

AVALIAÇÃO E EXPLOTAÇÃO DO AQUÍFERO DUNAS-BARREIRAS NA REGIÃO DO SUBSISTEMA LACUSTRE DO BONFIM – RN.

João Manoel Filho¹ & Vera Lúcia Lopes de Castro²

Resumo: O sistema aquífero, que interage com um subsistema lacustre, é livre, apresentando localmente setores semiconfinados. Tem como parâmetros médios, transmissividade de 500 m²/d e porosidade efetiva de 15%. O coeficiente de armazenamento, igual a 3×10^{-4} , foi deduzido de testes de aquífero e da eficiência barométrica, que é igual a 0,33. O fator de anisotropia (razão entre as condutividades hidráulicas, vertical e horizontal) é de 1,5/10. A recarga média é de 485 mm/ano e a oscilação média do nível freático é da ordem de 3 m. Para fins de gerenciamento do aquífero, dados de correlação lito-estratigráfica, parâmetros físicos e distribuição de carga hidráulica foram usados na construção de um modelo numérico de fluxo tridimensional (MODFLOW) para simular o sistema regional de águas subterrâneas, em regime de exploração. Três simulações incluindo baterias de poços existentes e de poços projetados em diferentes áreas foram realizadas. Os resultados são ilustrados em mapas potenciométricos. Para as lagoas adotou-se uma condição de carga geral igual às cotas médias do período de maio 1997 a abril 2001. Os balanços de fluxo das simulações numa área de 200 km² indicam recursos renováveis de 2,1 m³/s.

Abstract: The regional groundwater system, which interacts with a lake subsystem, is a water-table aquifer with locally artesian-leaky sectors. Average hydraulic parameters are transmissivity of 500 m²/d and specific yield of 15%. Estimated storage coefficient both from pumping tests and barometric efficiency of 0.33, is equal to 3×10^{-4} . Anisotropy factor (ratio between vertical hydraulic conductivity and horizontal hydraulic conductivity) is 1.5/10. Average annual recharge rate is of 485 mm/year and water-table seasonal fluctuation is on the order of 3 m. For management and planning purposes, available data on potentiometric head distribution, stratigraphic analysis and aquifer parameters were used to construct a three-dimensional numerical model (MODFLOW) to simulate the regional groundwater system under exploitation. Three runs including existing and projected municipal well fields were performed. Results are illustrated on potentiometric head maps. As general head boundary condition of the ponds the average water levels observed from

¹ Universidade Federal de Pernambuco – CTG – DEMINAS. Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n Cidade Universitária 50740-530 Recife-PE. Fone/Fax (081) 32718239. E-mail jomanoelfilho@aol.com

² Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte – SERHID/RN. Rua Jornalista Haroldo Gurgel, 1853 – Lagoa Nova . 59075-220 Natal – RN. E-mail vcastro.nat@terra.com.br

May 1997 up to April 2001 were adopted. The flux budgets of the runs indicate over an area of 200 km² water resources of 2.1 m³/s.

Palavras chave: modelo numérico . interação água superficial-água subterrânea . gerenciamento.

INTRODUÇÃO

O sistema aquífero Dunas-Barreiras, na costa oriental do Rio Grande do Norte, estende-se do município de Touros até a fronteira com o Estado da Paraíba. Com largura média da ordem de 25 km essa região se insere no domínio das bacias sedimentares Potiguar e Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte. Corresponde à região fisiográfica dos Vales Úmidos do Rio Grande do Norte e abriga, sobre uma cobertura eólica de alta capacidade de infiltração, um grande número de lagoas de magnitude significativa. As chuvas abundantes, com média anual variável de 1500 mm na linha costeira a 1200 m na porção mais interior da faixa, dão lugar a excedentes hídricos médios da ordem de 500 mm, que realimentam o sistema de água subterrânea. Os rios são perenes graças ao fluxo de base produzido pela restituição das águas subterrâneas do sistema aquífero freático Dunas-Barreiras. As lagoas formam subsistemas conectados com as águas subterrâneas e a sua presença nesse contexto surge como um testemunho, a céu aberto, do grande potencial hídrico da região.

A área de interesse do presente estudo cobre uma superfície aproximada de 200 km², compreendida entre o riacho Pium ao norte e o rio Trairí, ao sul (Fig. 1). Nessa área encontra-se o chamado *subsistema lacustre do Bonfim*, constituído de 6 (seis) importantes lagoas que ocorrem nos municípios de São José de Mipibu e Nísia Floresta, cerca de 30 km ao sul de Natal. Embora menos expressivas, merecem ainda registro as lagoas da Estrada, Amarela e da Hiola, constituintes do *subsistema lacustre do Alcaçus*.

Portanto, a exploração dos recursos hídricos nessa região admite alternativas de captação superficial e subterrânea. As primeiras, diretamente de lagoas ou através de tomadas diretas de água nos riachos perenes. As alternativas de captação subterrânea são através de poços tubulares com profundidades de 80m a 100m e vazões de 75 m³/h a 150 m³/h. Atualmente os recursos explorados nessa área são da ordem de 300 l/s, sendo 70 l/s de poços tubulares e amazonas para uso doméstico, agrícola e industrial e 230 l/s para abastecimento urbano através da Adutora Agreste/Trairí/Potengi, que atende 20 sedes municipais e 28 pequenas comunidades rurais, algumas delas situadas a grande distância da fonte de suprimento. Cerca de 100 l/s são captados diretamente da lagoa do Bonfim e 130 l/s de poços tubulares existentes.

No ano 2016 o projeto do Sistema Adutor Agreste/Trairí/Potengi, implantado pela Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte – SERHID/RN, prevê o atendimento de uma população da ordem de 230 mil habitantes, com uma vazão total do sistema da ordem de 480 l/s.

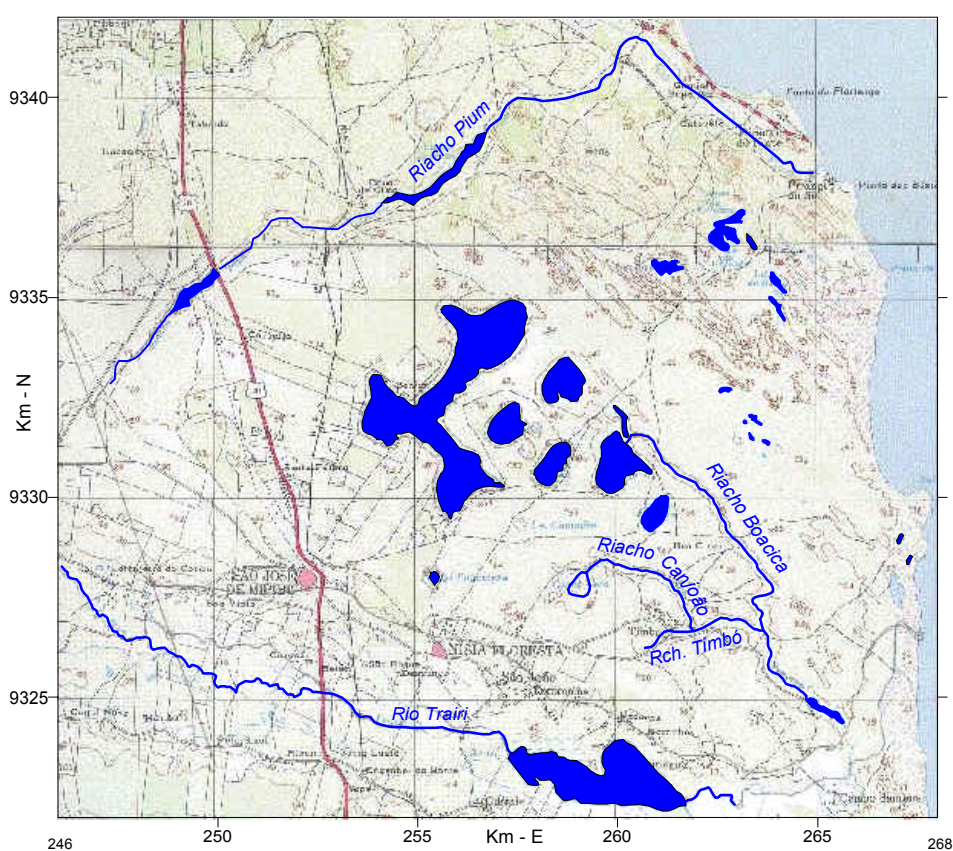
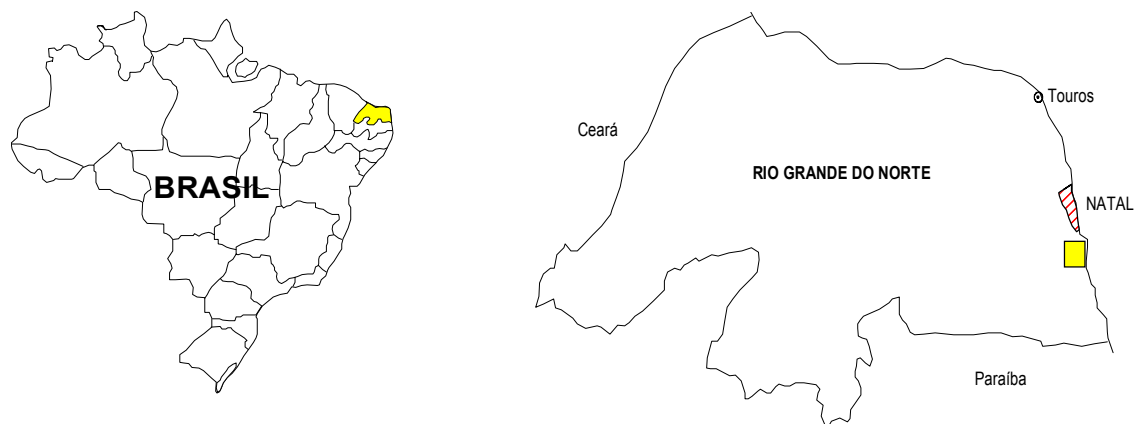


Fig. 1 – Mapa de localização da área do subsistema lacustre do Bonfim inserido no domínio do sistema aquífero Dunas-Barreiras cerca de 30 km ao sul de Natal – RN.

O atendimento da demanda futura através de sistemas sustentáveis de captação que ofereçam viabilidade técnica, econômica e ambiental, passa por um plano de gestão integrada dos recursos hídricos da região. Daí porque a SERHID/RN, que já vem monitorando a lagoa do Bonfim e o aquífero Dunas-Barreiras, através de uma rede de piezômetros e de poços existentes em exploração, decidiu realizar novos estudos para avaliar a disponibilidade hídrica do sistema aquífero na área do

subsistema lacustre do Bonfim, e definir alternativas de captação superficial e subterrânea. No âmbito desses estudos, o presente trabalho trata apenas de alternativas de captação subterrânea.

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Litologia, espessura e substrato do aquífero

O sistema aquífero Dunas – Barreiras na área de estudo é constituído, em sua porção mais superficial, por uma cobertura eólica de areias finas, homogêneas, com espessura variável de 0,5 m a 50 m. Abaixo dessa cobertura, ocorrem areias e arenitos geralmente argilosos, arenitos muito finos, médios e até grosseiros, ora pouco argilosos, ora muito argilosos. Esse pacote de sedimentos cenozóicos apresenta espessura variável de 70 m a 100 m e repousa sobre uma camada de arenitos calcíferos do cretáceo superior, que representa o substrato impermeável do aquífero. O mapa do topo desse arenito é mostrado na Figura 2.

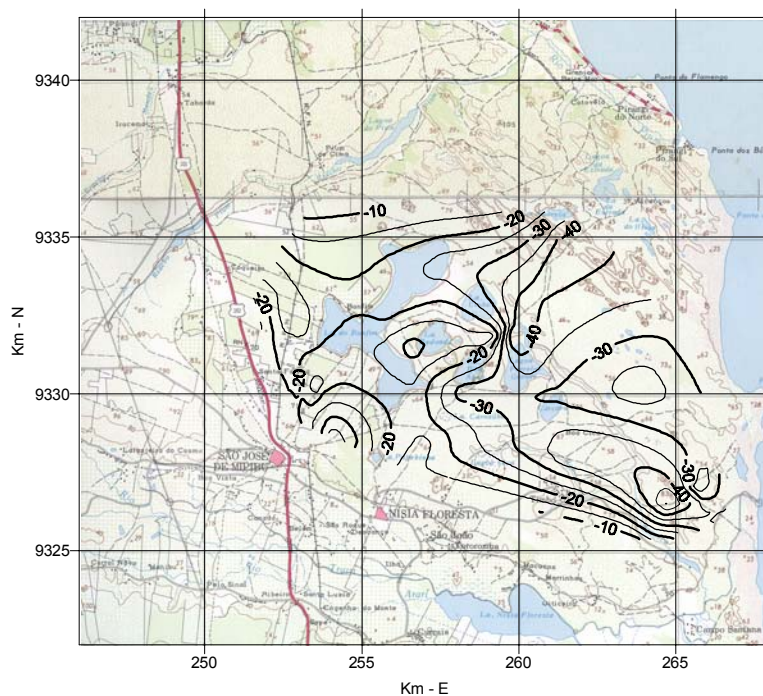


Figura 2 - Mapa do topo do arenito calcífero indicando duas zonas mais profundas, respectivamente a leste e sudeste das lagoas.

No pacote cenozóico que representa o aquífero aparecem ainda intercalações de argila plástica, distribuídas de forma irregular e sem a continuidade que seria necessária para caracterizar este sistema, em escala regional, como semiconfinado, ou como possuidor de dois aquíferos com níveis potenciométricos distintos. Diferenças de carga hidráulica entre os níveis arenosos inferiores e superiores indicativas de semiconfinamento parecem ocorrer apenas localmente, conforme verificaram Melo & Feitosa (1998), no setor oeste, por ocasião dos testes de aquífero realizados nos

7 (sete) poços produtores existentes, em operação. Regionalmente, porém, a correlação litoestratigráfica entre os poços sugere que o sistema aquífero pode ser considerado do tipo livre (Fig.3).

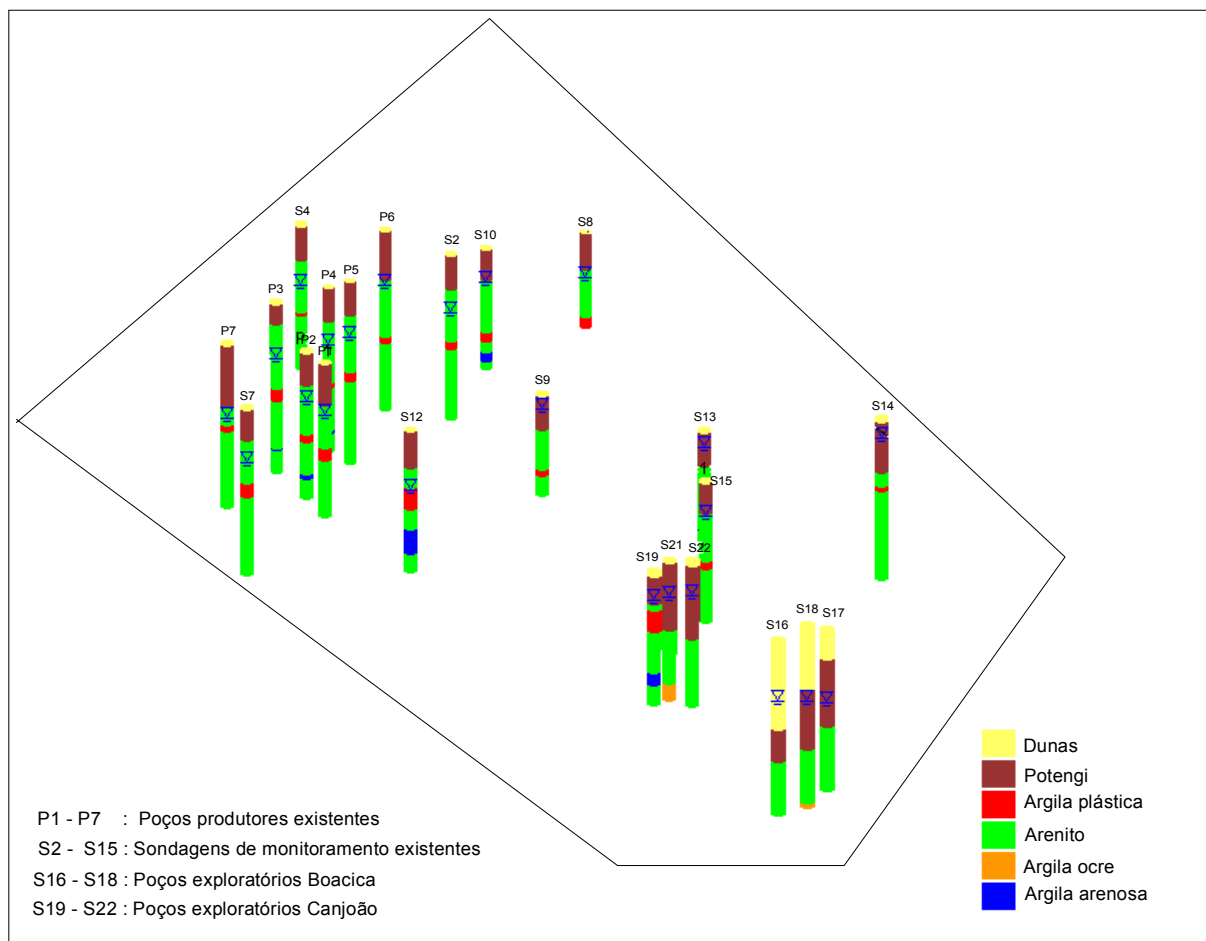


Figura 3 – Vista em perspectiva da correlação litológica entre poços produtores, sondagens e poços exploratórios existentes.

Áreas Mais Favoráveis para Captação

Os primeiros estudos geofísicos por eletroresistividade (Feitosa, 1998) identificaram um baixo estrutural denominado *Baixo do Bonfim* com orientação NW-SE. As maiores espessuras do aquífero ocorrem a leste e sudeste das lagoas, numa faixa em que o topo do arenito calcífero (Fig. 2), está abaixo da cota – 30 m. Novas sondagens exploratórias e investigações geofísicas complementares (Feitosa, 2001), mostraram que as maiores transmissividades dentro dessa faixa ocorrem na zona em que o topo do arenito calcífero está abaixo da cota –40 m, respectivamente, a leste das lagoas (área Alcaçus) e no extremo sudeste da faixa (área Boacica). Foi selecionada ainda, dentro dessa estrutura, uma terceira zona (área Canjoão), que embora de menor transmissividade é limitada por riachos perenes e situa-se na região de descarga do subsistema lacustre (Figura. 4).

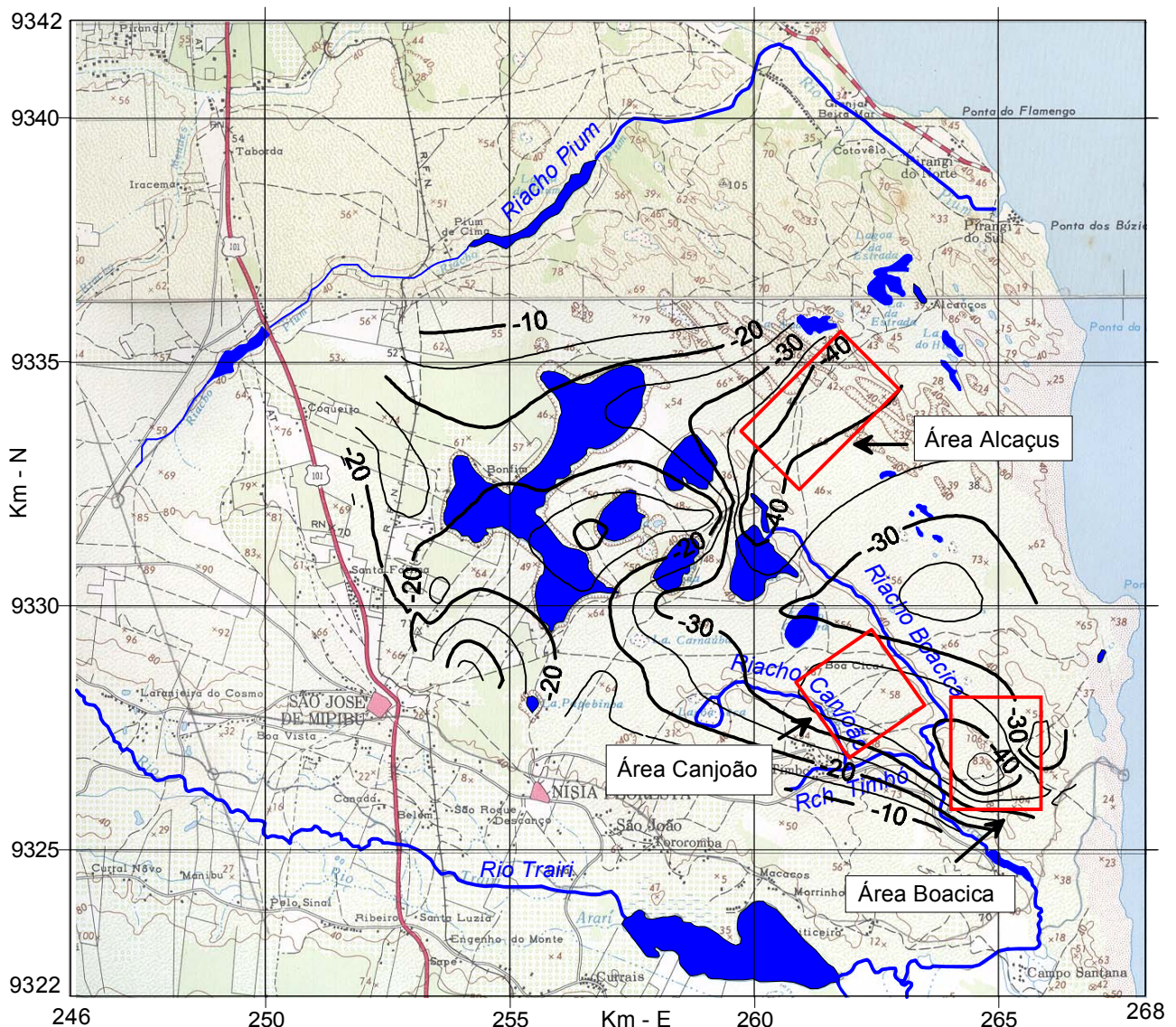


Fig. 4 –Localização das 3 (três) áreas selecionadas como mais favoráveis para captação.

Recarga

A região do subsistema lacustre do Bonfim se desenvolve sobre um tabuleiro Terciário com extensiva cobertura de areias eólicas, homogêneas e inconsolidadas. A alta capacidade de infiltração dessas areias é responsável pela ausência de uma rede de drenagem superficial e, certamente, pela formação de lagoas sobre o tabuleiro. É claro que chuvas de intensidade superior à capacidade de infiltração do solo geram recarga de intensidade máxima e “run-off”. Este último escoar para depressões interiores em pontos isolados, criando bacias de infiltração a partir das quais se formam domos de água subterrânea. Se o nível freático é pouco profundo, as bacias podem alcançá-lo rapidamente e originar lagoas permanentes, conectadas com as águas subterrâneas. Caso contrário, as bacias formam lagoas temporárias com água suspensa que desaparece depois de concluído o processo de percolação profunda até o nível freático. Assim sendo, no balanço hídrico da região, feito pelo método de Thornthwaite (Thornthwaite & Matter 1957), o escoamento superficial foi

considerado desprezível. A recarga estimada para o sistema aquífero, com base em dados da estação de São José de Mipibu no período 1911-1956, é de 485mm/ano, em média, e da ordem de 240 mm/ano, com 90% de probabilidade (na tabela 1).

Tabela 1 – Recarga na área do subsistema lacustre do Bonfim.

Recarga (mm/ano)	485	306	240	197	157	135
Recarga (m/d)	0,00133	0,00084	0,00066	0,00054	0,00043	0,00037
Risco %	50	20	10	5	2	1

Fluxo subterrâneo e exutórios

O mapa da figura 5 ilustra a superfície potenciométrica e as direções de fluxo do aquífero em 1996, antes do início da exploração de água subterrânea para o sistema adutor Trairi/Potengi. Nota-se que o escoamento subterrâneo se realiza a partir do centro oeste e centro da área, em quatro direções principais: i) para norte-nordeste desaguardo no riacho Pium; ii) para leste, diretamente ao oceano; iii) para sul, no rumo do rio Trairi; iv) para sudeste, desaguardo nos riachos Boacica, Timbó e Canjoão na zona de exudação das lagoas. Os gradientes hidráulicos variam de 3 a 6 m/km, chegando até 13 m/km.

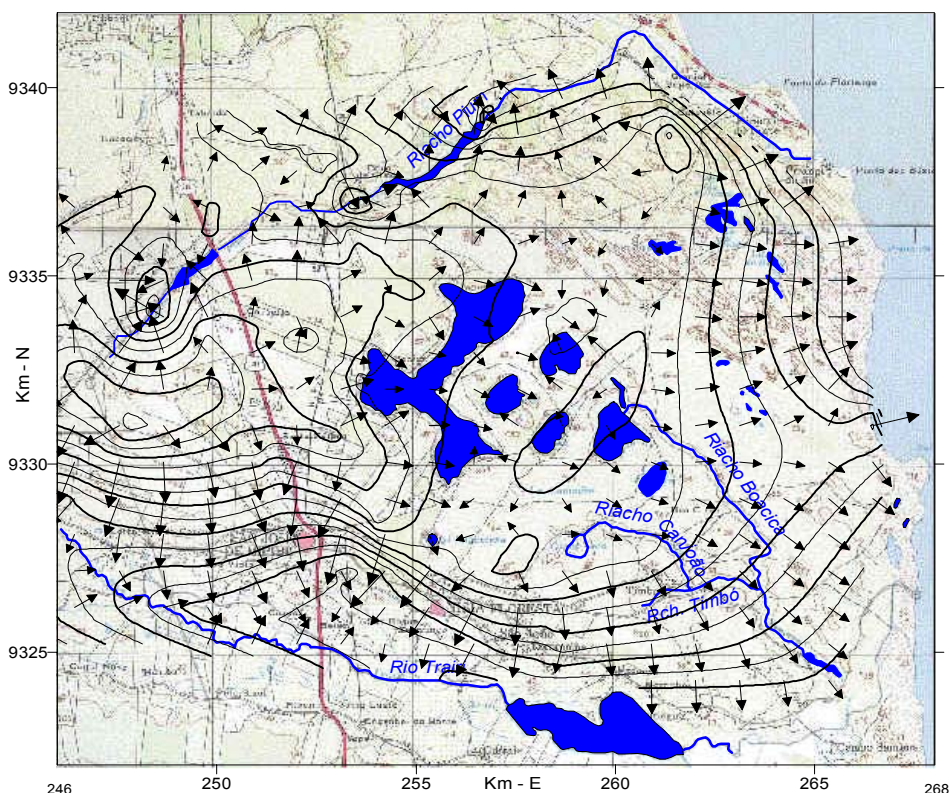


Fig. 5 – Mapa de fluxo subterrâneo do aquífero Dunas-Barreiras na área do subsistema lacustre do Bonfim em julho-agosto de 1996 (Dados de COSTA, 1997).

Observa-se ainda que do ponto de vista da interação lagoa-aquífero, as lagoas são alimentadas, de oeste para leste, pelo fluxo subterrâneo. São, portanto, segundo a classificação de

Born et al. 1979 apud Gosselin & Khisty 2001, *lagoas atravessadas por fluxo*, isto é, que recebem o fluxo natural do aquífero pela parte de montante de suas bacias e ao mesmo tempo alimentam o fluxo natural do aquífero nos trechos de jusante de suas bacias. Os rios e riachos, todos simulados como drenos, no MODFLOW, são os principais exutórios, juntamente com a evapotranspiração.

Variação Sazonal do Nível D'água

As variações sazonais do nível d'água do aquífero, segundo os dados do monitoramento conduzido pela SERHID/RN são apresentadas no mapa da Figura 6.

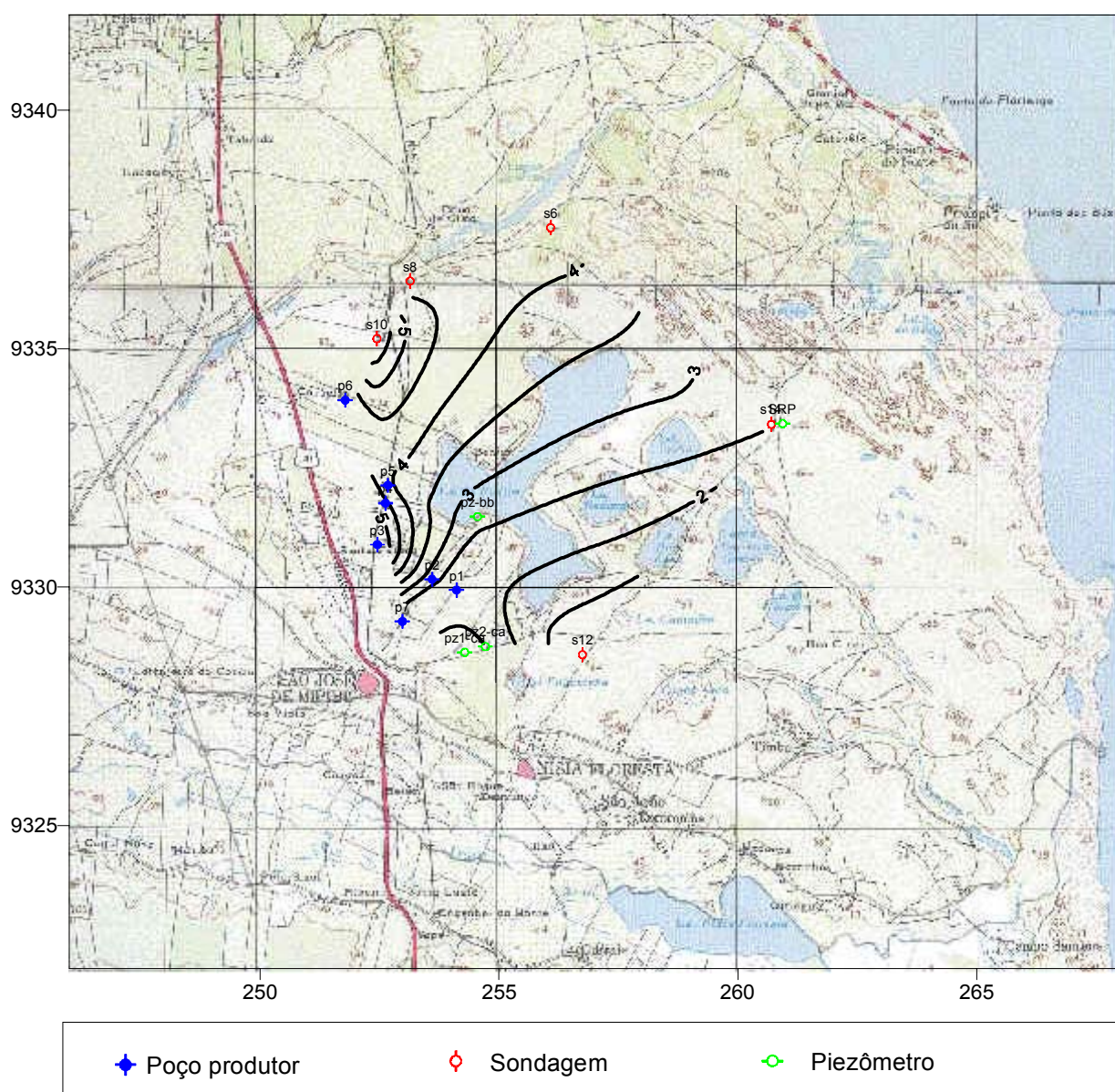


Fig. 6- – Variação sazonal do nível da água subterrânea medida pela SERHID/RN em poços produtores, sondagens e piezômetros na área de estudo.

Numa amostra de 16 pontos observados, a oscilação média é de 3,3 m e a mediana de 2,9 m. A curva de 3 m situa-se na parte mais central da área, com os valores crescendo para oeste e

noroeste até 6 m em direção ao setor onde se encontram os poços produtores P3 a P6 e a sondagem S10. A sudeste da curva de 3 m, desde os poços P1, P3 e P7 até a sondagem 14 e o piezômetro SRP, os valores são inferiores a 3 m, apresentando tendência para chegar até 1 m. Aparentemente essas diferenças de magnitude das oscilações no nível freático estão ligadas a variações locais de porosidade efetiva do conjunto do aquífero e não propriamente a diferenças de carga hidráulica entre níveis superiores e inferiores do sistema Dunas-Barreiras. Isto porque, nos próprios poços produtores, todos penetrantes até a seqüência inferior, ocorrem diferenças de carga significativas, de 1,9 m no P7 e 5,8 m no P3.

Parâmetros hidráulicos

No setor ocidental da área a condutividade hidráulica horizontal avaliada em estudos anteriores (Melo & Feitosa, 1998), em 25 determinações, varia de 7 a 27 m/dia, com média de 17 m/dia e mediana de 10 m/dia. O coeficiente de armazenamento foi de $3,3 \times 10^{-4}$. No setor oriental, foram realizados testes de produção e testes de aquífero na área Canjoão (sítio B1) e na área Boacica (sítio B2) (Fig.4).

O teste de produção no sítio B1 foi realizado em 4 (quatro) etapas com duração de 3 horas cada uma. As vazões bombeadas foram de 3 m³/h na primeira etapa; 6 m³/h na segunda etapa; 7,3 m³/h na terceira etapa e finalmente de 13 m³/h na quarta e última etapa. O crivo da bomba, em todas as etapas, ficou aos 36 m de profundidade. A equação característica do poço B1 é ilustrada na figura 7a.

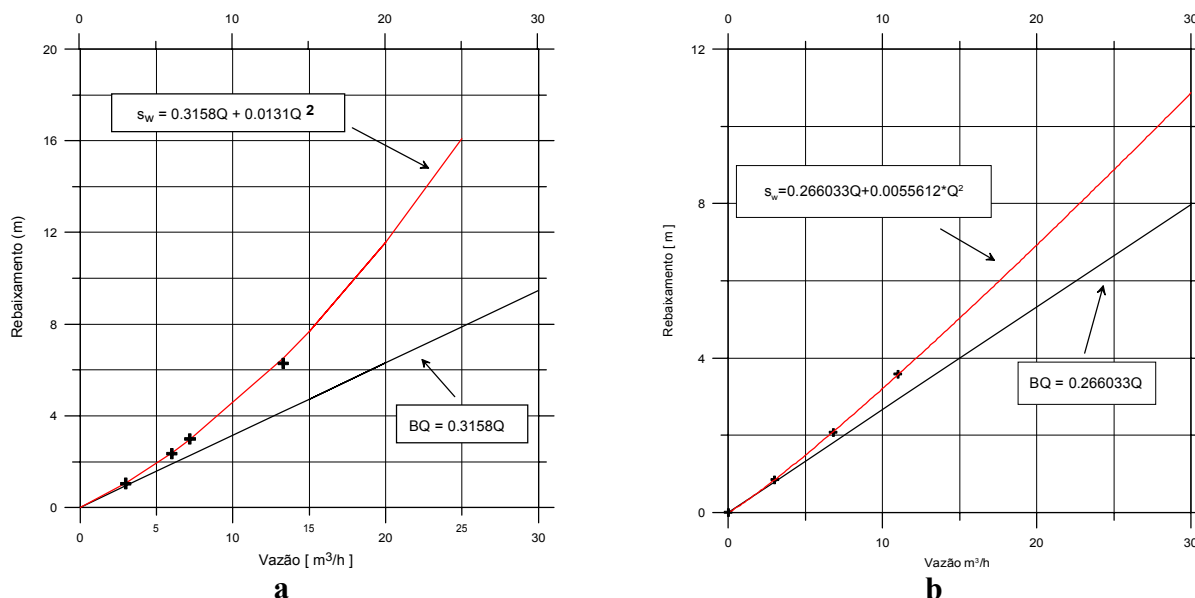


Figura 7 – Curvas de vazão x rebaixamento características dos poços bombeados: a) no sítio B1 (Canjoão); b) no sítio B2 (Boacica)

No sítio B2, o teste de produção foi realizado em 3 (três) etapas com duração de 3 horas cada uma. As vazões bombeadas foram de 3 m³/h na primeira etapa; 6 m³/h na segunda e, finalmente, de

11 m³/h na terceira e última etapa. O crivo da bomba, em todas as etapas, ficou a 65 m de profundidade. A equação característica do poço B2 é ilustrada na figura 7b.

Nos testes de aquífero a baixa vazão dos poços B1 e B2, bombeados, condicionada pelo diâmetro de 4", deu lugar a rebaixamentos muito pequenos, com a distância. No teste de aquífero do sítio B1 (Fig. 8), os níveis d'água foram medidos a distâncias de 12 m, 50m, 209 m, 272 m e 305 m. Os rebaixamentos máximos, após 72 horas, foram de 0,54m a 12,56m e de apenas 0,13 m a 50 m de distância. Os parâmetros avaliados no sítio Canjoão são mostrados na tabela 2.

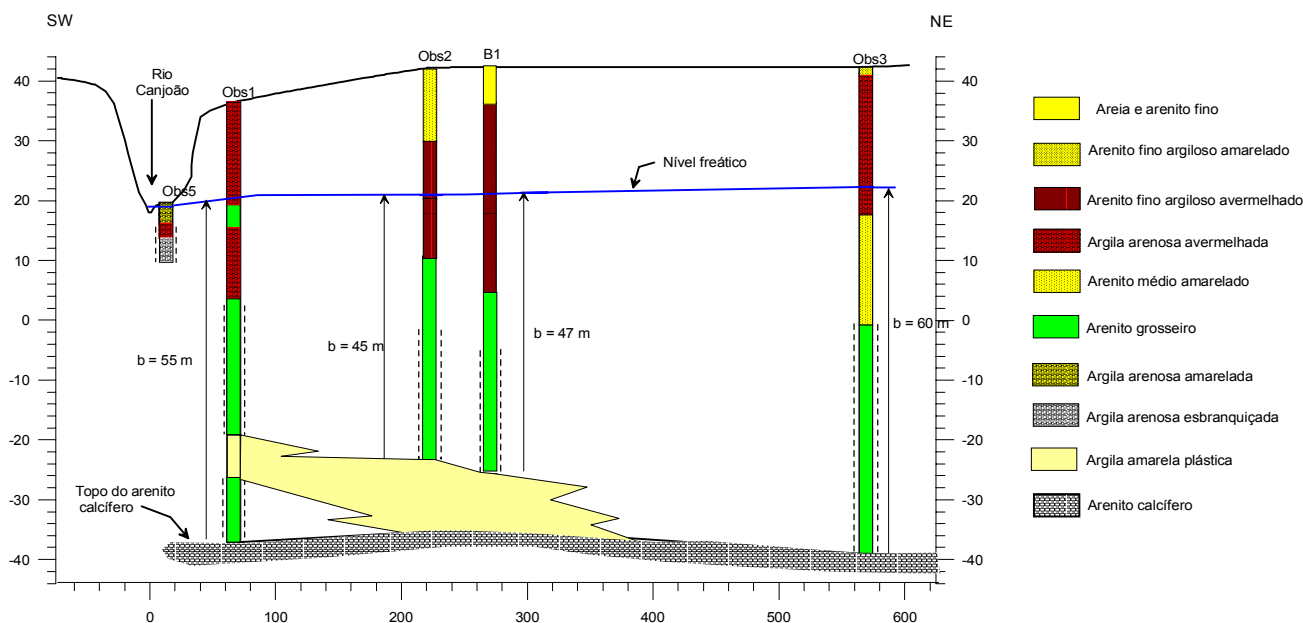


Fig. 8 – Seção SW-NE de correlação entre os poços utilizados no teste de aquífero no sítio B1.

Tabela 2 - Parâmetros hidráulicos avaliados no sítio Canjoão método de Neuman (1972)

Poço	$T (m^2 / s)$	b	$K m / d$	S	S_y	K_v / K_h	$K_v m / d$
Obs4(B1) a 12,56 m	$9,8 \times 10^{-4}$	47	1,6	$4,3 \times 10^{-4}$		0,84	1,34
	$9,8 \times 10^{-4}$	47	1,8		0,40		1,51
Obs2(B1) a 50 m	$4,1 \times 10^{-3}$	45	7,4	$2,3 \times 10^{-4}$		0,02	0,15
	$4,6 \times 10^{-3}$	45	8,5		0,03		
Médias Canjoão	$2,7 \times 10^{-3}$	46	5,0	$3,3 \times 10^{-4}$	0,22	0,43	1,0

A transmissividade média do aquífero, estimada pelo método de Neuman 1972, no Sítio Canjoão, é $2,7 \times 10^{-3} m^2/s$ e corresponde a uma condutividade hidráulica horizontal de 5 m/dia. Os valores desses parâmetros, estimados com base na curva de rebaixamento versus distância (Figura 9), pelo método de Thiem são, respectivamente, de $2,25 \times 10^{-3} m^2/s$ e 4,1 m/dia.

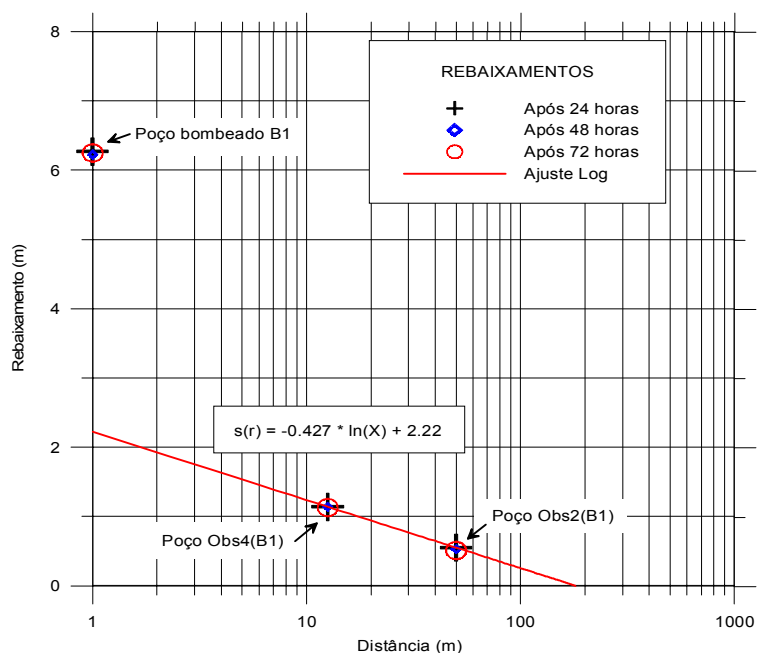


Figura 9 - Gráfico de rebaixamento versus distância no teste de aquífero no sítio B1 (Canjoão).

O coeficiente de armazenamento médio foi de $3,3 \times 10^{-4}$. As diferenças registradas entre alguns dos parâmetros, como a porosidade efetiva (de 3 a 40%) e o fator de anisotropia K_v/K_h (de 0,02 a 0,84) são surpreendentes, considerando que os pontos são relativamente pouco afastados. Castro (1994), através de testes de coluna com traçador, estimou valores de porosidade efetiva de 38% para as dunas e de 16% a 30% para a formação Barreiras, na área de Cidade Nova em Natal.

No segundo teste de aquífero, com duração de 48 horas, realizado na área Boacica, (sítio B2), os rebaixamentos foram medidos no poço bombeado B2 e em 2 (dois) poços de observação situados, respectivamente a 275 m e 425 m de distância. O aquífero, do tipo livre, situa-se no intervalo de 32 m a 99 m, apresentando espessura saturada variável de 45 m a 62 m. A profundidade média do nível estático é de 37 m.

No poço de observação situado a 275 m de distância, a variação total de nível d'água foi de apenas 10 cm. O registro dessa variação com o tempo foi difícil de caracterizar devido às influências exercidas sobre o aquífero pela pressão atmosférica (Fig. 10), que produziu uma oscilação de ± 3 cm, e pela maré (Fig. 11) cuja oscilação, representada pela variação do nível estático corrigida de pressão atmosférica, foi de $\pm 1,5$ cm.

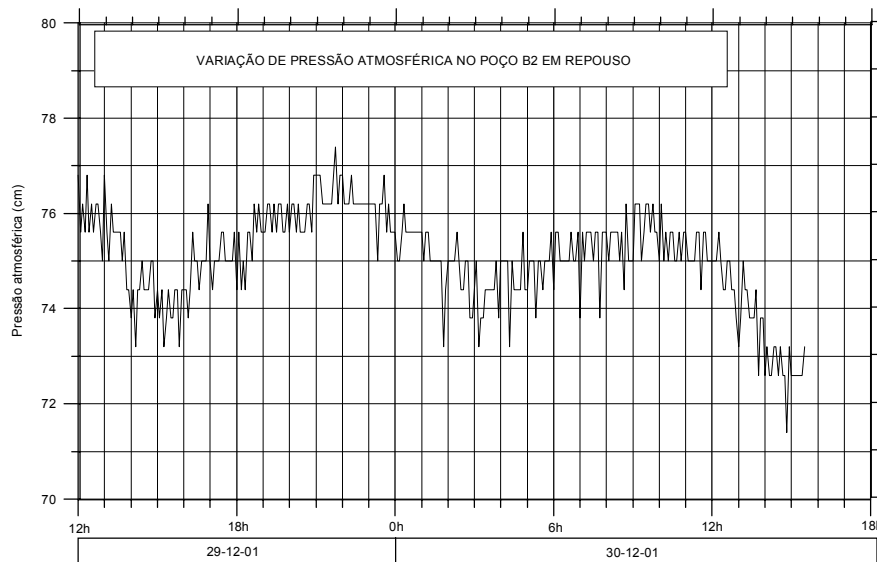


Figura 10 - Variação de pressão barométrica observada no poço B2 em repouso no período de 29.12.2001 a 30.12.2001.

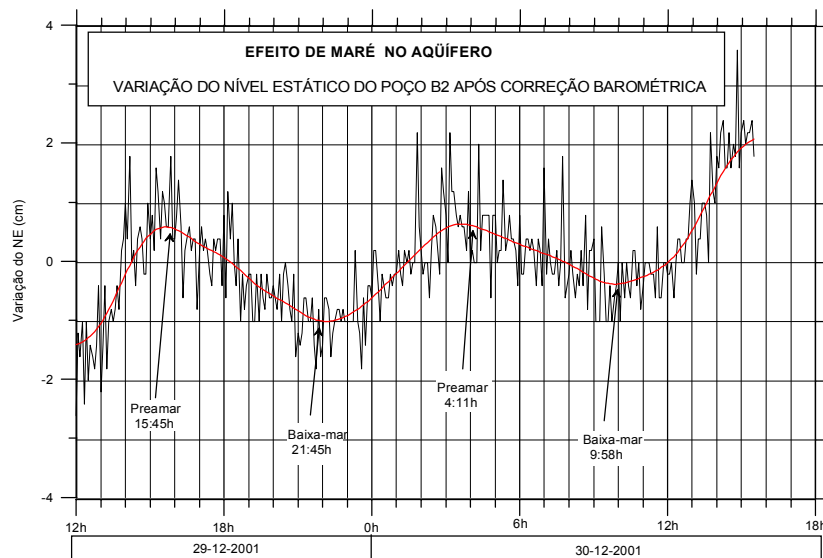


Figura 11 - Oscilação do nível potenciométrico do poço B2 atribuída ao efeito da maré sobre o aquífero.

Na falta de curvas de rebaixamento x tempo nos poços de observação do teste Boacica, a avaliação dos parâmetros hidráulicos ficou restrita ao próprio poço B2 bombeado. Os resultados permitiram estimar, pelo método de Jacob (1944), um mesmo valor de transmissividade, igual a $2,12 \times 10^{-3} m^2 / s$, tanto no rebaixamento quanto na recuperação. A espessura média saturada é de 55 m e a condutividade hidráulica horizontal deduzida é igual a 3,3 m/d. O coeficiente de armazenamento foi estimado com base na eficiência barométrica do aquífero ($BE=0,33$), levando em conta a temperatura de 30 °C da água, o peso específico da água ($9771 N/m^3$), a porosidade do aquífero (40%), o coeficiente de compressibilidade da água ($4,79 \times 10^{-10} m^2 / N$) e, finalmente, a espessura saturada (55 m). O valor encontrado de $3,1 \times 10^{-4}$ (Fig. 12), é o mesmo que foi adotado como representativo no setor ocidental em estudos anteriores (Melo & Feitosa, 1998 op.cit) e

também coincide com o valor médio avaliado na área Canjoão. Os parâmetros finais, considerados como representativos do conjunto do aquífero, são mostrados na tabela 3.

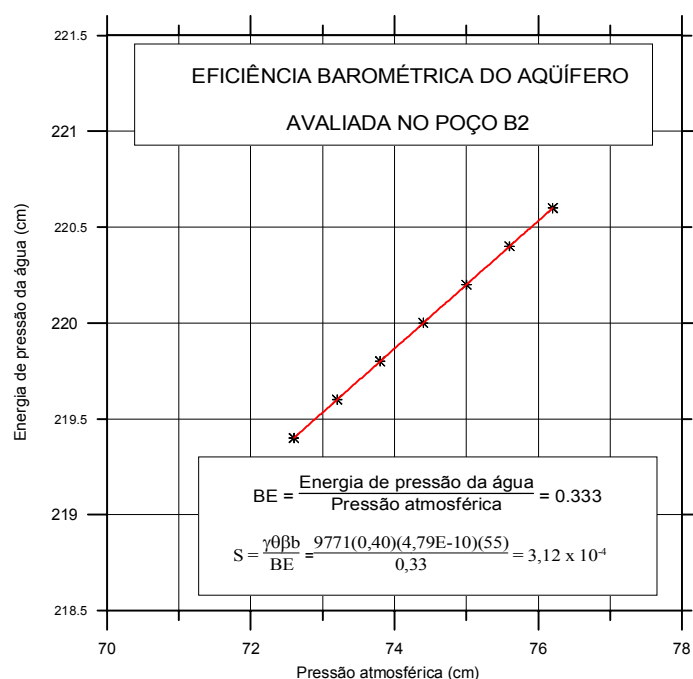


Figura 12 – Eficiência barométrica do aquífero avaliada no poço B2, a leste do Riacho Boacica na estrada Nísia Floresta – Tabatinga.

Tabela 3 – Parâmetros hidráulicos representativos do conjunto do aquífero

Estatística	$T (m^2 / s)$	b	$K m / d$	S	S_y	K_v / K_h	$K_v m / d$
Média regional	$5,8 \times 10^{-3}$	50	10	$3,3 \times 10^{-4}$	0,15	0,15	1,5

Capacidade de produção estimada para poços

Na área Canjoão, a capacidade de produção estimada para poços de 80 m de profundidade, 14” de diâmetro e 20 m de filtros em diâmetro de 10“, é de 75 m³/h. Essa vazão pode ser obtida em regime de equilíbrio por poços afastados de 400 m uns dos outros. Nas áreas de Boacica e Alcaçus, a vazão prevista para poços de 100 m de profundidade, em 14” de diâmetro, com 30 m de filtros de 10” de diâmetro, é de 112 m³/h e o afastamento entre os poços é de 900 m.

MODELAGEM NUMÉRICA DO AQUIFERO

Para avaliar o sistema aquífero e simular alternativas de captação, foi desenvolvido um modelo numérico MODFLOW de fluxo tridimensional (McDonald & Harbaugh, 1988). O modelo conceitual adotado é de uma só camada, para simular o sistema aquífero livre correspondente ao pacote Dunas-Barreiras em repouso sobre arenitos calcíferos de idade cretácica, supostos impermeáveis. Foram usadas 3 (três) coberturas: i) *Cobertura de fontes/sumidouros*: contendo os

limites da área simulada, que são: o cristalino a oeste da BR-101, 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 drenos; os riachos, Boacica, Timbó e Canjoão, também simulados como drenos. As lagoas foram simuladas como limites de carga geral, com as cotas médias registradas no período de Maio 1999 a Abril 2001. Os 7 (sete) poços tubulares existentes em operação com as suas respectivas descargas, foram simulados como sumidouros. ii) *Cobertura de condutividade hidráulica*: na qual foram introduzidos valores de condutividade hidráulica horizontal $K_h = 10 \text{ m/d}$ e de condutividade hidráulica vertical $K_v = 1,5 \text{ m/d}$, para a camada aquífera ou aquífero propriamente dito, considerado homogêneo e anisotrópico. iii) *Cobertura de recarga*: na qual foi introduzido o valor da recarga igual a 0.00066 m/dia, correspondente a 90% de probabilidade.

Entrada dos Parâmetros na Cobertura Fontes/Sumidouros

Drenos: para os drenos foram introduzidas as cargas potenciométricas de montante e jusante, bem como a condutância hidráulica. Trata-se de um parâmetro que multiplicado pela diferença de carga hidráulica (entre o aquífero e o rio) fornece a descarga do aquífero para o rio segundo a lei de Darcy, isto é:

$$Q = \frac{KA}{M} \Delta H \quad \text{ou} \quad Q = C \Delta H \quad (1)$$

sendo: C = condutância hidráulica [m^2/d] ou [$\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$]; Q = descarga [m^3/d]; A = área da seção transversal ao fluxo [m^2]; ΔH = diferença de carga hidráulica [m]; M = espessura da camada através da qual ocorre o fluxo no contato rio-aquífero. A condutância é expressa por:

$$C = \frac{K A}{M} \quad (2)$$

A condutância dos drenos foi estimada usando a descarga média do riacho Boacica, igual a 23,3 Hm^3/ano , deduzida dos anos hidrológicos de 1997-1998 (24,1 Hm^3/ano) e 2000-2001 (22,5 Hm^3/ano) e que corresponde a uma média diária de $Q=63.835 \text{ m}^3/\text{d}$. A extensão L dos riachos da bacia do Boacica é estimada em 16.000 m; para a condutividade hidráulica adotou-se o valor mediano de 10 m/dia estimado nos estudos anteriores. Tratando-se de pequenos riachos estimou-se uma largura média ($W = 1 \text{ m}$). Para uma diferença de carga unitária, conclui-se da equação (1) que a condutância equivalente à descarga Q , será:

$$C = \frac{K L W}{M} = 63835 \frac{\text{m}^3 / \text{d}}{\text{m}} \quad (3)$$

O parâmetro condutância é utilizado pelo fato de que todos os termos correspondentes a comprimentos e áreas são automaticamente calculados pelo programa a partir do mapa, uma vez

que o sistema é georeferenciado. Dessa maneira, para os drenos, a condutância deve ser introduzida por unidade de comprimento, ou seja:

$$C = \frac{63835 \frac{m^3}{d}}{16000 m} \cong 4 m/d \quad \text{ou} \quad 4 \frac{m^3/d}{m^2} \quad (4)$$

Esse valor foi estendido a todos os drenos simulados. *Poços*: para os 7 (sete) poços existentes em exploração no setor ocidental da área, no modelo simulados como sumidouros, foram fornecidas naturalmente as coordenadas, as cotas dos topos e bases dos filtros, bem como as respectivas descargas negativas. *Lagoas*: as lagoas foram simuladas como limites de carga geral. Trata-se de uma função matematicamente similar à de rios e drenos, isto é, $Q = C \Delta H$ que estabelece a relação entre o fluxo para uma célula e a carga na célula. C é a condutância entre a fonte externa (lagoa) e a célula (aquífero); ΔH é a diferença de carga entre a fonte externa e a célula. Partindo da equação da condutância $C = \frac{K L W}{M}$, pode-se transformar a área média superficial das lagoas em um retângulo equivalente de dimensões $L \times W$. Uma vez que o volume médio acumulado é conhecido, a profundidade média \bar{H} fica determinada. Com a largura média W estimada através de mapa na escala 1:100.000, o comprimento médio L é obtido da expressão:

$$L = \frac{V}{W \times \bar{H}} \quad (5)$$

M representa a espessura do aquífero na direção do fluxo e foi considerado igual a $50 - \bar{H}$. A área de contato das lagoas com o aquífero, foi então estimada através da equação:

$$A = 2\bar{H}W + 2\bar{H}L + W\bar{H} = 2\bar{H}(W + L) + WL \quad (6)$$

Todos esses cálculos envolvendo comprimentos e áreas são, na verdade, feitos automaticamente pelo programa a partir do mapa. Assim sendo, para as lagoas, pelas mesmas razões já explicadas no caso dos drenos, a condutância deve ser introduzida por unidade de área. Ou seja, $C = K / M$. Os valores introduzidos são apresentados na última coluna da tabela 4.

Tabela 4– Condutância por unidade de área introduzida para as lagoas

Lagoa	Cota média	Volume (m ³)	W	H médio	L	Area m ²	M	C 1/d
Bonfim	40,47	6,37E+07	1000	8,55	7450	7594792,4	41,5	0,241
Urubu	40,52	2,60E+06	800	3,06	1062	861069,2	46,9	0,213
Redonda	40,23	1,40E+06	700	2,64	758	537999,0	47,4	0,211
Boa Água	41,26	6,60E+05	500	1,43	923	465608,5	48,6	0,206
F. Grande	38,06	1,90E+06	1000	2,32	819	827405,5	47,7	0,210
Carcará	35,11	8,00E+05	400	1,78	1124	454862,2	48,2	0,207

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados

O balanço hídrico revela recarga média de 485 mm/ano, que representa, sobre uma área de 200 km², recursos renováveis de 3,08 m³/s. Com 90% de probabilidade a recarga é de 240 mm/ano, e os recursos renováveis 1,52 m³/s. A capacidade de produção de poços tubulares, com profundidade de 80 m a 100 m, varia de 75 m³/h a 150 m³/h. As áreas mais favoráveis para exploração do aquífero, através de baterias de poços, estão situadas na zona leste, onde os poços podem interceptar o fluxo natural e os excedentes hídricos do sistema lacustre.

Três simulações do aquífero foram feitas com o modelo MODFLOW para dar suporte à decisão sobre a melhor forma de atender à demanda hídrica atual (230 l/s) e futura (480 l/s no ano de 2016), do Sistema Adutor Agreste Trairi/Potengi. As alternativas analisadas e os resultados obtidos são apresentados na tabela 4 e os balanços de fluxo na tabela 5.

Tabela 4 – Alternativas analisadas e resultados obtidos

Simulação	Alternativa	Vazão l/s	Resultado
1	7 poços existentes no setor ocidental	230	Viável (Fig. 13)
2	230 l/s de 7 poços existentes no setor ocidental mais 250 l/s de 12 poços afastados de 400 m na área Canjoão.	480	Viável (Fig. 14)
3	230 l/s de 7 poços existentes no setor ocidental mais 250 l/s de 8 poços afastados de 900 m na área Boacica.	480	Inviável pelo risco de intrusão marinha, sugerido pelo avanço da equipotencial zero (fechada) até o campo de poços (Fig. 15).

Tabela 5 – Distribuição do balanço de fluxo nas simulações

Simulação	Balanço do fluxo natural (m ³ /s)				
	Riacho Pium	Riacho Boacica	Rio Trairi	Poços	Total
1	0,46	0,62	0,75	0,23	2,06
2	0,46	0,43	0,75	0,48	2,12
3	0,46	0,45	0,75	0,48	2,14

Discussão

A confiabilidade dos resultados baseados em modelos numéricos sempre encerra algum grau de incerteza, sobretudo em uma região de hidrogeologia complexa como a da área de estudo, onde as águas superficiais e subterrâneas estão diretamente ligadas. As variações dos parâmetros envolvidos podem ser muito grandes, de um setor para outro e por isso há necessidade de um monitoramento permanente de níveis d'água de poços e de lagoas, bem como de descargas de poços

e de rios, para que se possa ajustar as previsões do modelo com a realidade observada. No caso em estudo, o mapa potenciométrico produzido pelo modelo parece bastante consistente com a realidade ao indicar, sobre 200 km², recursos renováveis de 2,1m³/s.

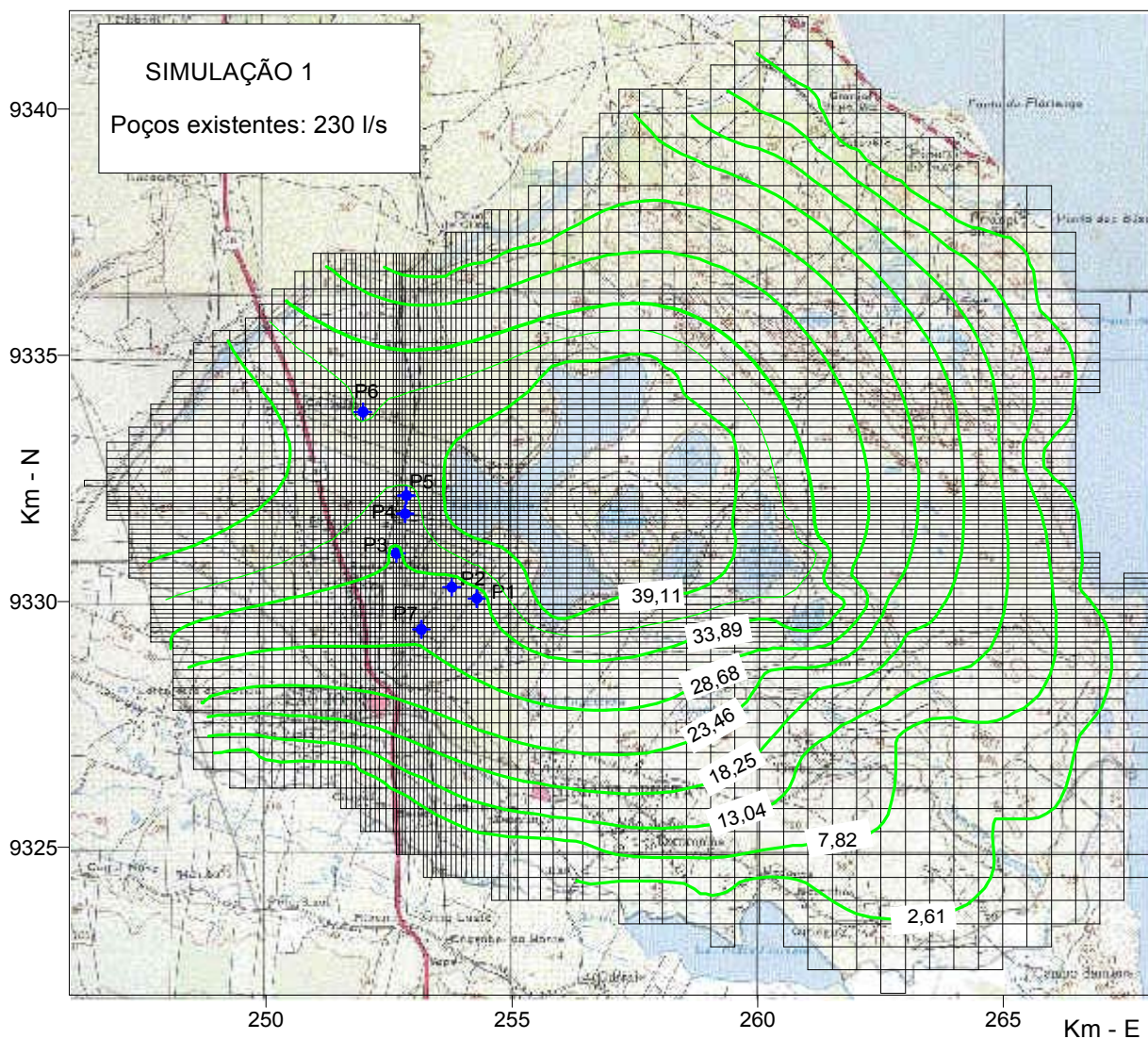


Fig. 13 –Superfície das águas subterrâneas com exploração de 230 l/s de 7 (sete) poços produtores no setor ocidental do subsistema lacustre.

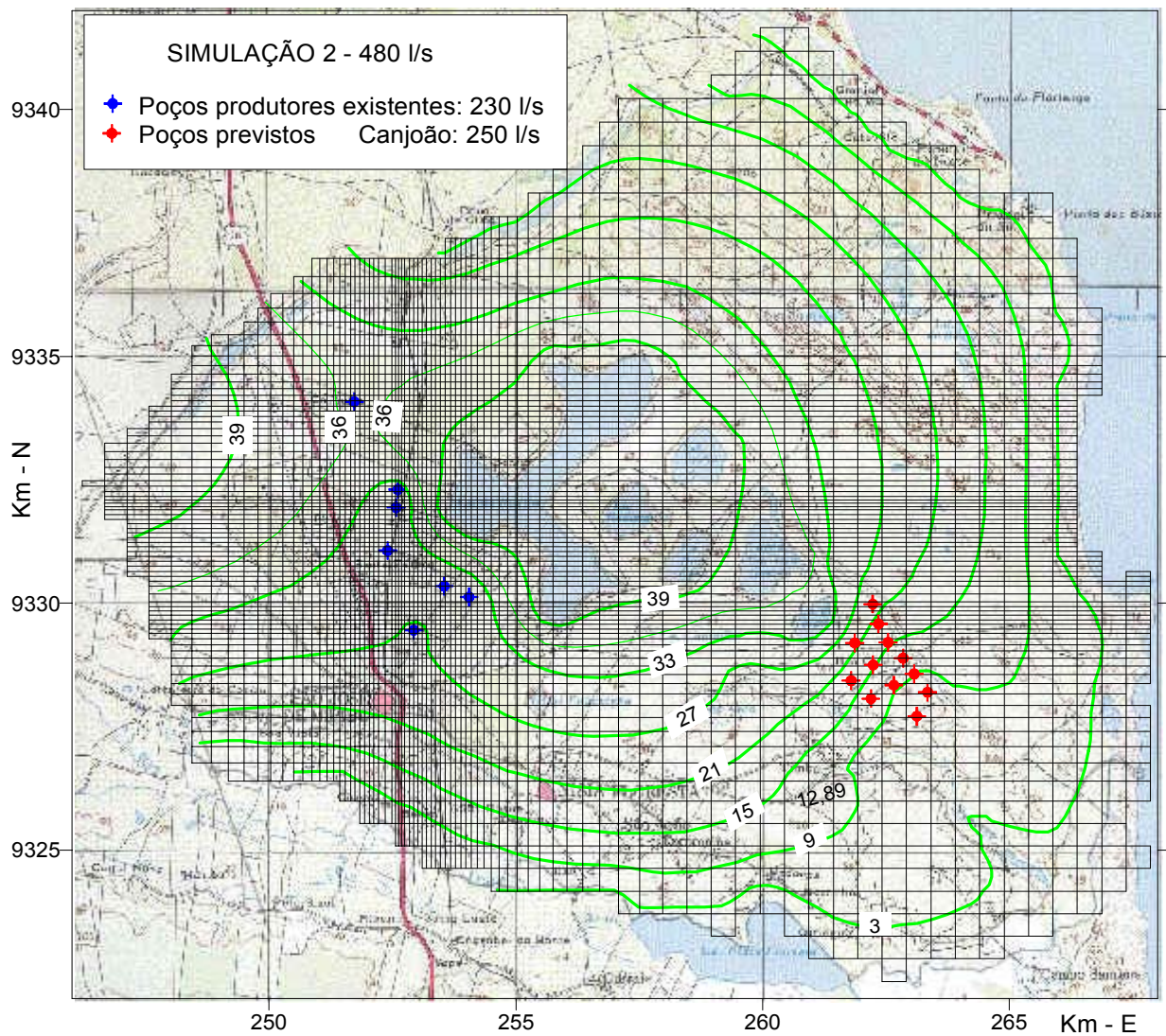


Fig. 14 – Mapa potenciométrico obtido na 2ª simulação do aquífero Dunas-Barreiras com o modelo MODFLOW, para 480 l/s, sendo 230 l/s de 7 poços existentes e 250 l/s de 12 poços no sítio Canjoão.

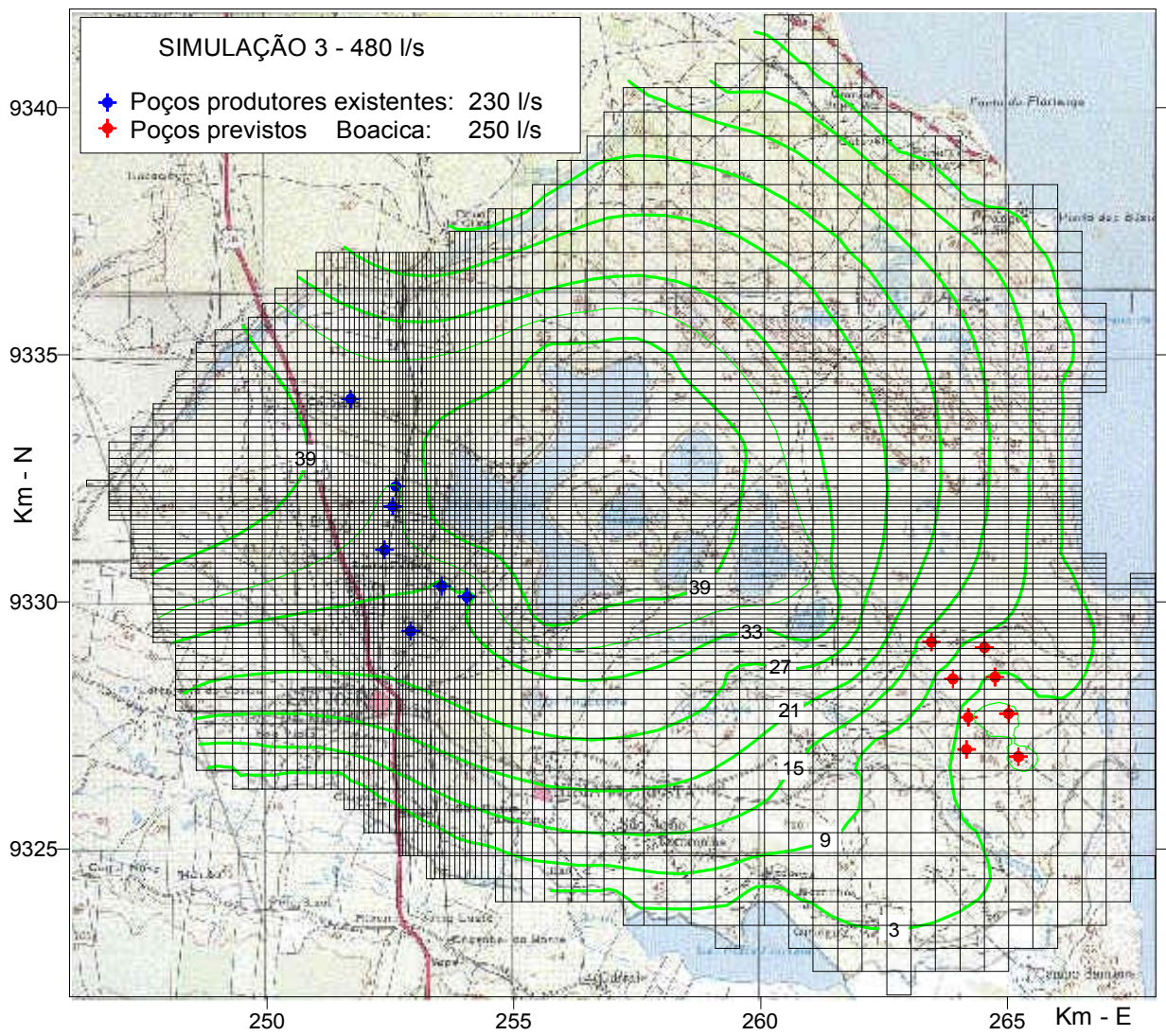


Fig. 15 – Mapa potiométrico obtido na 3ª simulação do aquífero Dunas-Barreiras com o modelo MODFLOW, para 480 l/s, sendo 230 l/s de 7 poços existentes e 250 l/s de 8 poços no sítio Boacica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Born, S. M.; Smith, S. A.; Stephenson, D. A. 1979. The hydrogeologic regime of glacial-terrain lakes, with management and planning applications. *J. Hydrol* 43:7-43.
- Castro, V. L. L. 1994. Origem e mecanismo de poluição das águas subterrâneas na área de Cidade Nova – Natal RN. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. 97p.
- COSTA, 1997. Estudo da Disponibilidade Hídrica da Lagoa do Bonfim, contrato 009/95 SERHID/RN, Natal, RN.
- Feitosa, E. C. 1998. Estudo geofísico por eletroresistividade da região do complexo lagunar do Bonfim. Esboço tectono-estrutural da área e suas relações com as espessuras do aquífero Barreiras. FUNPEC-LABHID-FADE-UFPE. Relatório Técnico 44p.
- Feitosa, E.C. 2001. Avaliação qualitativa por eletroresistividade das transmissividades hidráulicas do aquífero Barreiras na região do complexo lagunar do Bonfim – RN. TC/BR-LABHID-FADE-UFPE. Relatório Técnico 53p.
- Gosselin, D. C. & Khisty, M. J. 2001 – Simulating the influence of two shallow, flow-through lakes on a groundwater system: implications for groundwater mounds and hinge lines. *Hydrogeology Journal*. 9:476-486.
- Jacob, C. E. 1944. Notes on determining permeability by pumping tests under water table conditions. U. S. Geological Survey. Mimeo Report.
- McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. Book 6. Chapter A1.
- Neuman, S. P. 1972 –Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4):1031-1045.
- Thornthwaite, C. W. & Matter, J. R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Vol. 10, nº 3, C. W. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.