, este trabalho apresenta uma aplicação do método combinado com o clássico Método de Imagens para a região da Lagoa do Bonfim. Por se tratar de um método clássico, a apresentação do Método de Imagens não pertence ao escopo deste trabalho. A seguir são apresentadas uma revisão de estudos realizados na região, uma breve apresentação do AEM, a modelagem com o auxílio do Método de Imagens e uma breve discussão dos resultados obtidos com o modelo para a interação entre as águas subterrâneas e superficiais na região.

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

A construção da adutora Trairi/Potengi propiciou a contratação de vários estudos de consultoria [1] e promoveu a construção de uma densa rede de monitoramento piezométrico e hidrológico que tem gerado uma extensiva massa de dados.

Com o objetivo de caracterizar o comportamento hidráulico e hidrológico do aquífero do sistema lacustre Bonfim, PEREIRA [23] realizou um conciso levantamento bibliográfico a respeito da hidrogeologia da região e identificou importantes conexões hidráulicas e parâmetros hidrogeológicos. Segundo PEREIRA [23], estas lagoas teriam sido formadas em uma zona de recarga do aquífero. A recarga em aquíferos do litoral norterio-grandense é ainda uma incógnita, embora diversos estudos tenham buscado correlações entre precipitação e descargas de base nos corpos de água [23,1].

Segundo PEREIRA *et al.* [4], o escoamento em torno da Lagoa do Bonfim é ainda um tema aberto. Uma vez que não existem sinais de processo erosivo em seu entorno, entende-se que sua alimentação seja preponderantemente subterrânea ou atmosférica. Dessa forma, os diversos trabalhos já realizados não são unânimes a respeito do balanço hídrico anual médio na Lagoa, que é decisivo para a avaliação de impactos da operação do sistema adutor Trairi/Potengi sobre a mesma.

MANUEL FILHO e CASTRO [2] realizaram uma avaliação numérica das condições de exploração do aquífero na região considerando três cenários. O primeiro cenário inclui apenas a bateria de poços existentes (130L/s) mais 100L/s retirados da Lagoa do Bonfim. No segundo, 12 poços (250 L/s) são adicionados ao sistema na área chamada Canjoão (Figura 2). No terceiro cenário, são considerados 8 poços (250 L/s) na área chamada Boacica (Figura 2) além dos existentes. Na Figura 2 é apresentado o resultado obtido por MANUEL FILHO e CASTRO [2] usando o método de diferenças finitas proposto. A distribuição de cargas hidráulicas configura um comportamento influente para a Lagoa do Bonfim.

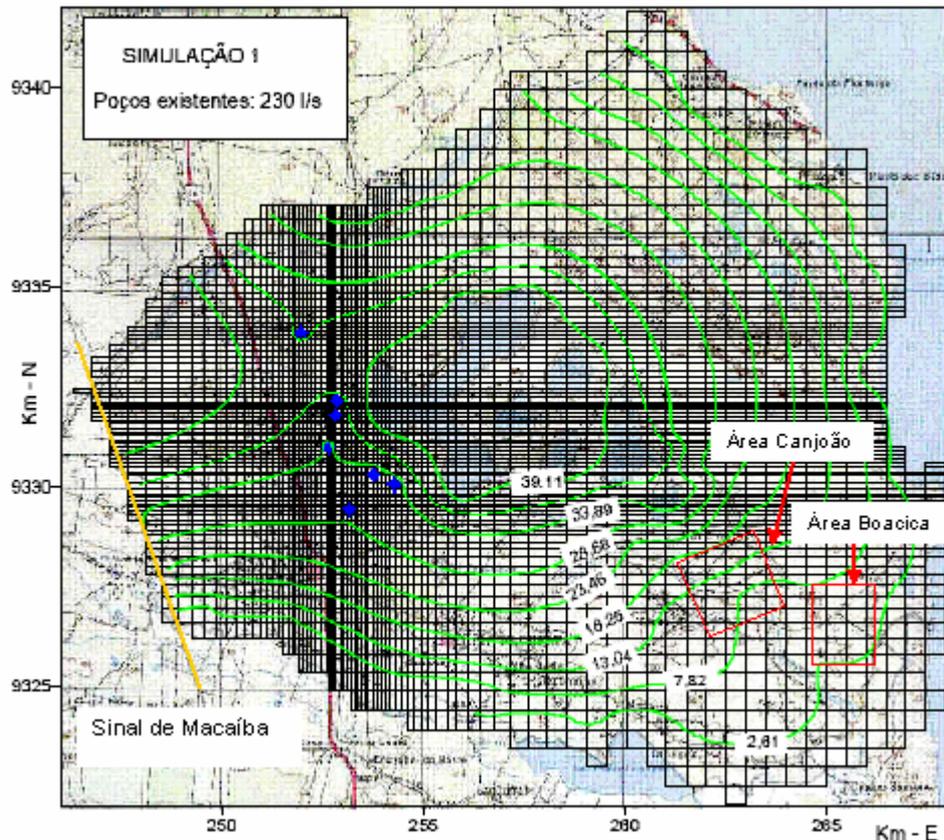


Figura 2 – Simulação FDM da piezometria da região da Lagoa do Bonfim (Fonte: MANUEL FILHO & CASTRO [2])

A área simulada foi compreendida entre os seguintes contornos hidrogeológicos. Afloramento do cristalino a oeste ao longo do lineamento pelo Sinal Macaíba, simulado como impermeável; o oceano Atlântico, a leste, simulado como limite de carga conhecida; o riacho Pium ao norte e o rio Trairí ao sul, ambos simulados como contornos do terceiro tipo (com estimativa da condutância). Os riachos foram considerados também como contornos do terceiro tipo. As lagoas foram simuladas como “limites de carga geral”, nível de água conhecido, portanto, condição do primeiro tipo. Por fim, os sete poços tubulares em operação receberam suas respectivas descargas como sumidouros. A condutividade hidráulica (K) foi definida igual a $10,0 \text{ m/d}$, considerando o domínio homogêneo e isotrópico. A recarga foi atribuída em $6,6E-4 \text{ m/dia}$. Neste trabalho será considerada apenas a condição atual do sistema (primeiro cenário).

O MÉTODO DE ELEMENTOS ANALÍTICOS

O Método de Elementos Analíticos (AEM) foi concebido como uma alternativa para problemas de escoamento em aquíferos de escalas regionais sem a perda de detalhes locais [8]. O método é baseado no uso de soluções (analíticas), aproximadas para elementos hidrogeológicos que se constituem nas “peças” do modelo do aquífero, trazendo mais precisão no cálculo e economia computacional.

Conceitos em AEM

Diferentemente de qualquer método de aproximação por discretização do domínio, o Método de Elementos Analíticos parte de soluções analíticas de “problemas elementares” que serão inter-relacionadas pela superposição do efeito de cada elemento (Figura 3). Dessa forma, as *soluções elementares* serão expressas por funções analíticas que satisfazem a equação da continuidade para os contornos de cada problema elementar que se apresenta sobre o aquífero.

A técnica faz lembrar o clássico método de integração dos elementos de contorno (BEM). A diferença está em que as soluções utilizadas no BEM são obtidas numericamente por integrais de contorno do tipo Cauchy sobre contornos sempre fechados. Em um modelo de elementos analíticos, as soluções não são necessariamente integrais de Cauchy, tendo sido desenvolvidas, por exemplo, por mapeamento conforme. Dessa forma, um programa computacional de AEM é simplesmente um gerenciador de expressões matemáticas desenvolvidas adequadamente para a implementação no método. Na construção de um modelo de elementos analíticos, os elementos são adotados a critério do modelista, escolhendo a função (solução elementar) que melhor satisfaz cada condição de contorno encontrada no domínio (aquífero).

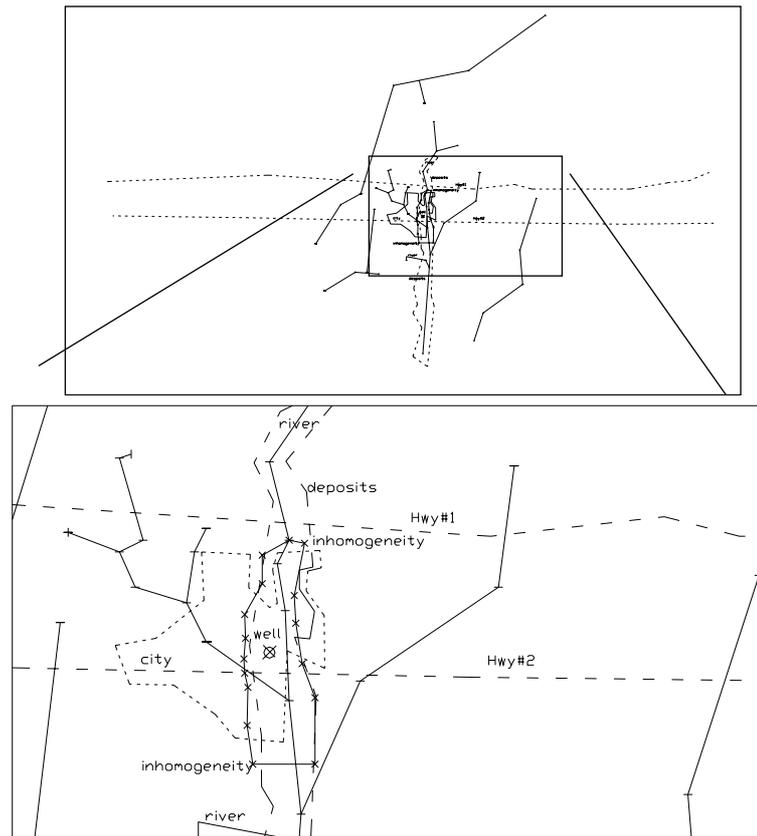


Figura 3 – Detalhamento da área de interesse no interior de um modelo de elementos analíticos. Sinais ao longo das linhas cheias indicam extremidades de elementos *line-sinks* e *line doublets* – (Fonte: Haitjema [24])

Existe uma significativa diversidade de funções desenvolvidas com base no conceito de elementos analíticos. Elas representam “esforços” como poços, linhas fontes/sumidouros (*line sinks*), fontes/sumidouros em círculo (*sink discs*), linhas de heterogeneidade (*line doublets*), etc. Elementos *line-doublets* são utilizados para a representação de descontinuidades encontradas nas propriedades do meio aquífero. A representação de contornos de corpos de água e outras formas de fonte/sumidouro pode ser obtida com os elementos *line-sink*. Vale salientar que esses elementos podem expressar os três tipos de condições de contornos (*Dirichlet*, *Neuman* e *Cauchy*). A aplicação de *area-sink* pode ser útil tanto para a representação de áreas de diferentes valores de recarga/descarga, como para a representação de áreas semi-permeáveis entre aquíferos. Nas Figuras 4, 5 e 6 apresenta-se os efeitos gerados respectivamente pelos elementos *line-doublet*, *line-sink* e *area-sink*.

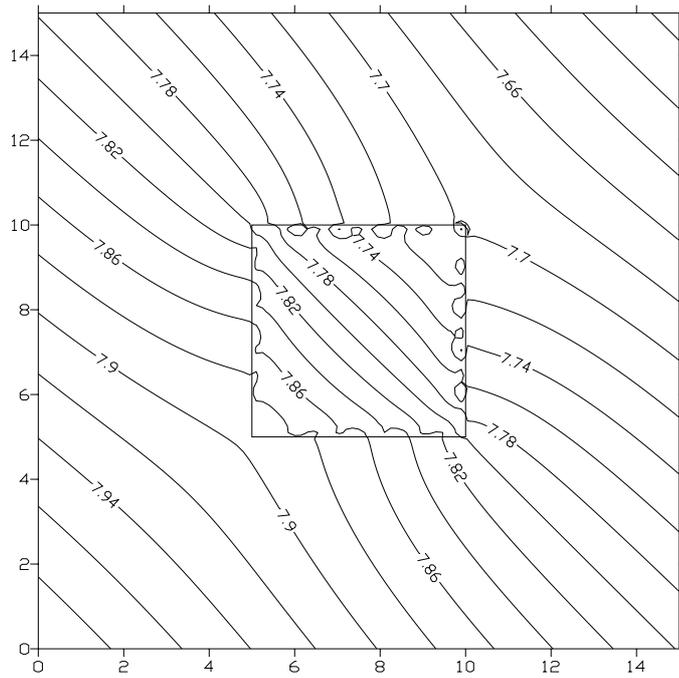


Figura 4 – Distribuição piezométrica produzida por um campo uniforme através de região de menor condutividade hidráulica.

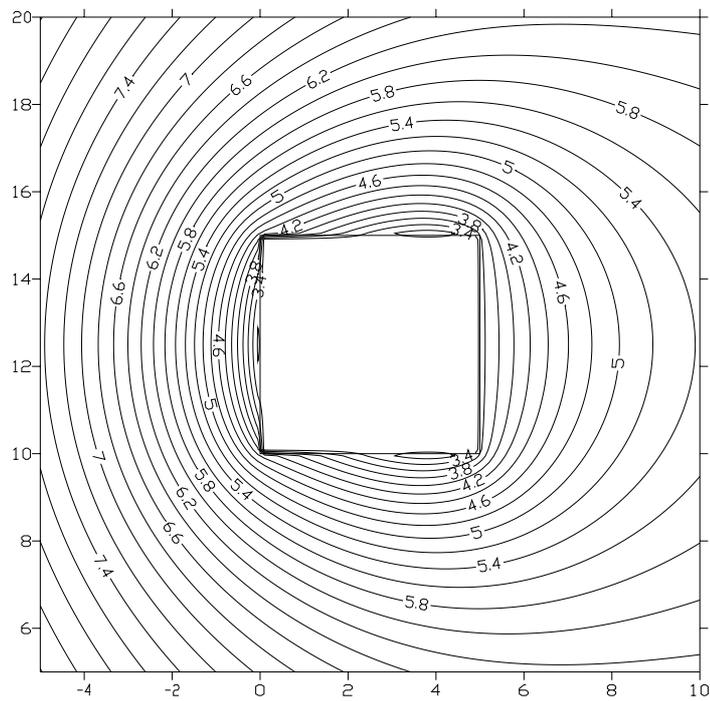


Figura 5 – Distribuição piezométrica produzida por um lago efluente em um campo uniforme

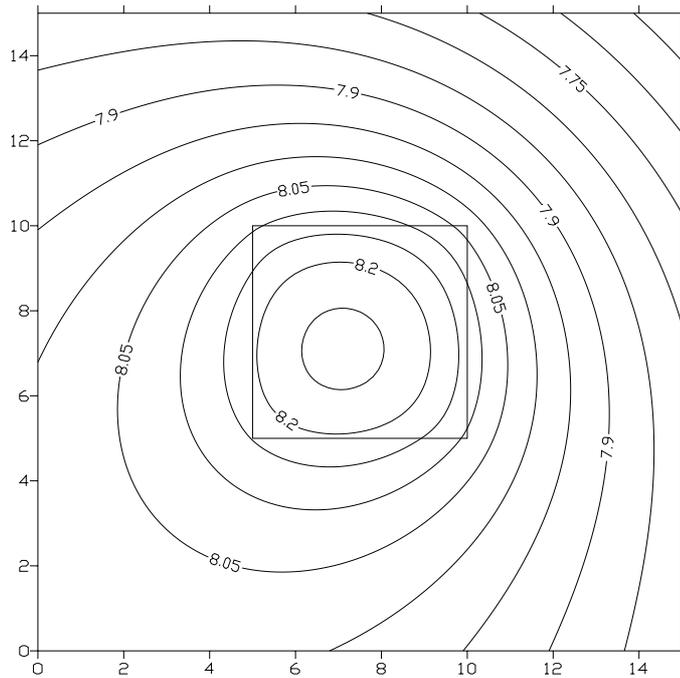


Figura 6 – Distribuição piezométrica de uma área de recarga polygonal

MODELAGEM DO ESCOAMENTO REGIONAL NA ÁREA

Formação Barreiras

O aquífero Barreiras estende-se por uma longa faixa com largura de aproximadamente 30Km ao longo da costa de vários Estados do Nordeste brasileiro. Os contornos globais do aquífero, em toda sua extensão, são dados pela fronteira com a linha de costa e com o afloramento do cristalino na direção do interior continental. Observando-se o fato de que a geometria da costa e do afloramento segue uma tendência linear durante um trecho bastante longo, essas fronteiras são aqui aproximadas por linhas retas (Figura 7).

Sendo essa uma abordagem global do aquífero, as propriedades do meio (condutividade K e profundidade da base b) e a recarga (N) são representadas uniformemente distribuídas. A expressão para esse escoamento é dada pela fórmula do escoamento unidimensional entre dois drenos (Figura 8):

$$\Phi = -\frac{N}{2} X^2 + NLX + \Phi_0 \quad (1)$$

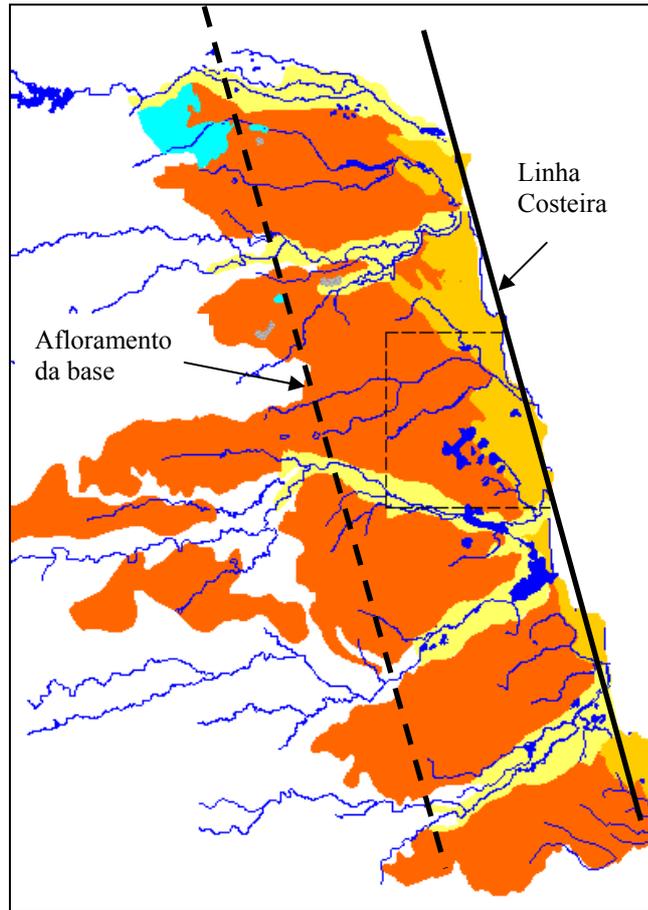


Figura 7 – Aproximação regional para a faixa de aquífero

Onde L [L] é a distância entre a fronteira impermeável e a fronteira permeável; Φ_0 [L^3T^{-1}] é o potencial de descarga na fronteira permeável ($\Phi_0 = \frac{K}{2} h_0^2$, onde h_0 é a carga piezométrica); e X [L], é a posição na direção perpendicular entre as fronteiras em relação ao dreno. A expressão é utilizada no plano horizontal na forma a seguir, onde ξ e η são as componentes da distância do ponto de referência até a posição considerada no sistema de coordenadas e α a rotação das fronteiras em relação à direção vertical.

$$\Phi = -\frac{N}{2}(\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha)^2 + NL(\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha) + \Phi_0 \quad (2)$$

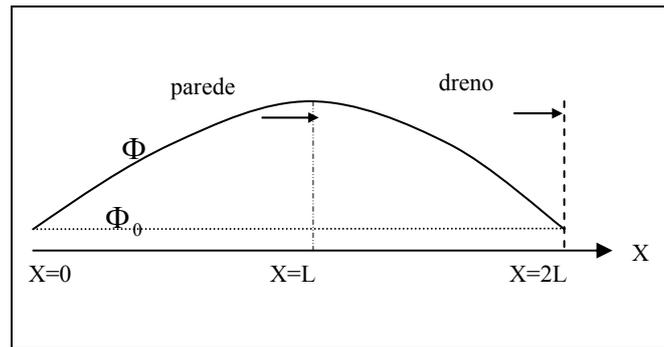


Figure 8 – Esquema hidráulico para a equação (1)

Pode-se observar que, nesta etapa da construção do modelo, a abordagem global do aquífero pode ser feita de uma maneira bastante simplificada, onde os efeitos encontrados na escala local não estão ainda representados. Os parâmetros adotados no presente estudo são encontrados em PEREIRA [23] e MELO & FEITOSA [1]: $K = 10,0$ *m/dia* e $b \approx -20m$. Com base em dados que compreendem um período de dois anos a taxa de recarga (N) tem sido estimada em torno de $20,0$ *mm/mês*. No entanto, a estimativa não será aqui extrapolada como valor médio de recarga, mas será calibrada como o valor que propicia níveis de água medidos antes do início da operação do sistema adutor.

A representação global do aquífero neste caso está caracterizada por contornos abertos, ou seja, por linhas de comprimento “infinito”. A imposição desses contornos aos efeitos presentes no interior do aquífero, requer a aplicação do Método de Imagens [22] àquelas fronteiras, replicando-se os elementos utilizados. A aplicação de tais elementos ao modelo é feita conforme apresentado na seção seguinte. A sistematização e a aplicabilidade do Método de Imagens em modelos de elementos analíticos será tratada em trabalhos futuros.

Formação Dunas

A Formação Dunas e a Formação Barreiras compõem um único aquífero chamado Dunas-Barreiras ou Barreiras. A Formação Dunas é encontrada junto à linha de costa sobre a Formação Barreiras apresentando condutividade hidráulica $K = 3,2$ *m/dia* [1]. Os contornos da Formação Dunas são traçados, distribuindo-se elementos *line-doublets* em concordância com a aproximação global feita para o aquífero Barreiras conforme

ilustrado na Figura 9. Valores de recarga e de profundidade da base foram adotados iguais aos da formação Barreiras.

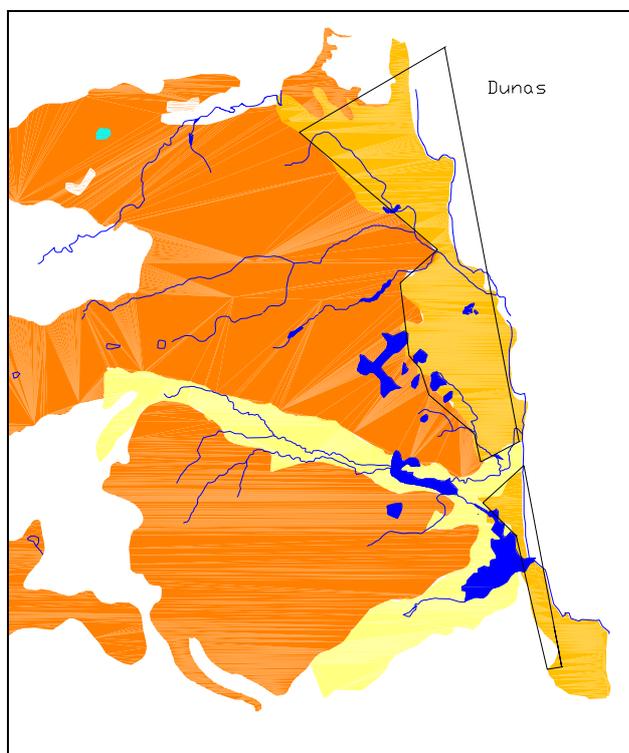


Figura 9 – Definição de elementos na formação Dunas

Hidrografia, poços e recarga

A distribuição de riachos, lagoas e poços no modelo é ilustrada na Figura 10. A distribuição dos rios estende-se, em relação à Lagoa do Bonfim, por uma distância de aproximadamente 25 Km, nas duas direções globais do aquífero. A condição de contorno utilizada é do primeiro tipo, ou seja, cargas hidráulicas conhecidas, aproximadas pela topografia das margens dos rios. Os elementos utilizados são *line-sinks*.

A Lagoa do Bonfim é representada no modelo com a condição do segundo tipo na simulação do cenário natural do escoamento, não sendo considerada a presença de pequenas lagoas pela pouca expressividade dos seus balanços hídricos. O cenário da captação atual é obtido adicionando-se o bombeamento superficial médio observado entre jul/00 e mar/02 ($\bar{Q} = 9.367,2\text{m}^3/\text{dia}$) ao balanço hídrico médio do período entre nov/98 e mar/02 dado na Lagoa igual a $8.352,7\text{m}^3/\text{dia}$. Os poços são ilustrados por

cruzes na Figura 10 e suas vazões de bombeamento médias observadas no período entre jul/00 e mar/02 são apresentadas na Tabela 2.

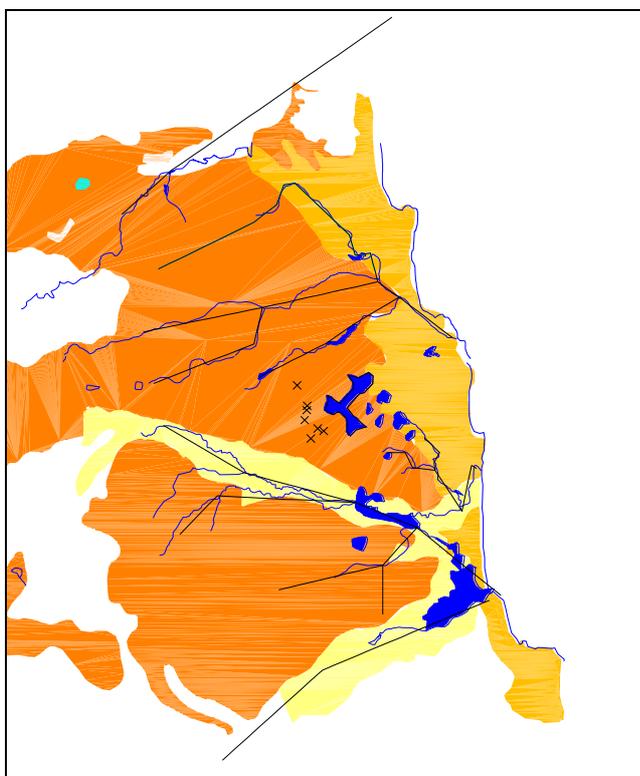


Figura 10 – Contornos de elementos sobre hidrografia e poços

O valor da recarga regional foi obtido de forma a ajustar o nível da Lagoa do Bonfim ao nível de água medido antes do início da operação do sistema, igual a 41,77m. O valor encontrado (27,0 mm/mês) é 35% superior ao utilizado em trabalhos anteriores [2]. Entretanto, considerando-se a escassez de estudos acerca deste parâmetro diante de sua variabilidade espacial e temporal, o valor aqui obtido pode ser utilizado como uma verificação da sua ordem de grandeza.

Tabela 2 – Localização e vazões dos poços da adutora

Poços	Coord UTM m E	Coord UTM m N	Vazão m ³ /mês
1	254184,2	9329942,4	48200,0
2	253673,7	9330168,1	44700,0
3	252536,4	9330893,8	39600,0
4	252707,2	9331760,6	23500,0
5	252757,14	9332137,4	59700,0
6	251867,75	9333917,16	25000,0
7	253057,4	9329284,2	42000,0

IMPACTOS SOBRE OS CORPOS DE ÁGUA

Dois cenários são considerados visando uma avaliação da influência da captação mista do sistema adutor Trairi/Potengi na região da Lagoa do Bonfim sobre o espelho de água da mesma. No primeiro cenário, é obtida a distribuição piezométrica da região sem a operação do sistema de captação calibrando-se o modelo para um valor aproximado para o nível de água médio esperado na Lagoa (41,40 m). No segundo cenário são introduzidos os bombeamentos do espelho de água da Lagoa e dos poços conforme descritos na seção anterior. A distribuição obtida em ambos os cenários é ilustrada na Figura 11.

Os poços presentes na área de recarga da lagoa provocariam, portanto, a redução do nível médio esperado para o espelho de água da lagoa em aproximadamente $0,60\text{ m}$. Isso significa que o padrão de oscilação do nível da lagoa ocorreria em torno da cota 40,84m. Percebe-se na figura a modificação do escoamento na região leste da Lagoa do Bonfim. Nessa região, os rebaixamentos são em torno de 3,0m em regime permanente. Dessa forma, a Lagoa do Bonfim passaria a ser recarregada preponderantemente de oeste.

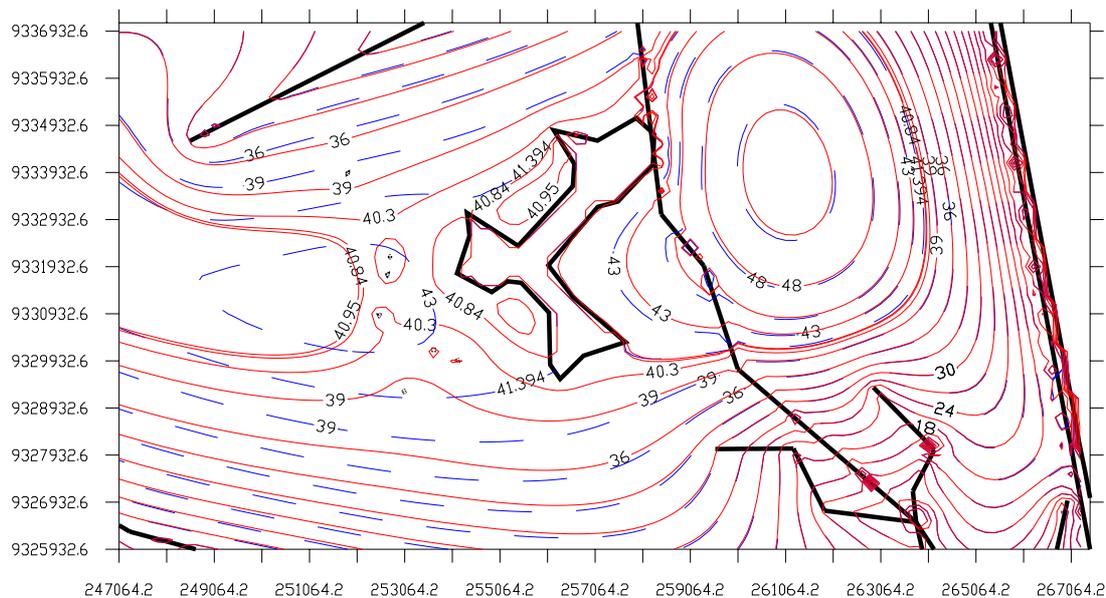


Figura 11 – Distribuição piezométrica comparativa entre o cenário natural (linhas tracejadas) e o cenário atual de captação (linhas cheias)

CONCLUSÕES

Foi construído um modelo de escoamento subterrâneo para a região da Lagoa do Bonfim utilizando-se o Método de Elementos Analíticos (AEM) combinado ao Método de Imagens. A construção do modelo demonstrou a adequação do método em um aquífero livre e estreito da costa brasileira (aquífero Barreiras).

A aplicação do método propiciou a aproximação dos contornos regionais do aquífero ao longo de uma faixa de extensão “infinita”, permitindo a inclusão de efeitos tão distantes quanto se queira no modelo. A utilização dos métodos permite, ainda, a aproximação da recarga regional do aquífero de forma bastante simplificada pela expressão do escoamento unidimensional entre drenos.

Os resultados obtidos permitiram duas importantes conclusões: 1) a calibração de um valor uniforme para a recarga regional em *27,0 mm/mês*; 2) a redução do nível de água médio esperado na Lagoa do Bonfim em *0,60m* devida à influência do sistema de captação mista.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos financiamentos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo 02/09696-3) e do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

[1] MELO, J. G. e FEITOSA, E. C., Pesquisa hidrogeológica do complexo lagunar do Bonfim, SERHID, Natal, 100p, 1998;

[2] MANUEL FILHO, J. e CASTRO, V.L.L, Avaliação e Exploração do Aquífero Dunas-Barreiras na Região do Subsistema Lacustre do Bonfim – Rn, In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 20p, 2002

[3] SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO RIOGRANDE DO NORTE, Plano Estadual de Recursos Hídricos do RN, HIDROSERVICE-LTDA, Natal, p 267, 1998;

[4] PEREIRA, R., GUIMARÃES JR, J. A. e SILVA JR., Estado da Arte da Bacia Hidrogeológica do Sistema Lacustre Bonfim RN Nordeste do Brasil, *Rev. Águas Subter.*, n17 Maio, pp41-48, 2003;

[5] PEREIRA, R., GUIMARÃES JR, J. A., SILVA JR., G.C. e MATTOS, A. Avaliação do Impacto da Captação de Água na Lagoa do Bonfim RN Brasil. *Rev. Águas Subter.*, n16 Maio, pp61-67, 2002

[6] BATISTA, J.A.N., Caracterização da reserva hídrica da Lagoa do Bonfim frente á operação da adutora Monsenhor Expedito RN, PPGES/UFRN, Natal, Dissertação de Mestrado, 131p, 2001

[7] STRACK, O.D.L., Theory And Applications of The Analytic Element Method, *Rev. of Geophys.*, v41, n2 1005-1025, 2003

[8] STRACK, O.D.L. e HAITJEMA, H.M., Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities, 1. Solution for homogeneous permeability, *Water Resour. Res.* v17, n5, pp. 1535-1549, 1981a;

[9] STRACK, O.D.L. e HAITJEMA, H.M., Modeling double aquifer flow using a comprehensive potential and distributed singularities, 2. Solution for inhomogeneous permeabilities, *Water Resour. Res.* v17, n5, pp. 1551-1560, 1981b;

[10] ZAARDNOORDIJK, W.J. e STRACK, O.D.L., Area sinks in the analytic element method for transient groundwater flow, *Water Resour. Res.* v29, n12, pp4121-4129, 1993.

[11] FITTS, C.R, Analytic Modeling of Impermeable and Resistant Barriers, *Ground Water*, v35 n2, pp312-317, 1997

[12] STRACK, O.D.L, Principles of the analytic method, *Journal of Hydrology*, n.226, pp. 128-138, 1999

[13] STRACK, O. D. L., JANKOVIC, I. e BARNES, R., The superbloc approach for the analytic element method, *Journal of Hydrology*, v226, n3-4, pp179-187, 1999

[14] JANKOVIC, I. e BARNES, R., High-order line elements in modeling two-dimensional groundwater flow, *Journal of Hydrology*, v226, n3-4, pp211-223,1999

[15] JANKOVIC, I. e BARNES, R., Three-dimensional flow through large numbers of spheroidal inhomogeneities, *Journal of Hydrology*, v226, n3-4, pp224-233, 1999

[16] LUTHER, K. e HAITJEMA, H.M., Approximate analytic solutions to 3D unconfined groundwater flow within regional 2D models, *Journal of Hydrology*, n. 229, pp. 101-117, 2000;

[17] BAKKER, M. e STRACK, O.D.L., Analytic elements for multiaquifer flow, *Journal of Hydrology*, v271, n1-4, pp 119-129, 2003

[18] FURMAN, A. e NEUMAN, S.P., Laplace-transform analytic element solution of transient flow in porous media, *Advances in Water Resources*, v26 n12, pp 1229-1237, 2003

[19] BAKKER, M., Transient analytic elements for periodic Dupuit-Forchheimer flow, *Advances in Water Resources*, v27, n1, pp3-12, 2004

[20] OLSTHOORN, T. N., A comparative review of analytic and finite difference models used at the Amsterdam Water Supply, *Journal of Hydrology*, v226, n3-4, pp139-143, 1999

[21] GOMES, C.C e CASTRO, M.A.H., Análise Comparativa entre a Modelagem de Aquíferos Regionais Utilizando o Método de Elementos Analíticos (Split) e o Método de Diferenças Finitas (Modflow), In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16p, 2002

[22] BEAR, J., Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier Science, Nova York, 1972;

[23] PEREIRA, R., Caracterização hidrológica do sistema lacustre Bonfim/RN, IG/UFRJ, Rio de Janeiro, Tese de doutorado, 212p, 2001;

[24] HAITJEMA, H.M, Analytic element modeling in groundwater flow, Academic Press, California, 1995.