

FATORES CLIMÁTICOS E GEOESTRUTURAIS AFETANDO OS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS NA REGIÃO A OESTE DE TOUROS, RN

José Geraldo De Melo¹; Josimar Alves de Oliveira²; Vera Lúcia Lopes² & José Braz D. Filho³

Resumo – A área de estudo situa-se na zona de transição entre a Bacia Costeira, de clima úmido, e, a Bacia Potiguar, semi-árida, no Rio Grande do Norte, cobrindo uma área de 190 km². As águas subterrâneas armazenadas nos arenitos do Grupo Barreiras e a lagoa do Boqueirão constituem os mananciais utilizados para o suprimento das comunidades locais e irrigação. Este trabalho foi realizado diante da perspectiva de aumentar a oferta d'água para o atendimento de demandas locais e de comunidades da região semi-árida, localizadas à distâncias de até 70 km do Boqueirão, onde águas são escassas. Verificou-se a possibilidade de captação de um volume d'água de 15,4 milhões de m³/ano, sendo que 60% deste volume já é explorado atualmente. As águas subterrâneas no setor a leste da Lagoa do Boqueirão são de salinidade muito baixa e do tipo Na⁺-Cl⁻, enquanto que as águas nos demais setores são de salinidade média a elevada e do tipo Ca⁺⁺-Mg⁺⁺-Cl⁻-HCO₃, provavelmente afetadas pelas águas de calcários e dolomitos subjacentes ao aquífero Barreiras. As águas superficiais são de salinidade baixa a média e do tipo Na⁺-Ca⁺⁺-Mg⁺⁺-Cl⁻-HCO₃, que provavelmente representam uma mistura de águas dos arenitos do aquífero Barreiras e das rochas carbonáticas.

Abstract. The area is situated in the transition zone between the Coastal Basin, where the climate is humid, and, the Potiguar Basin, semi-arid region, RN, covering 190 km². The Barreiras aquifer and the Boqueirão Lake are the resources that supply the communities and irrigate part of that area. This work was performed to evaluate the possibilities of increasing the water provision to the local development and to supplying communities in the semi-arid region, placed up to 70 km from the Boqueirão, where there is a shortage of water. An annual exploitable volume of water, about 15,4 million m³, was evaluated. The groundwater on the east sector of the Boqueirão Lake has a very low average of salinity, and Na⁺-Cl⁻ is the water type that predominates. On the other sectors, the salinity of water varies from medium to high and the water types are Ca⁺⁺-Mg⁺⁺-Cl⁻-HCO₃. In this case, it's possible that the limestone rocks underlying the "Barreiras" aquifer affects the waters. The salinity of the surface waters varies from low to medium and are Na⁺-Ca⁺⁺-Mg⁺⁺-Cl⁻-HCO₃, which

¹ Departamento de Geologia e Mestrado em Geociências da UFRN; (084)2088437; jgmelo@ufnet.br

² Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SERHID)

³ Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do RN (IDEMA)

represent the mixture of waters from the Barreiras aquifer sandstone and the waters from the carbonate rocks.

Palavras-chave – Semi-árido, região úmida, água subterrânea, água superficial.

INTRODUÇÃO

A área de estudo localiza-se a cerca de 10 km a Oeste da cidade de Touros, RN, já na zona de transição entre o litoral leste do Estado, que se caracteriza por vales úmidos e rios perenes, e, o litoral norte, tipicamente semi-árido, em geral com rios transitórios. As águas subterrâneas e a Lagoa do Boqueirão constituem os principais recursos utilizados pela população tanto no abastecimento humano como na irrigação. Suas potencialidades, entretanto, só recentemente é que foram avaliadas, através do desenvolvimento do projeto "Quantificação da oferta Hídrica da Região da Lagoa do Boqueirão", elaborado para a Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte, e, do qual faz parte este artigo. O objetivo do trabalho foi verificar as possibilidades de ampliar a oferta d'água para o atendimento não somente a demandas locais como também no suprimento de comunidades da região semi-árida da Bacia Potiguar, situadas à distâncias de até 70 km da área de estudo, onde os recursos hídricos superficiais e subterrâneos são escassos. O trabalho foi desenvolvido nos cursos superior e médio do Rio Boqueirão até o limite inferior da lagoa, correspondendo a uma superfície da ordem de 190 km² (Figura 1). A lagoa do Boqueirão é um reservatório d'água superficial de forma alongada, no sentido SW-NE, com cerca de 6 km de extensão, largura média de 200 m e profundidade máxima de 10,8 m. As atividades do projeto em apreço compreenderam: cadastramento das estruturas hídricas e dos usuários das águas subterrâneas e da lagoa; 15 sondagens mecânicas de reconhecimento lito-estratigráfico; perfuração de 5 poços tubulares com profundidade de até 84 m para testes de aquífero; instalação de 10 piezômetros; serviços de nivelamento topográfico e batimetria da Lagoa; monitoramento dos níveis das águas subterrâneas e da lagoa; medições de descarga do Rio Boqueirão em diferentes seções; além da coleta de amostras d'água para análise química completa. No presente artigo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho, abordando os seguintes assuntos: a caracterização da estrutura hidrogeológica; os parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero; o padrão do fluxo subterrâneo e suas relações com as águas superficiais; recarga das águas subterrâneas e recursos eplotáveis; simulação da exploração das águas da Lagoa do Boqueirão; e avaliação hidrogeoquímica e da qualidade das águas. Na avaliação dos recursos das águas subterrâneas e superficiais foram considerados além das informações levantadas no âmbito deste trabalho, dados dos estudos regionais de Santos (1982) e Melo (1995). Também, foram consultados livros e artigos que tratam de avaliação da recarga e de fluxo de águas subterrâneas, entre os quais convém destacar Lerner et

all (1990); Fetter (1994); Simmers et al (1997); Lerner (1997); Healy & Cook (2002); Sanford (2002) e Vries & Simmers (2002).

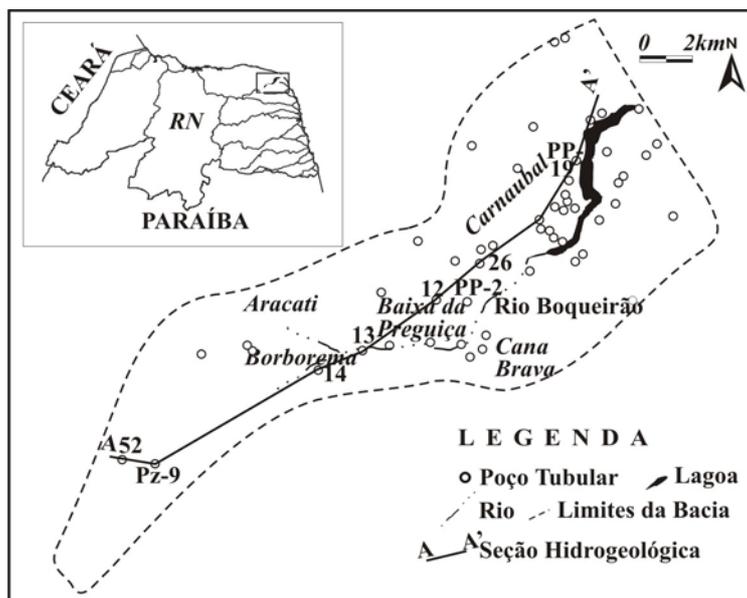


Figura 1. Mapa de localização da área e da seção hidrogeológica

FATORES FÍSICOS ENVOLVIDOS

A área é caracterizada por um clima tropical chuvoso, do tipo úmido seco a sub-úmido, com precipitações pluviométricas da ordem de 792 mm. Está situada na bacia hidrográfica do Rio Boqueirão, sendo cortada por este no sentido SW-NE, tendo como principal característica a formação da lagoa do Boqueirão, cujas águas são parcialmente drenadas em superfície pelo curso do rio a jusante da lagoa e em seguida descarregada no mar. Fora do domínio do curso d'água superficial, a rede de drenagem é muito pouco densa, com a formação de tabuleiros, sugerindo reduzidos escoamentos superficiais e elevadas taxas de infiltração.

Do ponto de vista geomorfológico, a maior parte da bacia faz parte da unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros, que nesta região são pouco dissecados, apresentando extensas superfícies com relevos planos a suavemente inclinados, cujas cotas topográficas variam desde 12 m, à margem da lagoa do Boqueirão até 133 m, no alto curso da bacia.

Segundo Mont' Alvern (1998), a geologia da área compreende predominantemente sedimentos terciário-quadernários do Grupo Barreiras com recobrimentos do recente (quadernários). Ver Figura 2. O Grupo Barreiras é formado de arenitos heterogêneos, em geral pouco consolidados, e argilas variegadas intercaladas. Na parte superior dos perfis, os sedimentos são mais argilosos e na parte inferior, são em geral mais arenosos, com granulometria variando de média a grossa. O Grupo Barreiras sobrepõe-se à rochas carbonáticas de idade atribuída ao cretáceo, que são calcáreos, calcarenitos e dolomitos da Formação Jandaira, que afloram no setor noroeste da área já fora dos

limites desta. Do ponto de vista estrutural, a área está situada na região de influência do denominado "Alto de Touros", com a ocorrência de falhamentos escalonados, na direção de montante para jusante da bacia.

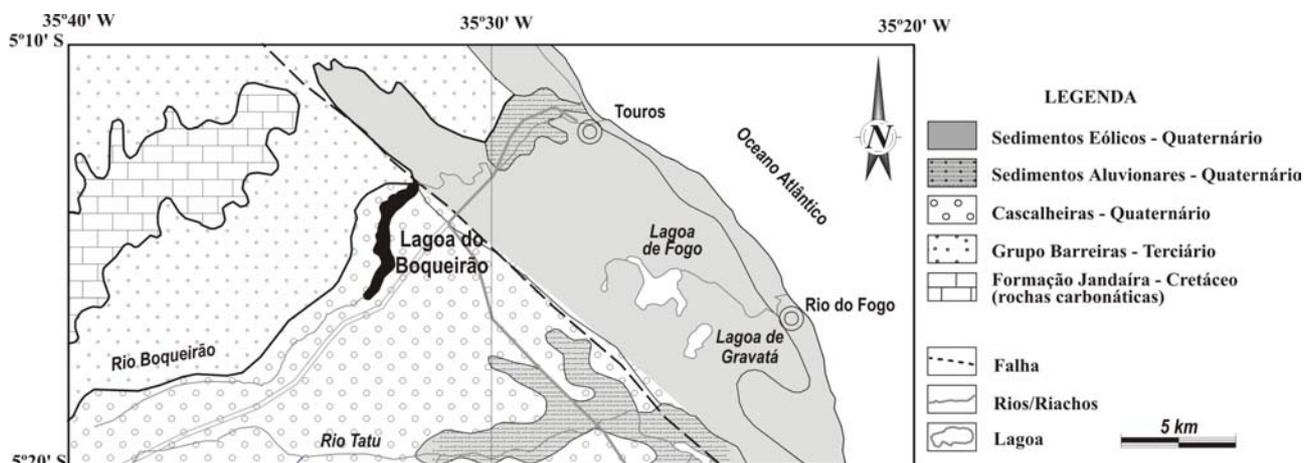


Figura 2: Mapa geológico da Lagoa do Boqueirão, RN (modificado de Mont'Alvern 1998)

RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Uso das águas subterrâneas

De acordo com os resultados do cadastramento de campo (Janeiro 2001), existem 36 poços tubulares e 15 cacimbões captando águas subterrâneas, na área de estudo, que no total fornecem uma de descarga anual da ordem de 2 milhões de m^3 . Essas águas são utilizadas na irrigação de culturas e no suprimento doméstico das comunidades e população rural em geral. Os poços tubulares apresentam profundidades que variam de 10,0 a 256m, estando na maior parte dos casos captando águas armazenadas nos sedimentos inferiores do Grupo Barreiras com descargas muito variadas, desde vazões pouco significantes com menos de $5m^3/h$ até vazões de $110 m^3/h$. Os poços que captam águas dos calcários, subjacentes ao Barreiras (profundidade superior a 85 m), em geral fornecem baixas vazões.

Estrutura hidrogeológica

De acordo com os resultados das sondagens mecânicas, os sedimentos Barreiras desenvolvem espessuras que variam de 37,0 m até 84,0 m. Quanto a espessura saturada, os sedimentos Barreiras se apresentam insaturados no alto curso da bacia hidrográfica do Boqueirão e no médio curso, na altura da lagoa do Boqueirão, desenvolvem espessuras saturadas efetivas (sem considerar as intercalações argilosas) que variam de 26,0 a 46,9m. De um modo geral, há um aumento das espessuras, tanto totais como efetivas, de montante para jusante.

A figura 3 apresenta um perfil hidrogeológico longitudinal ao Rio Boqueirão, fruto da correlação de perfis de poços, no qual se pode visualizar a ocorrência de falhas geológicas normais,

Fluxo subterrâneo e sua relação com as águas superficiais

A configuração das equipotenciais apresentadas na figura 4 sugere que existe uma estreita relação entre as águas subterrâneas e as águas superficiais. A lagoa do Boqueirão é alimentada, em parte, pelas águas subterrâneas oriundas de duas frentes de escoamento bem definidas: uma frente de escoamento do setor sul - sudoeste da lagoa e uma outra oriunda da região a leste deste corpo d'água superficial. A lagoa do Boqueirão é também alimentada pelo dreno superficial do Rio Boqueirão conhecido localmente como riacho Cana Brava. A vazão do fluxo subterrâneo (Q) em direção à lagoa do Boqueirão foi avaliada a partir da lei de Darcy. A aplicação baseada nas Figuras 3 e 4, resultou em uma descarga de $0,216 \text{ m}^3/\text{s}$. De forma similar, a descarga do fluxo subterrâneo saindo da lagoa nas direções norte e oeste, foi avaliada em $0,107 \text{ m}^3/\text{s}$. É possível que esta diferença ($0,109 \text{ m}^3/\text{s}$) represente a contribuição de água subterrânea para a lagoa do Boqueirão. A vazão total do fluxo subterrâneo natural na área é da ordem de $0,274 \text{ m}^3/\text{s}$.

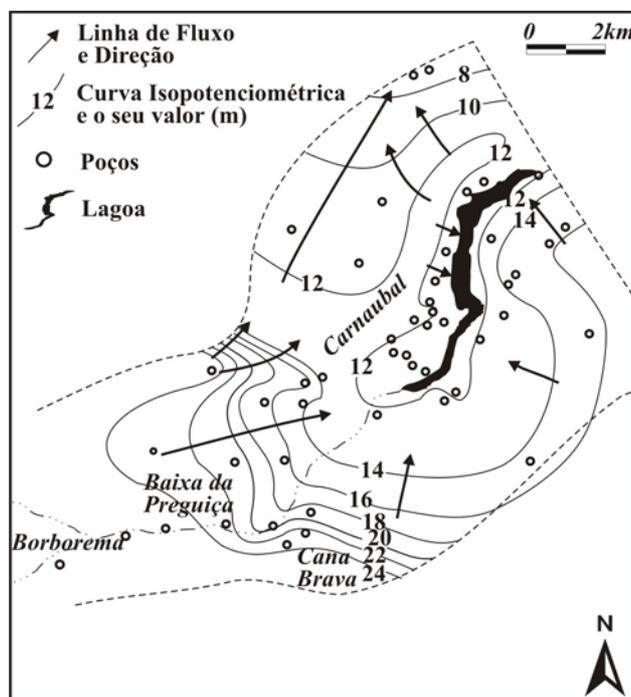


Figura 4. Potenciometria do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Boqueirão/RN

Recarga das águas subterrâneas e recursos exploráveis

A bacia do Rio Boqueirão, no domínio da área de estudo, apresenta setores com diferentes comportamentos hidrogeológicos condicionados a presença de falhamentos que limitam a ocorrência e distribuição das águas subterrâneas. As considerações sobre as potencialidades do aquífero Barreiras são apresentadas tomando por base as dimensões do reservatório subterrâneo, a produtividade de poços, as flutuações sazonais do nível potenciométrico e os parâmetros

hidrodinâmicos do aquífero, além da vazão de fluxo subterrâneo natural e informações de estudos hidrogeológicos regionais.

A análise integrada dos resultados dos estudos permitiu a identificação de quatro zonas com diferentes possibilidades em termos de produção de água, conforme apresentado na figura 5 e descrição a seguir:

Zona (A): Corresponde ao trecho da Bacia na altura da lagoa do Boqueirão, onde o aquífero Barreiras é de maior potencial hidrogeológico. Neste domínio, o aquífero apresenta maiores espessuras e transmissividades mais elevadas. É possível a perfuração de poços produzindo até $100\text{m}^3/\text{h}$;

Zona (B): É uma estreita faixa da bacia na altura de Cana Brava, cuja potencialidade é referida como média. A produtividade de poços neste domínio é de até $50\text{m}^3/\text{h}$;

Zona (C): Envolve as localidades de Borborema e Baixa da Preguiça. Trata-se de uma região bastante afetada por falhamentos que condicionaram a ocorrência de perfis muito argilosos e baixas espessuras saturadas. É de potencial hidrogeológico baixo a muito baixo. Neste setor, é possível a perfuração de poços produzindo no máximo $10\text{m}^3/\text{h}$.

Zona (D): Corresponde ao curso superior da bacia, onde a estrutura hidrogeológica não contribui para o armazenamento de água subterrânea. As potencialidades do aquífero neste setor foram identificadas como nulas.

Apesar da presença de sedimentos argilosos na parte superior do "Barreiras", o mesmo ainda desenvolve o caráter de um aquífero livre. Assim sendo, a recarga das águas subterrâneas processa-se em geral diretamente pelas precipitações pluviométricas que caem sobre a superfície do solo. Ocorre, entretanto, uma visível defazagem entre a ocorrência das chuvas e as correspondentes reações nos níveis das águas subterrâneas (Figura 6). Em um sistema livre, em condições de equilíbrio, a infiltração eficaz corresponde praticamente às reservas reguladoras e à vazão do fluxo subterrâneo natural.

A vazão do fluxo subterrâneo natural foi avaliada em $0,274\text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a 8,2 milhões de m^3/ano . Quanto aos recursos anuais renováveis, tomando por base a flutuação sazonal de 1,3 m, obtida do monitoramento dos níveis d'água, fora da área de influência da Lagoa do Boqueirão, e, porosidade específica de 7% (Santos, 1982), numa área efetiva de 90 km^2 , obtêm-se para o aquífero Barreiras um valor equivalente de 8,2 milhões de m^3/ano . Os estudos regionais indicam uma flutuação média anual do nível potenciométrico do aquífero Barreiras da ordem de 1,62m. Assim sendo, os recursos anuais renováveis seriam da ordem de 10,2 milhões de m^3 . Também, neste estudo regional, são feitas estimativas da taxa de recarga no aquífero Barreiras utilizando métodos isotópicos (injeção de água tritiada) com a obtenção de um valor médio de 16%. Tomando por base este parâmetro, desde que as precipitações pluviométricas são da ordem de

792mm, o volume d'água infiltrado anualmente na bacia do Boqueirão é da ordem de 11 milhões de m³.

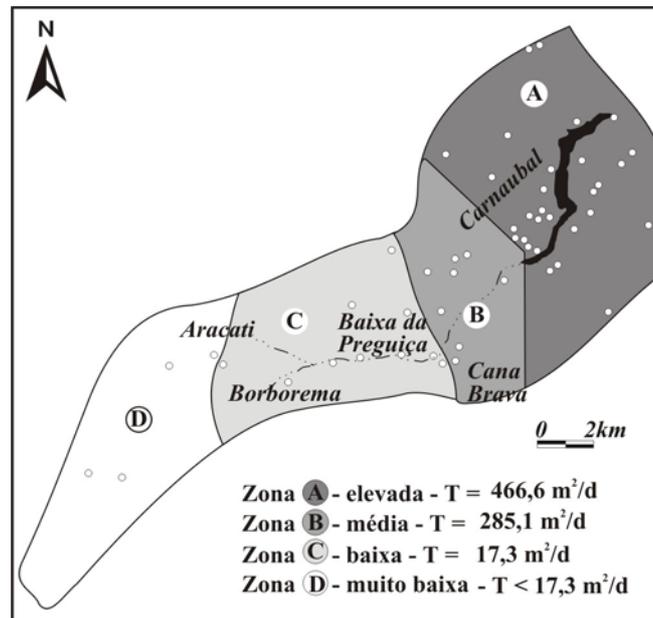


Figura 5: Potencialidades do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Boqueirão, RN

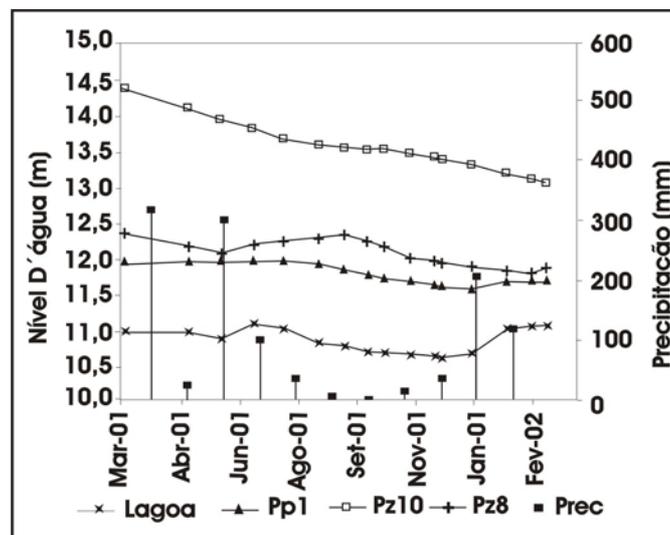


Figura 6: Variação sazonal do nível d'água em poços, na lagoa do Boqueirão e variação da precipitação.

Em uma primeira aproximação, como medida de segurança, os recursos anuais exploráveis serão tomados como equivalentes às reservas reguladoras ou a vazão do fluxo subterrâneo natural obtidos no âmbito deste estudo ou seja 8,2 milhões de m³. É possível que este valor esteja subestimado, notadamente considerando que as estimativas efetuadas se limitam à bacia hidrográfica. De fato, está bem caracterizado a existência de um fluxo subterrâneo regional que extrapola os limites da bacia hidrográfica e que muito provavelmente está associado à concepção de uma bacia hidrogeológica de dimensões bem mais elevadas.

RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS

Uso das águas superficiais

Foram cadastrados 48 usuários da lagoa do Boqueirão, que no seu conjunto exploram um volume total de 7,2 milhões de m³ de água /ano. As águas bombeadas são utilizadas quase que exclusivamente para a irrigação de culturas, de natureza diversas. O setor sul ou margem direita da lagoa é caracterizado por grandes irrigantes e o setor norte, margem esquerda, é dominada por pequenos irrigantes.

Batimetria da lagoa do Boqueirão

Para o desenvolvimento das simulações necessárias à avaliação das condições de exploração da lagoa do Boqueirão foi necessário a estimativa do volume de acumulação da lagoa, cuja capacidade era desconhecida até o momento. O levantamento do volume da lagoa foi realizado através de batimetria digital, utilizando-se de um par de GPS (Global Positioning System) de precisão, uma sonda batimétrica, e um microcomputador portátil, cuja interpretação dos resultados permitiram estimar os seguintes parâmetros para a lagoa: volume de acumulação: 11,07 hm³ ; área superficial da lagoa: 2,089 km² ; profundidade média: 5,30m; profundidade máxima: 10,20 m; profundidade mínima: 0,70 m.

Simulação da exploração da Lagoa do Boqueirão

Para a simulação do comportamento da lagoa do Boqueirão sob diferentes taxas de bombeamento, foi desenvolvido um modelo matemático de simulação hidrológica com período de tempo mensal. O modelo desenvolvido baseia-se na equação de balanço hídrico e considera as principais variáveis de entrada (I) e saída (O) do sistema, conforme a seguir:

$$dS/dt = I - O \text{ e } dS_i = Q_i + P_i - E_i - D_i - V_i,$$

sendo dS a variação de volume na lagoa; Q_i o volume afluente; P_i o volume precipitado diretamente sobre a lagoa; E_i o volume evaporado; D_i o volume retirado e V_i o volume vertido no mês i.

O volume mensal afluente à lagoa foi obtido a partir da vazão média mensal de 54 anos, gerada a partir de um modelo chuva-vazão (SSARR). Os dados foram obtidos a partir dos estudos desenvolvidos para o Plano Estadual de Recursos Hídricos elaborado para a SERHID, RN. 1988.

O armazenamento da lagoa no mês i (S_i), foi calculado aplicando o balanço hídrico sucessivamente ao longo dos meses de simulação, a partir de um valor inicial dado no início do

processo. Verificou-se a possibilidade de explorar uma descarga de 240 l/s ou 7,2 hm³/ano, com uma garantia de 100% e abaixamentos do nível da lagoa da ordem de 2,00 m.

AVALIAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS

Amostragem, parâmetros e balanço de massas

Estes estudos foram conduzidos com base na interpretação dos resultados de análises químicas de amostras d'água coletadas em 21 poços tubulares profundos; 3 cacimbões; 3 piezômetros; 2 pontos da lagoa do Boqueirão e 1 um ponto d'água no Rio Boqueirão à montante da lagoa. As coletas foram feitas em fevereiro e março de 2001. As análises foram efetuadas no Laboratório de Análises de Águas e Solos da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). com a determinação dos cátions e ânions principais, além de condutividade elétrica, pH, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, dureza, ferro e os compostos da série nitrogenada (amônia, nitrito e nitrato). Os resultados foram interpretados com a ajuda de software especializado, que permite o tratamento de dados hidroquímicos utilizando a análise gráfica e numérica. O balanço de massas indicou uma diferença percentual entre cátions e ânions variando de 0,1 a 3,8%, o que permitiu caracterizar a precisão os resultados das análises como excelente. O erro deve ser inferior a 5% para uma análise de alta qualidade (Pyne, 2000).

Análise hidrogeoquímica

No domínio da bacia hidrográfica do Boqueirão ocorrem setores com diferentes características hidroquímicas, os quais serão a seguir discutidas.

No setor a leste da lagoa do Boqueirão as águas subterrâneas apresentam condutividade elétrica variando de 46,70 a 122,5µS/cm, com média de 70,9 µS/cm; o teor de cloreto varia de 15,3 a 29,12 mg/l, com média de 20,51 mg/l; O pH variou de um mínimo de 5,2 a um máximo de 7,40, com média de 5,98. Assim sendo, as águas são de salinidade muito baixa e em geral ácidas.

No setor a oeste da lagoa do Boqueirão, águas subterrâneas apresentam condutividade elétrica variando de 120,5 a 1546,6 µS/cm, com média de 870,22 µS/cm, portanto, são águas de salinidade bem mais elevada que as águas do setor a leste da lagoa; o cloreto, variou de 27,05 a 432,02 mg/l, com média de 240,28 mg/l; quanto ao pH, o valor mínimo foi de 4,0 e o máximo de 7,9, com média de 6,86, portanto, em condições similares ao obtido no caso anterior.

No setor a montante da lagoa do Boqueirão, as águas apresentam condutividade elétrica variando de 154,7 a 1606,8 µS/cm, com média de 746,99 µS/cm. O teor de cloreto, variou de 21,54 a 479,23 mg/l, com média de 199,12 mg/l; O pH variou de 6,3 a 8,1, com média de 7,43, mostrando uma certa tendência para águas mais básicas. Em termos de salinidade, estas águas são similares às

águas do setor oeste da lagoa. Segundo os valores de pH, e dentro da classificação de Hem (1985), as águas em geral podem ser consideradas "Comuns".

A elevada salinidade das águas do aquífero Barreiras no setor a oeste da lagoa e a montante da mesma esta associado a uma provável contribuição das águas dos calcários subjacentes, podendo também estarem sendo influenciadas pelo clima do domínio semi-árido da Bacia Potiguar.

As águas superficiais, rio e lagoa apresentam níveis de salinidade baixa a média, com condutividade elétrica variando de 150 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Observa-se, entretanto, que há um aumento da condutividade de montante para jusante.

Os resultados das análises químicas dos cátions e ânions principais das amostras d'água analisadas, expressos em termos percentuais, são representados no diagrama trilinear de Piper na Figura 7, no qual pode-se identificar os tipos hidroquímicos dominantes e associa-los com as diferentes direções do fluxo subterrâneo, unidades geológicas e os aspectos estruturais envolvidos.

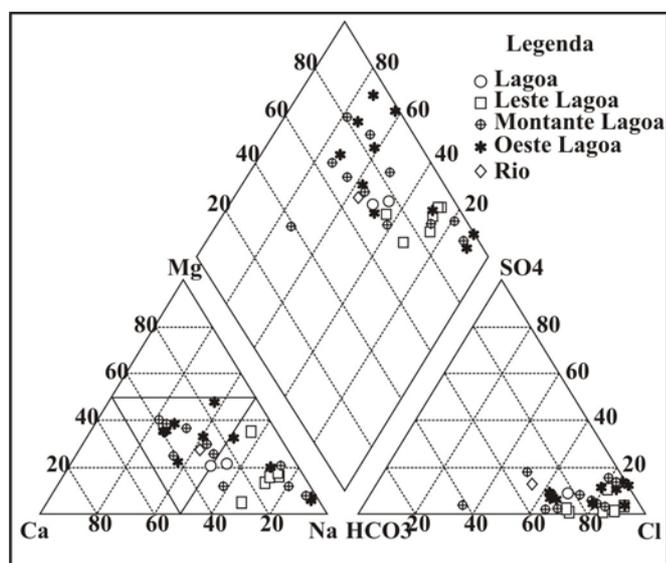


Figura 7: Diagrama Piper

As águas do setor a leste da lagoa do Boqueirão, além de serem de salinidade muito baixa, conforme mostrado anteriormente, são, em geral, águas do tipo $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$, que é uma característica das águas do aquífero Barreiras regionalmente ou mais precisamente na maior parte da faixa costeira leste do Estado.

Nos setores a oeste e a montante da lagoa do Boqueirão, as águas do aquífero Barreiras tendem a ser do tipo $\text{Ca}^{++}\text{-Mg}^{++}\text{-Cl}^-\text{-HCO}_3^-$. Estas águas estão, provavelmente, afetadas pelos arenitos calcíferos, calcários e dolomitos subjacentes ao aquífero Barreiras, cuja formação geológica aflora a uma distância de cerca de 8 km da extremidade oeste da área de estudo. Os casos de águas do tipo $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ neste setor, correspondem a águas de poços rasos (cacimbões) sem nenhuma proteção sanitária ou abandonados, provavelmente, afetadas por contaminantes.

As águas do Rio e lagoa do Boqueirão, de salinidade baixa a média, são dominadas pelo ânion cloreto seguido do bicarbonato, e, cátion sódio, seguido de cálcio e magnésio ou seja, são águas $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{++} - \text{Mg}^{++} - \text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$. Representam uma provável mistura de águas dos arenitos do aquífero Barreiras e dos arenitos calcíferos, calcários e dolomitos da Formação Jandaira, com um maior percentual de águas do aquífero Barreiras. As posições dos pontos no diagrama de Piper representado as águas superficiais, sugerem este fato.

Associando a distribuição dos pontos d'água no triângulo dos Cátions (diagrama de Piper) com a situação no terreno, verifica-se que na direção geral leste - oeste do fluxo subterrâneo, o cátion sódio tende a trocar de posição com o cátion cálcio ou magnésio e o ânion cloreto é reduzido em substituição ao ânion bicarbonato.

Qualidade das águas

O conceito de qualidade das águas geralmente está associado as características das mesmas quanto a sua utilização. Assim sendo, o conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e bacteriológicas são fundamentais. Os aspectos bacteriológicos não são levados em consideração neste trabalho. A qualidade das águas subterrâneas e superficiais da bacia hidrográfica do Rio Boqueirão, no domínio estudado, é avaliada levando em consideração o uso das mesmas no abastecimento humano e irrigação.

Com relação ao uso das águas subterrâneas no abastecimento humano, a análise dos resultados das amostras permitiram as seguintes considerações: As águas subterrâneas, como era de se esperar, não apresentam restrições aos parâmetros físicos; 70% das amostras d'água analisadas indicam águas de excelente a boa qualidade química para o uso humano e 30% apresentam concentrações de cloreto superior a 250 mg/l, que é o limite estabelecido pela OMS para uma água potável. Estas águas, com teores elevados de cloreto, apresentam, em alguns casos, sólidos totais dissolvidos elevados e concentrações também elevadas de sódio e ferro. São águas provenientes de cacimbões sem nenhuma proteção, e, portanto, vulneráveis à contaminação. As águas superficiais são em geral de boa qualidade físico-química, ressaltando-se, entretanto, que na lagoa do Boqueirão, em ponto de coleta próximo ao limite superior da lagoa, foi constatada a presença de nitrogênio amoniacal com concentração de 0,14 mg/l e próximo ao seu limite inferior (área utilizada por banhistas), de 0,61 mg/l, sugerindo desta feita indícios de contaminação no reservatório superficial.

A qualidade das águas para a irrigação foi caracterizada levando em conta o risco de salinidade e o risco de alcalinização. Neste caso, a razão de adsorção de sódio (SAR) é o índice a ser considerado. O SAR é definido como a relação entre a concentração de sódio e a raiz quadrada da metade da concentração do cálcio mais o magnésio, onde os valores são expressos em unidade

de meq/l. Segundo Lloyd e Heathcote (1985) os grupos de águas baseados na condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) são: Salinidade baixa, água com menos de 200; salinidade média, água com valores compreendidos entre 250 e 750; salinidade alta, água com valores entre 750 e 2250; salinidade muito alta, valores maiores que 2250. Em relação ao SAR: valores menores que 10 são considerados baixos; entre 10 e 18, médio; entre 18 e 26, alto; mais que 26, muito alto.

Enquanto que alta concentrações de sais na água contribui para a formação de um solo salino, alta concentração de sódio contribui para o desenvolvimento de um solo alcalino. Um solo alcalino tem uma estrutura desfavorável, encharca facilmente e limita a aeração. Além disso, alta saturação em sódio causa deficiência de cálcio. A irrigação utilizando água com baixa taxa de adsorção de sódio é recomendável (Raghunath, 1982).

As águas subterrâneas do aquífero Barreiras no setor a leste da lagoa do Boqueirão são excelente para irrigação: o risco de salinidade é baixo, desde que a condutividade elétrica registrada variou de 46,7 a 122,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C . O risco de sódio (alcalinização) é igualmente baixo, cujos valores do SAR foram de 1,13 até 1,51. Nos outros setores da área, as águas subterrâneas foram classificadas em geral como médias quanto ao uso na irrigação: A condutividade elétrica, em sua maioria, foi maior que 401,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e menos que 1606,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com valor médio de 808,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$; O valor do SAR, em 76% dos casos, foi menor que 2,28. Os outros valores, no qual o SAR atinge até 16,62, foram obtidos de amostras d'água coletadas em poços rasos de grande diâmetro (cacimbão) e visivelmente contaminados. As águas da lagoa e Rio Boqueirão, foram classificadas como boas para a irrigação: As amostras coletadas na lagoa apresentaram condutividade elétrica média de 355,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o SAR, um valor de 2,1; As características do rio Boqueirão são similares ao observado para a lagoa, cujos valores foram 376,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1,5, respectivamente.

CONCLUSÕES

Os diferentes comportamentos do aquífero Barreiras em diferentes setores da bacia do Rio Boqueirão é atribuído ao seguinte: primeiramente, a área está localizada numa zona de transição entre uma região úmida (faixa costeira leste) e uma região semi-árida (Bacia Potiguar) e, por conseguinte, é influenciada pelos dois tipos climáticos; segundo, o caráter geológico e estrutural, tanto local como regional, que favorece diferentes particularidades hidrogeológicas. Esses caracteres em alguns setores da área favorecem a distribuição e o armazenamento das águas subterrâneas e em outros setores, limitam este recurso ou impedem o seu desenvolvimento.

A ocorrência de falhamentos escalonados no sentido de montante para jusante da bacia do Rio Boqueirão, contribuem para maiores espessuras saturadas e maiores transmissividades do aquífero Barreiras nesta direção. No curso superior da bacia, os sedimentos Barreiras estão praticamente

insaturados e no médio curso esses sedimentos desenvolvem espessuras saturadas de até 47,0 m e transmissividades da ordem de 423,4 m²/d.

O aquífero Barreiras comporta-se em geral como um sistema livre, com a ocorrência localizada de semi - confinamentos.

Existe uma estreita relação entre as águas subterrâneas e superficiais. A lagoa do Boqueirão é alimentada pelo Rio Boqueirão e pelas águas subterrâneas, além da contribuição do fluxo superficial. A contribuição direta de águas subterrâneas para esse reservatório superficial é da ordem de 0,109 m³/s. O Rio Boqueirão é originado por ressurgências de águas subterrâneas na parte superior da bacia.

Uma área com cerca de 90 km², no médio curso da bacia do Rio Boqueirão, que envolve as áreas de Cana Brava e Carnaubal, é a área produtora, ou seja, aquela que apresenta melhores condições hidrogeológicas. Nesta área, precipita-se sobre sua superfície um volume d'água da ordem de 71,28 milhões de m³ /ano. Considerando que os recursos renováveis de águas subterrâneas anualmente são equivalentes a infiltração eficaz e que o mesmo corresponde a 8,2 milhões de m³/ano, a taxa de infiltração diretamente das precipitações é da ordem de 11,5%. Em uma primeira aproximação, os recursos anuais exploráveis do aquífero Barreiras serão tomados como equivalentes as reservas reguladoras e, assim sendo, a oferta d'água subterrânea poderá vir a ser ampliada em mais 6,2 milhões de m³, desde que 2 milhões já são explorados atualmente.

Baseado no modelo de simulação matemática, verifica-se ser possível o bombeamento da lagoa do Boqueirão com uma taxa de 7,2 milhões de m³/ano, em condições sustentáveis. Considerando, entretanto, que já é captado da lagoa quase este valor, não recomenda-se nenhum bombeamento adicional neste reservatório superficial.

As águas subterrâneas do setor a leste da lagoa do Boqueirão são de salinidade muito baixa, e são do tipo Na⁺-Cl⁻; enquanto que as águas dos outros setores, são de salinidade média a alta, condutividade elétrica que chega até 1000 µS/cm, e, águas do tipo Ca⁺⁺-Mg⁺⁺-Cl⁻-HCO₃, provavelmente afetadas pelas águas dos calcários e ou dolomitos subjacentes. As águas superficiais (rio e lagoa), apresentam níveis de salinidade baixa a média, condutividade elétrica entre 150 e 500mg/l, e, são águas Na⁺-Ca⁺⁺-Mg⁺⁺-Cl⁻-HCO₃, que provavelmente representam uma mistura de águas dos arenitos do aquífero Barreiras e das rochas carbonáticas da Formação Jandaira, com um maior percentual de águas do aquífero Barreiras.

Do ponto de vista de qualidade das águas, as águas do setor a leste da lagoa do Boqueirão são de excelente qualidade para o uso humano e irrigação. Neste caso, elas podem ser usadas sem restrições em quase todos os tipos de solos e culturas. As águas dos demais setores, entretanto, apresentam alguma restrição, notadamente pela salinidade média a alta das águas. O uso das águas, neste caso, é recomendado em solos com moderada drenagem e irrigação de culturas com

moderada resistência aos sais. As águas superficiais (lagoa e rio), em suas condições naturais, são boas para o uso humano, alertando-se entretanto quanto a presença de nitrogênio amoniacal com teor de 0,61 mg/l no balneário da lagoa do Boqueirão, o que já pode ser um indicativo de contaminação. Com relação a irrigação, podem ser usadas em quase todos os tipos de solos e em culturas com baixa a moderada resistência aos sais.

Sugere-se que o monitoramento dos níveis dos poços, da lagoa e das descargas do Rio Boqueirão, além da qualidade das águas, iniciado no âmbito deste trabalho, tenha continuidade. Isso, para a obtenção de informações que permitam o controle da exploração e da qualidade das águas e que leve ao uso equilibrado e sustentável dos recursos de águas subterrâneas e superficiais.

REFERENCIAS

- De Melo J. G. - Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal, RN. Tese de Doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Brasil, 1995.
- Fetter C.W. Applied Hydrogeology, 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1994.
- Healy R. W., and Cook P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 91-109, 2002.
- Hem J. D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, 1985.
- Lerner D. N. Groundwater recharge. *Geochemical Processes, Weathering and Groundwater Recharge in Catchments*. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 109-150, 1997.
- Lerner D. N., Issar AS and Simmers I. Groundwater recharge: a Guide to understanding and estimating natural recharge. *International Association of Hydrogeologists*, vol 8. Hannover: Heise, 1990.
- Lloyd J. W. Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater - in introduction. Oxford: Clarendon Press, 1985.
- Mont' Alvern, A. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. DNPM - Sede - 4º Distrito/UFRN/PETROBRAS/CRM, 1998.
- Pyne, R. D. 1995. Groundwater Recharge and wells - A guide to aquifer storage recovery. CRC Press, Inc/ Lewis Publishers.
- Ragnath H. M. Groundwater. A Halsted Press Book. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1982.
- Santos J. P. Estudo Hidrogeológico Regional do Estado do Rio Grande do Norte. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/ *Secretaria de Indústria e Comércio do Rio Grande do Norte*. (Report 15795 - 9 volume). IPT, São Paulo, 1982.

- Simmers I, Hendrickx J. M. H., Kruseman, G. P. and Rushton K. R. Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. *International Association of Hydrogeologists*, 19, A. A . Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1997.
- Sanford W . Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 110-120, 2002.
- SERHID. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte - Recursos hídricos superficiais. Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 1998
- Vries J. J. , and Simmers I 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 5-17.