

Potencial Hidrogeológico e Caracterização Hidrogeoquímica do Aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar no Trecho Apodi-Upanema, RN

Paula Stein, José Geraldo de Melo

Programa de Pós-graduação em Geociências – UFRN

paula.stein@gmail.com

Recebido: 09/07/04 revisado: 04/11/04 aceito: 01/03/06

RESUMO

A área de estudo abrange uma superfície de 1320 km², situada numa região semi-árida com precipitações pluviométricas da ordem de 798,2 mm anuais. A geologia compreende arenitos da Formação Açú, limitados ao norte pela Formação Jandaíra e ao sul pelo embasamento cristalino. O aquífero Açú corresponde a porção inferior da formação homônima, formado por arenitos com intercalações argilosas, apresentando-se sob a forma de aquífero livre com a ocorrência de semi-confinamentos localizados. O objetivo principal do trabalho é avaliar as potencialidades do aquífero Açú, verificar as possibilidades de manutenção das descargas atuais de bombeamento e determinar uma possível ampliação da oferta de água tendo em vista o desenvolvimento da região. Os principais problemas apresentados dizem respeito a irregularidades nas vazões dos poços e na salinidade das águas. A estrutura hidrogeológica e o funcionamento hidráulico do sistema aquífero Açú foram definidos com base no cadastramento de poços, dados de estudos geofísicos, campanhas de medições de níveis de água e interpretação de resultados de testes de bombeamento. Na estimativa da recarga das águas subterrâneas foram aplicadas diferentes metodologias: Balanço hídrico, Lei de Darcy e Balanço de cloreto. A qualidade da água foi avaliada mediante determinação *in situ* da condutividade elétrica seguida de coleta de amostras para análise química completa. A transmissividade do aquífero cresce no sentido de sul para norte, segundo a direção do fluxo subterrâneo, condicionando melhores possibilidades hidrogeológicas na faixa norte da área. Na faixa sul, além do aquífero ser de baixo potencial hidrogeológico, as águas apresentam problemas de salinização. Atualmente o volume de água disponível para a população é em média 8 milhões de m³/ano, o que representa cerca de 15% da recarga estimada em 54 milhões de m³/ano. Ficando, portanto, evidenciada a possibilidade de manutenção das descargas atuais de bombeamento e a maximização da oferta de água. O uso deste recurso em condições de sustentabilidade requer, entretanto, a adoção de medidas adequadas de manejo.

Palavras-chave: Semi-árido; Água Subterrânea; Recarga; Salinização.

INTRODUÇÃO

Este trabalho é parte integrante do projeto “Recursos Hídricos Subterrâneos da Borda Sul da Bacia Potiguar”, executado pela CAERN (Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte) e SERHID (Secretaria dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte) através do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com cooperação técnica da CIDA (*Canadian International Development Agency*); e compreende uma dissertação de mestrado vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRN, defendida em 2003.

A área de estudo é apresentada na figura 1, localiza-se na borda sul da Bacia Potiguar, semi-árido do Estado do Rio Grande do Norte, abrangendo os

municípios de Apodi, Felipe Guerra, Caraúbas e Upanema, com uma superfície de 1320 km². A geologia da área é composta por arenitos da Formação Açú do Cretáceo inferior, estando limitada ao norte por rochas carbonáticas da Formação Jandaíra do Cretáceo superior e ao sul pelo embasamento cristalino Pré-cambriano. O aquífero Açú corresponde a porção inferior da formação homônima, composto por arenitos com intercalações argilosas, apresentando-se sob a forma de aquífero livre com a ocorrência de semi-confinamentos localizados. As águas subterrâneas desempenham o principal recurso utilizado para a população tanto no abastecimento humano como na irrigação. As condições limitantes ao uso dessas águas são a ocorrência de águas com salinidade elevada, em alguns setores; além das baixas vazões dos poços, em muitas situações; e a falta

de conhecimento de suas reais potencialidades, o que impede o uso e manejo adequado das águas subterrâneas.



Figura 1 – Área de estudo

O objetivo do presente trabalho é avaliar as potencialidades hidrogeológicas e condições para a exploração das águas do aquífero Açu. Nesta avaliação serão considerados, além dos aspectos hidrogeológicos, os fatores de ordem hidrogeoquímica. Pretende-se verificar as possibilidades de manutenção das descargas bombeadas atualmente, bem como, contribuir para a elaboração de projetos que contemple o incremento da oferta da água e sirvam de apoio para a gestão do aquífero Açu. Com o desenvolvimento deste trabalho serão definidas zonas segundo o potencial hidrogeológico e a qualidade das águas para o uso humano, permitindo desta feita a otimização da locação e da exploração do manancial subterrâneo, garantindo o uso racional dos recursos disponíveis.

Os procedimentos metodológicos consistiram nas seguintes atividades:

- Elaboração de um inventário hidrogeológico com 332 pontos de água, contendo dados construtivos, hidráulicos, uso da água e parâmetros hidroquímicos;
- Nivelamento altimétrico de poços;
- Avaliação da estrutura hidrogeológica com base nos perfis de poços e resultados de estudos geofísicos (Medeiros et al., 2001);
- Análise de parâmetros hidrodinâmicos baseado em 41 testes de bombeamento;
- Caracterização do fluxo subterrâneo a partir da elaboração de um mapa potenciométrico;
- Estimativas de recarga das águas subterrâneas baseadas na aplicação dos métodos de balanço hidroclimático, balanço de cloreto e aplicação da lei de Darcy;

- Estudos hidroquímicos a partir da amostragem de águas dos poços.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Potiguar localiza-se na porção extremo nordeste do Brasil, mais precisamente na margem costeira norte do Estado do Rio Grande do Norte e nordeste do Ceará. A gênese da Bacia Potiguar para Françolin & Szatmari (1987) está associada a separação dos continentes sul-americano e africano. A sedimentação da referida bacia teve início no Neocomiano, onde uma série de riftes foram estruturalmente controlados por falhamentos.

A figura 2 apresenta uma seção regional esquemática da Bacia Potiguar, com as principais unidades hidrogeológicas e a zona de recarga do aquífero Açu, que corresponde a própria região de afloramento dos arenitos da Formação Açu.

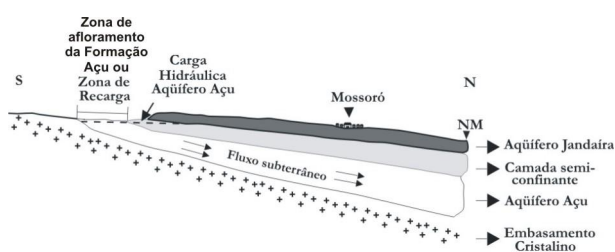


Figura 2 – Seção hidrogeológica regional esquemática da Bacia Potiguar

Além da faixa de afloramento, o aquífero Açu ocorre em todo o restante da bacia, capeado pelos calcários Jandaíra. As águas se infiltram na zona de afloramento da Formação Açu e seguem no sentido de sul para norte em direção ao mar. O aquífero Açu, na sua zona de afloramento, é referido como do tipo livre. Nos demais domínios da Bacia Potiguar o mesmo apresenta condições de semi-confinamento, o que ocorre quando as camadas argilosas da porção superior da Formação Açu e/ou porção basal da Formação Jandaíra, lhe conferem esse caráter.

A área é caracterizada por um clima semi-árido, com precipitação pluviométrica média anual da ordem de 798,2 mm e evapotranspiração potencial da ordem de 1542,1 mm. De conformidade com o Balanço hídrico estabelecido para o período de 1931-1990, pelo método de Thornthwaite, o excedente de água atinge um valor da ordem de 47,6 mm, concentrados nos meses de abril e maio.

Está situada na bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró. Como pode ser visualizado na figura 1, os principais rios da área de estudo são o rio Apodi e rio do Carmo, que cortam a área no sentido sul para norte e desenvolvem extensas planícies aluviais sobre os arenitos da Formação Açu.

Os principais afluentes do rio Apodi, na área de estudo, são o riacho da Barra e o riacho Livramento; e o principal afluente do rio do Carmo é o riacho Baixa Grande. Todos apresentam uma rede de drenagem pouco densa, sugerindo reduzidos escoamentos e elevadas taxas de infiltração.

Sob os arenitos da Formação Açu, o relevo é predominantemente tabular a suavemente ondulado, com presença de vales associados às drenagens superficiais. As cotas topográficas variam de aproximadamente 120 m, na faixa sul da área, até 50 m no extremo norte. O contato da Formação Açu com os calcários da Formação Jandaíra (localizados a norte) ocorre sob a forma de uma escarpa abrupta.

Na área estudada afloram os sedimentos da Formação Açu, compostos por arenitos finos a grossos intercalados por siltitos, argilitos, folhelhos esverdeados e arenitos calcíferos.

Sobrepostos a esses sedimentos tem-se os depósitos aluvionares, localizados preferencialmente em áreas baixas (cota topográfica inferior a 100 metros), planas e com abundante presença de carnaubais. Compreende sedimentos finos a grossos, inconsolidados, moderadamente a pobremente selecionados e de coloração esbranquiçada, formando extensa área de planícies. Ocorrem no leito das principais drenagens encontradas na área de estudo, as quais são: o riacho da Barra, o rio Apodi, o riacho do Livramento, o riacho da Baixa Grande e o rio do Carmo, desenvolvendo-se expressivamente apenas nos rios Apodi e do Carmo.

AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Resultados do cadastramento dos poços

Durante a execução do inventário hidrogeológico foram cadastrados 332 pontos de água, alguns dos quais com respectivo perfil litológico e construtivo.

O cadastramento consistiu na identificação e localização de cada unidade com posterior medição de seus parâmetros construtivos (profundidade, diâmetro e altura da boca e material), hidráulicos

(nível estático, nível dinâmico e vazão) e hidroquímicos (condutividade elétrica e temperatura).

A tabela 1 apresenta um resumo dos principais parâmetros hidráulicos obtidos para os poços tubulares captando água do aquífero Açu.

Tabela 1 – Parâmetros hidráulicos dos poços tubulares do aquífero Açu

	Mínimo	Máximo	Média
Profundidade (m)	25,00	176,00	80,80
Nível estático (m)	0,37	114,14	27,31
Nível dinâmico (m)	4,80	89,28	37,16
Vazão (m ³ /h)	0,15	80,00	11,98
Vazão específica (m ³ /h/m)	0,03	5,77	2,70

Os poços tubulares do aquífero Açu têm profundidade média de 80,80 m e o nível estático entre 0,37 m e 114,14 m. Os valores mais rasos de nível da água devem-se a localização do poço sobre aluviões, assim sendo, o nível estático apresentado, pode não ser representativo do aquífero Açu, e estar sendo influenciado pelas águas do aquífero aluvial. A vazão dos poços atinge valores de 80,00 m³/h; com média de 11,98 m³/h e a vazão específica é da ordem de 2,70 m³/h/m em média. Assim sendo, admitindo perdas de cargas nulas, para cada 10 metros de rebaixamento a vazão seria da ordem de 27,00 m³/h, em média por poço.

Considerando as descargas de bombeamento dos poços e os respectivos regimes de exploração dos mesmos (que variam de 2 a 24 horas por dia), o volume explotado do aquífero Açu atinge em média 8 milhões de m³/ano. A água captada tem diversas finalidades, que variam desde a exploração de água mineral até a dessedentação de animais e a irrigação.

Os poços tubulares, são perfurados em diâmetro que varia de 10 a 14 polegadas e revestidos com tubos PVC branco, em alguns casos geomecânico, de 6 a 8 polegadas de diâmetro. Apresentam filtros de tubo PVC ranhurados, e em alguns casos filtros geomecânicos, com diâmetro que varia de 6 a 10 polegadas. O espaço anular entre o revestimento e as paredes da perfuração, na altura dos filtros, é, em geral, preenchido por cascalho ou pré-filtro. O equipamento de bombeamento mais usado é a

bomba submersa e, em menor proporção, o compressor.

Estrutura hidrogeológica

A avaliação dos perfis litológicos dos poços, os resultados dos estudos geofísicos (Medeiros *et al.*, 2001 e Santos, 1977), os dados obtidos durante o cadastramento de poços (profundidade dos níveis da água) e as cotas topográficas obtidas pelo nivelamento planialtimétrico levaram à caracterização da estrutura hidrogeológica do aquífero Açu na área de estudo.

A espessura da Formação Açu (figura 3) varia de menos de 10 m na faixa sul da área a mais de 90 m na faixa norte, onde a porção central desenvolve as maiores espessuras, podendo atingir até 210 m ao sul de Felipe Guerra, sob o domínio dos aluviões.

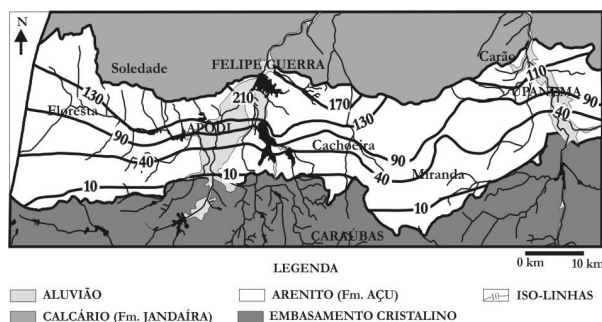


Figura 3 – Iso-espessura (m) da Formação Açu

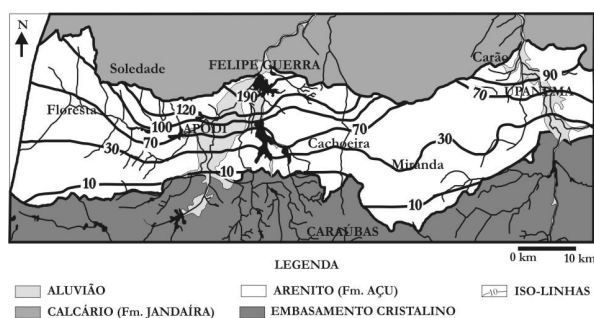


Figura 4 – Iso-valores de espessura saturada (m) do aquífero Açu

As espessuras saturadas do aquífero Açu (figura 4) variam de menos de 10 m, na faixa sul, a mais de 70 m na faixa norte. Tal como ocorre com a espessura da formação geológica, nas imediações de Apodi e Felipe Guerra observa-se as maiores espessuras saturadas, superiores a 120 m podendo atingir

até mais de 190 m ao sul de Felipe Guerra. Em termos médios e potenciais a espessura saturada do aquífero Açu é da ordem de 130 m na faixa norte.

Há um aumento das espessuras da Formação Açu, e, por conseguinte do aquífero Açu, na direção sul para norte, este fato pode estar associado à ocorrência de falhamentos escalonados neste sentido ou de simples depressões e elevações topográficas do embasamento cristalino. Esta possibilidade é também considerada nos estudos geofísicos realizados por Medeiros *et al.* (2001), muito embora a interpretação geral de tais estudos, tenha conduzido a uma interpretação estrutural.

Parâmetros hidrodinâmicos

Os parâmetros hidrodinâmicos são fundamentais nas avaliações dos recursos hídricos subterrâneos. Na área de estudo foram reunidos 41 testes de bombeamento (disponibilizados, sob a forma de fichas técnicas, pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte e Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte), devido a ausência de dispositivo de poço de observação, as leituras de rebaixamento foram registradas no próprio poço de bombeamento.

Os resultados foram interpretados com o auxílio do *software Aquifer Test* da *Waterloo Hydrogeologic* (Röhrich, 2002), através do Método Rebaixamento-tempo de Cooper & Jacob (1946), com correção do rebaixamentos para aquíferos livres e pelo Método de Recuperação de Theis (1935). Vale ressaltar, que os poços testados atingem profundidades de no máximo 142 m. Na realidade, a Formação Açu na área de estudo pode atingir espessuras de até 290 m (Santos, 1977) na sua faixa norte (contígua aos calcários).

De um modo geral, a transmissividade (figura 5) cresce de sul para norte. Na faixa setentrional, os setores a norte de Apodi e Upanema apresentam as mais altas transmissividades, com valores de 130 m²/d. No setor a noroeste de Apodi, já próximo a divisa com o Estado do Ceará, a transmissividade tende para valores que variam de 50 a 90 m²/d. Na faixa meridional da área de exposição da Formação Açu a transmissividade do aquífero é baixa, em geral inferior a 10 m²/d.

De forma similar ao observado para a transmissividade, a condutividade hidráulica (figura 6) aumenta no sentido de sul para norte. Na faixa meridional o aquífero Açu apresenta condutividade hidráulica inferior a 0,2 m/d e na faixa setentrional assume valor médio de 1,9 m/d.

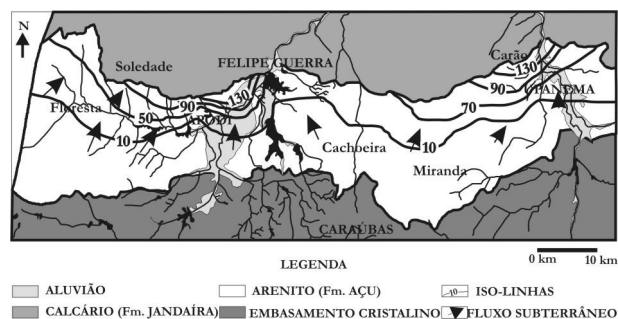


Figura 5 – Iso-valores de transmissividade (m^2/d) do aquífero Açú



Figura 6 - Iso-valores de condutividade hidráulica (m/d) do aquífero Açú

Comportamento do fluxo subterrâneo

De acordo com a configuração apresentada pelas eqüipotenciais do mapa potenciométrico (figura 7), as linhas de escoamento subterrâneo do aquífero Açú são orientadas no sentido de sul para norte, com leves inflexões para nordeste e noroeste em direção aos vales dos rios principais que drenam a área (rios Apodi e do Carmo).

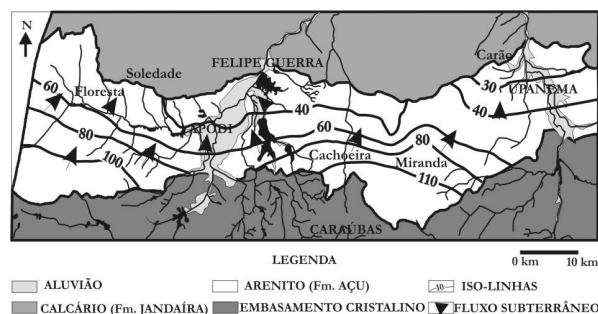


Figura 7 – Potencimetria do aquífero Açú

As águas subterrâneas escoam na faixa sul da área com gradientes hidráulicos relativamente elevados, da ordem de 1%, podendo, no setor cen-

tro-sul atingir gradientes da ordem 1,4%. Na faixa norte, próximo aos calcários, os gradientes são mais baixos, da ordem de 0,2%, sugerindo as melhores condições hidrogeológicas. No domínio da planície aluvial do Apodi o fluxo subterrâneo é conduzido para norte segundo gradientes inferiores a 0,2%, provavelmente por influência das águas dos aluviões por drenança vertical descendente.

A vazão total do fluxo subterrâneo “Q” gerada no domínio da área foi avaliada a partir da lei de Darcy mediante a aplicação da seguinte equação:

$$Q = TIL$$

Onde,

T= transmissividade do aquífero em m^2/s ;

I= gradiente hidráulico (adm)

L=comprimento do fluxo ou largura do escoamento (m)

Para efeito de avaliação, a área foi subdividida em três setores, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Vazão do fluxo subterrâneo natural

Sector	T (m^2/s)	I (%)	L (m)	Q (m^3/s)
Oeste de Apodi	$3,00 \times 10^{-3}$	0,50	22880	0,343
Apodi-Felipe Guerra	$3,00 \times 10^{-3}$	0,34	35660	0,363
Caraúbas-Upanema	$3,00 \times 10^{-3}$	0,63	52000	0,982
Total do fluxo subterrâneo natural				1,688

A transmissividade adotada nos três setores é a mesma, já que os valores de condutividade hidráulica próximo ao contato com os calcários é em média de $2,31 \times 10^{-5} m/s$ e a espessura saturada do aquífero na faixa norte em termos potenciais é, em média, 130 m. Assim sendo, a vazão total do fluxo subterrâneo é da ordem de $1,688 m^3/s$.

Recarga das águas subterrâneas

A recarga de águas subterrâneas é um parâmetro de fundamental importância no conhecimento e manejo dos aquíferos. Entretanto, muito difícil de ser avaliado em regiões semi-áridas (Lerner *et al.*, 1990; Simmers *et al.*, 1997; Lerner, 1997;

Healy and Cook, 2002; Sanford, 2002 e Vries and Simmers, 2002). A recarga do aquífero na área de estudo ocorre principalmente pela infiltração das águas de precipitação pluviométrica. Em menor escala, pelo fluxo superficial dos rios e drenança vertical através dos níveis areno-argilosos superior da Formação Açú, no domínio das coberturas aluviais. O processo de recarga é dificultado pelas condições de semi-aridez da área, que lhes atribui “déficit” hídrico expressivo; pelo caráter areno-argiloso da parte superior da Formação Açú, que mesmo assim ainda confere ao aquífero o caráter de sistema livre; e pela profundidade do nível das águas subterrâneas, que de um modo geral são profundas (figura 8). O nível estático da área varia aproximadamente entre 20 m e 80 m, sendo mais superficiais próximo ao contato com o embasamento cristalino e no domínio das planícies aluviais.

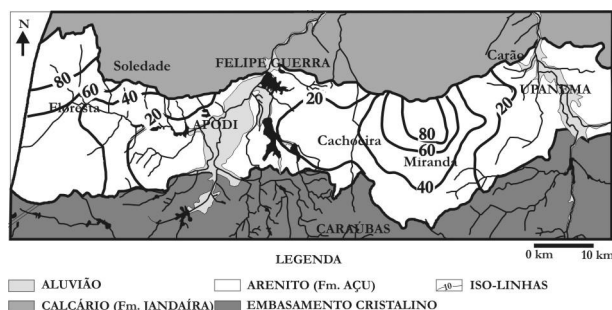


Figura 8 – Iso-valores de profundidade do nível estático (m) do aquífero Açú

A recarga foi avaliada com a aplicação dos métodos do Balanço hídrico, Lei de Darcy e Balanço de cloretos.

Balanço hídrico

O excedente da precipitação no balanço hídrico pode corresponder à lâmina de água infiltrada no terreno (Castany, 1975 e Fetter, 1994). De acordo com o balanço hídrico, estabelecido pelo método de Thornthwaite para o período de 1931 a 1990, o excedente anual da água de precipitação é de 47,6 mm, o qual pode corresponder a recarga anual das águas subterrâneas. Considerando que a precipitação pluviométrica média em Apodi é de 798,2 mm (de acordo com a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte), a taxa de infiltração no terreno (área de 1320 km²) pode atingir até 5,96%.

Lei de Darcy

O aquífero Açú é do tipo livre, sua potencialidades estão condicionadas à infiltração direta da águas de chuva, cujo volume restitui as reservas que se perdem nos escoamentos naturais e exploração por poços. Em condições de equilíbrio, sem considerar a exploração, a infiltração eficaz é equivalente à vazão do fluxo subterrâneo natural anual. A descarga do fluxo subterrâneo natural obtido foi de 1,688 m³/s (tabela 2), o que equivale a 50,64 x 10⁶ m³/ano, que em termos de lâmina de água corresponde a 38 mm (área de 1320 km²). A vazão do fluxo subterrâneo foi avaliada para uma condição no qual o aquífero estava sendo explorado. Logo, o volume correspondente a exploração deve ser considerado na recarga anual, que é de 8 x 10⁶ m³/ano (equivalente a 6 mm/anos). Neste caso, a recarga é o somatório da vazão de fluxo obtida e do volume anual explorado, ou seja: 58,64 x 10⁶ m³/ano (44 mm de lâmina de água infiltrada). A taxa de infiltração, portanto, é de 5,5%, tomando por base a precipitação pluviométrica média de 798,20 mm/ano.

Balanço de cloreto

O balanço do íon cloreto pode ser estabelecido de forma aproximada pela seguinte equação:

$$ICI = PCp, \text{ ou seja, } I = PCp / Ci,$$

Onde,

I: lâmina de água infiltrada no terreno (m);

Ci: concentração de Cl⁻ nas águas subterrâneas (mg/L);

P: precipitação pluviométrica (mm);

Cp: concentração de Cl⁻ na água de chuva (mg/L).

Conforme será discutido a seguir, na faixa norte da área as águas são menos afetadas por processos de salinização, portanto, a concentração de cloreto utilizada nesta estimativa corresponde a este setor, ou seja, 50 mg/L. Para a água de chuva o valor adotado é de 2,53 mg/L, corresponde à média dos valores obtidos por Rebouças (1973) no sertão e agreste do Estado de Pernambuco. A precipitação pluviométrica média da área é 798,2 mm/ano; a aplicação da equação do balanço de cloreto resulta numa lâmina de água infiltrada de 38,71 mm, que corresponde a uma taxa de infiltração da ordem de 5,06%.

Convém ressaltar, que o valor obtido pelo Balanço hídrico é apenas uma indicação potencial e não um valor absoluto de recarga. Assim sendo, a recarga a ser adotada corresponde a média obtida pelos métodos da lei de Darcy e Balanço de cloretos.

A tabela 3 apresenta um resumo das lâminas de água infiltradas e as respectivas taxas de infiltração obtidas pela aplicação dos diferentes métodos, no qual observa-se que os valores são bastante próximos.

Tabela 3 -Recarga das águas subterrâneas

	Balanço hídrico	Lei de Darcy	Balanço de clo- reto
Lâmina de água infiltra- da (mm)	47,60	44	38,71
Taxa de infiltração (%)	5,96	5,50	5,06
Volume de água (m ³ /ano)	62,83	58,64	51,08

AValiação hidrogeoquímica

A análise hidrogeoquímica procurou diagnosticar sobre os mecanismos de salinização das águas; nestas condições, são fundamentais os fatores geo-estruturais, climáticos e hidrogeológicos (direção e regime do fluxo subterrâneo). Foram amostrados 52 poços e a Lagoa do Apodi, para uma melhor avaliação das modificações hidrogeoquímicas no âmbito do aquífero estudado, analisou-se, também, águas do aquífero cristalino e Jandaíra.

A amostragem foi realizada entre os meses de agosto a novembro de 2001, uma época marcada pela escassez de chuvas. As coletas foram realizadas conforme as normas da APHA (1995); analisadas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte e interpretadas com o auxílio do *software AquaChem – Aqueous Geochemical Analysis, Plotting and Modeling da Waterloo Hydrogeology* (Calmbach, 2002).

Salinidade das águas subterrâneas

A condutividade elétrica (figura 9), medida em campo com o auxílio de um condutivímetro portátil com correção automática de temperatura para 25 °C, foi o parâmetro utilizado na análise da salinidade das águas subterrâneas. Observa-se uma diminuição na condutividade elétrica de sul para norte, na direção geral do fluxo subterrâneo. Próximo ao contato com o embasamento cristalino os valores são superiores a 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com exceção, apenas, nas imediações do açude Apanha Peixe (700 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Na faixa norte os valores são, em geral, inferiores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isto se contrapõe a regra

geral, onde a salinidade das águas cresce no sentido do fluxo subterrâneo. O volume de água aportando para a área a partir do embasamento cristalino é reduzido, limita-se ao fluxo superficial dos rios, riachos e a uma possível contribuição do aquífero fissural (cujas águas são reconhecidamente salinizadas).

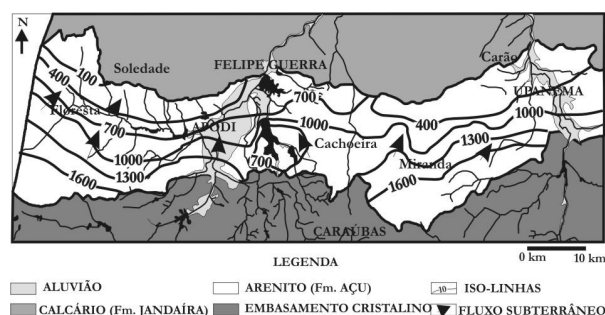


Figura 9 – Iso-valores de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do aquífero Açú

A recarga efetiva do aquífero Açú proveniente das chuvas aumenta no sentido de sul para norte, a medida que aumenta a área de contribuição e o volume da água de chuva infiltrado; o que propicia uma eficiente diluição dos sais, atingindo maiores efeitos nos domínios onde o aquífero é de maior transmissividade (faixa norte). Ao sul, o aquífero Açú desenvolve menores espessura e níveis de água menos profundos, o que facilita maiores perdas por evapotranspiração e maior concentração de sais.

Fácies hidrogeoquímicas

Na figura 10 os resultados das análises químicas são representados no diagrama trilinear de Piper (1983). No losango de associação de cátions e ânions, observa-se um domínio de águas cloretadas sódicas e bicarbonatadas cálcicas. As águas do aquífero Açú são cloretadas sódicas (ou em alguns casos cloretadas cálcicas), que tendem a mudar para águas bicarbonatadas sódicas (ou em menor escala bicarbonatadas cálcicas) a medida que se aproximam das rochas carbonáticas (arenitos calcíferos e calcários).

As águas do aquífero Jandaíra são em geral bicarbonatadas cálcicas, em alguns casos magnesianas, cujos íons dominantes são originados da dissolução de rochas carbonáticas. O aquífero cristalino apresenta águas cloretadas sódicas e, em menor proporção, cloretadas cálcicas, com identidade similar às águas do aquífero Açú; muito embora a concentração salina seja mais elevada. Na lagoa do A-

podem as águas são do tipo cloretadas sódicas, similares as águas do aquífero Açú.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os resultados do Balanço hídrico a evapotranspiração é bastante elevada, da ordem de 1572 mm anuais, o que atesta o grau de semi-aridez da região de estudo, e, por conseguinte, o déficit hídrico em boa parte do ano. Em função disso, a recarga das águas subterrâneas é dificultada, no qual o excedente da água de precipitação (798,2 mm) é de apenas 47,60 mm o que resulta em indicativos de taxa de recarga de até 5,96%. A configuração do relevo da área de afloramento da Formação Açú com uma drenagem pouco densa, por outro lado, sugere taxas de infiltração elevadas, porém isto não chega a ocorrer devido às elevadas perdas por evapotranspiração.

A recarga das águas subterrâneas, estimada a partir da aplicação da Lei de Darcy e Balanço de cloretos, sugere uma taxa de infiltração média da ordem de 5,38% que corresponde a 41 mm infiltrados. Nestes termos, o volume de água efetivamente infiltrado no terreno (área de 1320 km²) é de aproximadamente 54 milhões de m³/ano.

A estrutura hidrogeológica condiciona a ocorrência de um fluxo subterrâneo na direção de sul para norte, com o aumento da transmissividade neste sentido; resultando em melhores possibilidades hidrogeológicas na faixa de ocorrência contígua aos calcários da Formação Jandaíra. Convém ressaltar, que as transmissividades do aquífero nesta faixa são superiores aos valores mostradas na figura 5, pois os dados analisados resultam de testes de bombeamento em poços parcialmente penetrantes. A faixa sul da área, entretanto, parece refletir as verdadeiras condições.

A condutividade hidráulica média do aquífero Açú na faixa norte é de $2,31 \times 10^{-5}$ m/s. Neste setor, sondagens elétricas longitudinais (Santos, 1977) indicaram a possibilidade do aquífero atingir espessuras saturadas de até 275 m. Nesta condição, a transmissividade de aquífero Açú poderá vir a atingir na faixa norte valores de até $6,35 \times 10^{-3}$ m²/s ou 548 m/d.

A análise integrada dos dados do cadastro de poços, de espessura saturada, transmissividade, condutividade hidráulica e de condutividade elétrica, sugerem a ocorrência de zonas com distintas potencialidades hidrogeológicas (figura 11), conforme descrição a seguir:

- **Zona A:** Corresponde a zona de maior potencial hidrogeológico. O aquífero desen-

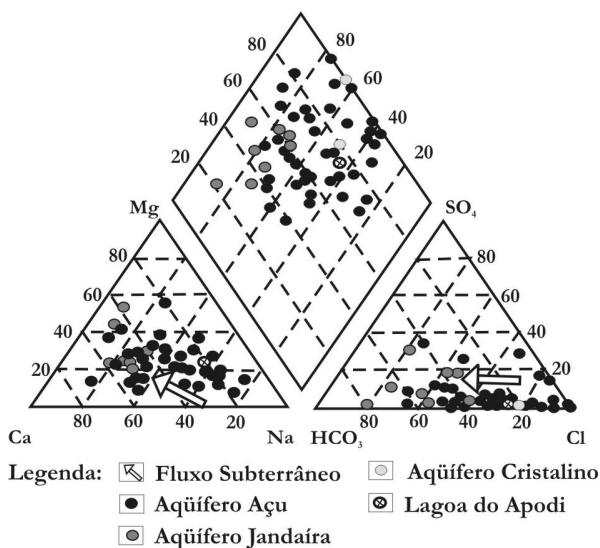
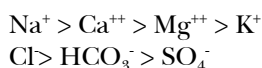


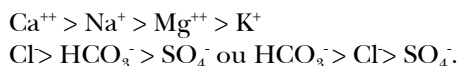
Figura 10 – Diagrama de Piper: Área Apodi-Upanema

As águas do aquífero Açú, situadas próximo ao contato com o embasamento, tendem a apresentar salinidade elevada por influência destas rochas; menor profundidade do nível da água; menor transmissividade e maior dificuldades de renovação das águas. É possível que a salinização seja resultado da evaporação progressiva de sais (característica de domínios semi-áridos).

Nos triângulos dos cátions observa-se que na direção geral do fluxo subterrâneo o íon sódio tende a mudar de posição com o cálcio ou magnésio. No triângulo dos ânions, o íon cloreto tende a ser substituído pelo bicarbonato. Isto ocorre por influência das rochas carbonáticas, notadamente pela ocorrência de arenitos calcíferos (transicionais com a Formação Jandaíra). Face às considerações apresentadas, verifica-se que a fórmula iônica dominante do aquífero Açú na faixa sul da área, onde as águas são mais salinizadas, é:



Próximo ao contato com os calcários, onde as águas são menos salinizadas, a fórmula iônica dominante é:



volve espessura saturada em média de 150 m, transmissividade de $130 \text{ m}^2/\text{d}$ e águas de baixa a média salinidade (condutividade elétrica de menos de 100 a $700 \mu\text{S}/\text{cm}$). Pode ocorrer problemas de salinização em consequência da contribuição de águas com alto teor de sais dos aluviões. Em tal situação, os poços devem ser adequadamente projetados para que o risco de salinização fique reduzido. Os poços com profundidade média de 160 m podem produzir até $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

- **Zona B:** Potencial hidrogeológico médio. A espessura saturada média é de 70 m, a transmissividade do aquífero é de até $70 \text{ m}^2/\text{d}$ e as águas são de baixa a média salinidade (condutividade elétrica média de $700 \mu\text{S}/\text{cm}$). Tal como ocorre com a Zona A, problemas localizados de salinização podem ocorrer. Os poços com profundidade média de 120 m podem produzir até $50 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 11 – Avaliação potencial do aquífero Açú

- **Zona C:** Zona de potencial hidrogeológico baixo. O aquífero desenvolve espessuras saturadas de até 30m e transmissividade inferior a $10 \text{ m}^2/\text{d}$. As águas apresentam problemas de qualidade devido ao teor alto de sais, notadamente próximo ao contato com o embasamento cristalino, onde a condutividade elétrica é superior a $1300 \mu\text{S}/\text{cm}$. Neste caso, poços com 70 m de profundidade produzirão vazões de até $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Da análise depreendida, verifica-se que aproximadamente 50% da área está inserida numa região de potencial hidrogeológico limitado; tanto por questões lito-estruturais, que reduzem as espessuras saturadas do aquífero, quanto por problemas de salinização.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A estratigrafia e estrutura geológica da Formação Açú condicionam a ocorrência de um aquífero livre, sujeito a semi-confinamentos localizados, o que pode resultar em diferentes comportamentos quanto a recarga das águas subterrâneas. Na faixa norte, o aquífero é de elevado potencial hidrogeológico, com transmissividade superior a $130 \text{ m}^2/\text{d}$, enquanto que na faixa sul, é de baixo potencial, com transmissividade inferior a $10 \text{ m}^2/\text{d}$. A recarga de água subterrânea foi estimada em 41 mm anuais, que corresponde a 54 milhões de m^3 de água infiltrados no domínio da área (1320 km^2). A maior parte das águas ficam armazenadas na faixa norte (Zonas A + B), que é a região de maior transmissividade, a qual abrange uma superfície de pouco mais de 660 km^2 . Neste setor, as águas apresentam boa qualidade, com condutividade elétrica inferior a $700 \mu\text{S}/\text{cm}$. O restante da área (Zona C), apesar de apresentar uma dimensão expressiva, armazenam apenas um reduzido volume de água, como também as águas apresentam problemas de qualidade devido a salinidade elevada (condutividade elétrica superior a $1300 \mu\text{S}/\text{cm}$). Diante destes resultados, o recurso explotável do aquífero Açú, com águas de boa qualidade, fica praticamente limitado a faixa norte da área.

Há uma diminuição da salinidade das águas do aquífero Açú de sul para norte, na direção do fluxo subterrâneo, o que ocorre devido à recarga acumulada pelas águas de precipitação, que propiciam a diluição progressiva dos sais, a medida que se distancia do contato com as rochas cristalinas. Foram identificadas diferentes fácies hidroquímicas na direção do fluxo subterrâneo, conforme a seguir: na faixa sul as águas são cloretadas sódicas; enquanto que na faixa norte há um predomínio de águas cloretadas cálcicas ou bicarbonatadas cálcicas (influenciadas pelas rochas carbonáticas ou pela presença de sedimentos transicionais carbonáticos nos sedimentos da Formação Açú). Percebe-se, por conseguinte, que na direção do fluxo subterrâneo o cátion sódio tende a mudar de posição com o cálcio e o ânion cloreto tende a ser substituído pelo bicarbonato.

Com esses resultados, fica caracterizada a possibilidade de manutenção das descargas atuais e também de ampliação da oferta de água, já que o volume de água potencial atualmente disponibilizado para a população é de apenas 8 milhões de m^3/ano , ou seja, 15% da recarga. A preocupação, neste caso, está associada ao manejo dessas águas, o

qual requer (mediante o monitoramento dos níveis, das descargas e da qualidade das águas) poços criteriosamente locados, projetados e explorados de forma que não haja riscos de super exploração.

As considerações apresentadas quanto a estrutura hidrogeológica, parâmetros hidrodinâmicos e hidrogeoquímicos, recarga, recursos exploráveis e condições de exploração podem ser reavaliadas visando um maior detalhamento:

- Recomenda-se a instalação de piezômetros, em locais estratégicos, para o monitoramento da profundidade dos níveis da água. A execução de testes de aquífero de longa duração (72 horas), para avaliação da porosidade efetiva, configura um importante recurso para uma avaliação precisa das reservas reguladoras do aquífero. Nesse caso, as transmissividades deverão ser avaliadas para a condição de penetração total;
- Além disto, os possíveis impactos da exploração das águas subterrâneas do aquífero Açú na região de confinamento do mesmo devem ser monitorados;
- A coleta de águas da chuva para análise química e balanço de cloreto pode constituir um método auxiliar nas investigações sobre a recarga das águas subterrâneas do aquífero Açú;
- Os aspectos da salinidade das águas podem ser investigados com o auxílio de análises isotópicas, uma nova campanha de amostragem e medição da condutividade elétrica *in situ*.

É fundamental ressaltar, a importância da definição de uma política pública de manejo, que contemple a exploração racional e sustentável das águas subterrâneas do aquífero Açú.

REFERÊNCIAS

- APHA – 1995 – *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington, DC.
- CALMBACH, T. & WATERLOO HYDROGEOLOGY, INC. – 2002 – *Aqueous Geochemical Analysis, Plotting and Modeling*. AquaChem
- CASTANY, G. – 1975 – *Prospección y explotación de las aguas subterráneas*. Barcelona: Omega, p. 738.
- COOPER, H. H. J. & JACOB, C. E. A. – 1946 – *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summing well field story*. Transactions Am. Geophysical, v. 27. P. 526-534. 1946.
- FETTER, C. W. – 1994 – *Applied hydrogeology*. 3ª ed. New Jersey: University of Wisconsin – Oshkosh.
- FRANÇOLIN, J. B. L., SZATMARI, P. – 1987 – *Mecanismo de Rifting da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira*. Revista Brasileira Geociências, 17 (2): p196-207.
- HEALY, R. W. & COOK, P. G. – 2002 – *Using groundwater levels to estimate recharge*. Hydrogeology Journal, 10 (1), 91-109.
- LERNER, D. N. – 1997 – *Groundwater recharge*. In: *Geochemical Processes, Weathering and Groundwater recharge in Catchments*. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 109-150.
- LERNER, D. N.; ISSAR, A. S. & SIMMERS, I. – 1990 – *Groundwater recharge: a Guide to understanding and estimating natural recharge*. International Association of Hydrogeologists, vol 8. Hannover: Heise.
- MEDEIROS, W. E., JARDIM DE SÁ, E. F., MEDEIROS, V. C., LUCENA, L. R. F. – 2001 – *Estrutura Geológica do Aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar entre Apodi e Upanema, RN*. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Relatório Técnico do Projeto: Recursos Hídricos Subterrâneos da Formação Açú aflorante na borda sul da Bacia Potiguar, RN (Faixa Upanema-Apodi).
- PIPPER, A. M. – 1983 – *A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water – Analyses*, In: *Chemical Hydrogeology*, p. 50.59, 1983. Edited by William Back and R. Allan Freeze, Hutchinson Ross Publishing Company. Reprinted from Am. Geophys. Union Trans. 25:914-923 (1944).
- REBOUÇAS, A. C. – 1973 – *Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil: evaluation des ressources, orientation pour la mise en valeur*. Strassbourg, 291p. (Thèse Doctor – Université Louis Pasteur).
- RÖHRICH, T. – 2002 – *Graphical Analysis and Reporting of Test & Slug Test Data*. Aquifer test. 268p.
- SANFORD, W. – 2002 – *Recharge and groundwater models: an overview*. Hydrogeology Journal, 10 (1), 110-120.
- SANTOS, M. A. V. – 1977 – *Estudo hidrogeológico da Planície Aluvial do Apodi-RN Economicidade de poços para a irrigação*. Recife, SUDENE/UFPE, 185p.
- SIMMERS, I.; HENDRICKX, J. M. H.; KRUSEMAN, G. P. & RUSHTON, K. R. – 1997 – *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas*. International Association of Hydrogeologist, 19, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

- THEIS, C. V. – 1935 – The relation between the lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of well using groundwater storage. Trans. Am. Geophys. Union, 16th Ann. Meeting, part 2.
- VRIES, J. J. & SIMMERS, I. – 2002 – Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal, 10 (1), 5-17.

Hydrogeological Potencial And Geochemical Characterization Of Açú Aquifer South Of The Potiguar Basin In The Apodi-Upanema Reach

ABSTRACT

The area studied covers a surface of 1320 km², located in a semi-arid region with an annual precipitation of 792 mm. The geology includes sandstones of the Açú Formation, limited to the north by Jandaira Formation and to the south by the basement crystalline rocks. The Açú aquifer is the inferior portion of the homonymous formation, consisting of sandstones with intercalated clay, presenting as an unconfined aquifer with the occurrence of localized semi-confinements. The main objective of this work is to evaluate the Açú aquifer potentialities, to verify the possibilities of maintaining the current discharge and to determine a possible increase of the water offer for regional development. The main problems concern irregularities in well discharge and in water salinity. The hydrogeologic framework and hydraulic operation of the Açú aquifer system were defined taking in account the data on wells, data on geophysical studies, campaigns of groundwater level measurements and interpretation of pumping tests results. Groundwater recharge was estimated using different methodologies: Water balance, Darcy's law and Chloride balance method. The quality of the water was evaluated by determination of the electrical conductivity followed by collecting water samples and complete chemical analyses. Aquifer transmissivity increases from the south to north, according to the direction of the groundwater flow, leading to better hydrogeologic possibilities in the north strip of the area. In the south strip, besides the low hydrogeologic potential of the aquifer, the water presents salinity problems. Currently, the volume of available water for the population is an average of 8 million m³/year, which represents about 15% of the recharge estimated as 54 million m³/year. This, therefore, showed the possibility of maintaining the current pumping discharges and the water offer. The use of this resource, however, requires the adoption of appropriate management measures.

Key-words: Semi-arid; Groundwater; Recharge; Salinization.