

ASPECTOS GEO-ESTRUTURAIS E DE RECARGA DO AÇU NA BORDA SUDOESTE DA BACIA POTIGUAR (RN)

José Geraldo de Melo¹; Paula Stein¹; Marcelo Augusto de Queiroz²;
Vera Lúcia L. de Castro³ & Fabio Henrique Roque da Silva¹

Resumo - A Borda Sudoeste da Bacia Potiguar, no Rio Grande do Norte, está situada em domínio semi-árido com precipitações pluviométricas da ordem de 765 mm/ano. O aquífero Açú é o principal recurso hídrico disponível para o suprimento das populações com água potável e uso na irrigação, desempenhando, portanto um papel importante no desenvolvimento da região. Os poços perfurados na área, entretanto fornecem vazões muito variadas que vão desde menos de 5 m³/h até 60 m³/h, o que tem limitado o uso das águas subterrâneas em maior escala. Os dados geológicos, estruturais e geofísicos (sondagens elétricas verticais e condutância longitudinal) mostram que a área é formada por altos e baixos estruturais. De conformidade com os resultados dos estudos hidrogeológicos realizados, isto condiciona a ocorrência de setores com diferentes potencialidades. Verificou-se que a transmissividade do aquífero cresce no sentido de sul para norte segundo a direção do fluxo subterrâneo, com valores de menos de 10 m²/dia até 280 m²/dia, evidenciando, portanto maiores potencialidades do aquífero Açú na faixa norte da área. A recarga das águas subterrâneas foi avaliada em 54 milhões de m³/ano, sendo que mais de 90% deste valor está armazenado no setor norte da área.

Abstract - The Potiguar Basin Southwest border, on Rio Grande do Norte State, is situated in the semi-arid region and the precipitation is about 745 mm/year. The Açú aquifer is the main water source of supply to the population and to land irrigation. The wells bored in the area, however presents very different production, whose yields go from less them 5 m³/h up to 60 m³/h. It is the main reason of limiting the use of the groundwater. As shown by the geological, structural e geophysical dates (vertical electrical profiles and longitudinal conductance) there are high and low geological structures. According to the studies carried out, these characteristics results in various sectors of different hydrogeologic

¹ Pós Graduação em Geociências e Departamento de Geologia da UFRN. Campus Universitário, Natal, RN. - CEP: 59089-000. Fone: 0xx84 2088437; Fax: 0xx84 2153809; E-mail: jgmelo@ufrnet.br.

² Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Rua Senador Salgado Filho, Tirol, Natal, RN. Fone: 0xx84 2324162.

³ Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Rua Dona Maria Câmara, Natal, RN. - Fone: 0xx84 2322427; Fax: 0xx84 2322419; E-mail: veracastro@rn.gov.br

potentialities. The aquifer transmissivity increases following the flux direction from south to north, changing from less than 10 m²/d to 280 m²/d, characterizing the north zone of the area as the best hydrogeologic possibilities. The annual groundwater recharge was estimated in 41 mm or 54 millions m³, in which most of it (91,5%) is stored in the north zone of the area.

Palavras-Chave - Semi-árido; água subterrânea; recarga; fluxo subterrâneo.

INTRODUÇÃO

A área de estudo está situada na borda sudoeste da Bacia Potiguar à oeste do Estado do Rio Grande do Norte, numa faixa estreita de direção leste-oeste que se estende de Upanema até a fronteira com o Estado do Ceará, ocupando uma superfície de 1320 km² (Figura 1).

As águas subterrâneas do aquífero Açu tem sido destinadas prioritariamente ao abastecimento de cidades, que inclui Apodi, Upanema, Felipe Guerra, Rodolfo Fernandes e Severiano Melo, além de distritos, ressaltando que essas duas últimas cidades e alguns dos distritos estão situados no domínio das rochas cristalinas, onde as águas superficiais e subterrâneas são escassas e em geral salinizadas. Nestes casos, o abastecimento d'água é feito através de sistema de adutoras. A captação d'água no aquífero Açu em geral é feita através de poços com profundidades da ordem de 100 m produzindo até 80 m³/h. A descarga total bombeada é da ordem de 10 milhões de m³/ano. O uso da água na irrigação é relativamente pouco desenvolvido, porem mostra tendências para um crescimento expressivo. Há casos, também de industrialização das águas subterrâneas do aquífero Açu como águas minerais ou potáveis de mesa, como é o caso da industria de Água Mineral Cristalina e a industria de Água Mineral Santa Luzia, localizadas nos municípios de Apodi e Upanema, respectivamente.

Nos últimos anos o uso das águas do aquífero tem sido limitado pela presença de águas salinizadas em alguns setores, baixas vazões dos poços em muitas situações e pela falta de conhecimento de suas reais potencialidades. O presente artigo enfatiza os aspectos estruturais e de recarga das águas subterrâneas como subsídio à otimização da exploração das águas subterrâneas.

A maioria dos estudos hidrogeológicos realizados sobre o aquífero Açu, na Bacia Potiguar, estão concentrados na Região de Mossoró (norte da área de estudo). As informações disponíveis sobre a hidrogeologia da zona de afloramento da Formação Açu são fruto de estudos regionais desenvolvidos na escala 1:500. 000, e, também dados isolados de perfuração de poços.

Estudos Hidrogeológicos, na Bacia Potiguar, desenvolvidos por Rebouças (1967) fornecem uma primeira indicação de que o aquífero Açu na zona de afloramento da Formação Açu é do tipo livre com fluxo subterrâneo dirigido para norte. Posteriormente, este comportamento foi confirmado

por Manuel Filho (1971). Na planície do Apodi desenvolve-se o aquífero aluvial com espessuras da ordem de 35 m nos seus domínios mais produtores, com cargas hidráulicas distintamente superiores as do aquífero Açú e descarga descendente em direção ao mesmo, tendo o aquífero Açú sido caracterizado como semi-confinado (Santos 1977). O aquífero Açú segundo o IPT (1982) é de baixa potencialidade na borda oeste da Bacia Potiguar, sugerindo condições de exploração de poços com vazões, no máximo, de 10 m³/h. Posteriormente, a partir de 1992, com o desenvolvimento da perfuração de poços na área, foram obtidas descargas da ordem de 60 m³/h, o que motivou a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) intensificar as perfurações, para o abastecimento de cidades.



Figura 1 - Localização geográfica da região estudada.

A caracterização da estrutura hidrogeológica do terreno é feita com base em perfis de poços e prospecção geofísica (dados gravimétricos, sondagens elétricas verticais e sondagens elétricas longitudinais). O padrão do fluxo subterrâneo é estabelecido a partir do mapa potenciométrico, com a caracterização de zonas principais de recarga e de descarga d'água, apoiado em dados de campanhas de medições de níveis d'água e resultados do nivelamento topográfico de poços. Os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero (transmissividade e condutividade hidráulica) são apresentados com base na interpretação de resultados de testes de produção de poços. A recarga das águas subterrâneas é estimada utilizando diferentes metodologias, tendo em vista a obtenção de um resultado que se mostrasse mais confiável possível em função dos dados disponíveis. Foram aplicados os métodos do balanço hidroclimatológico, de variação do nível d'água, Lei de Darcy aplicada ao meio poroso saturado e balanço de cloreto.

CONDICIONANTES CLIMÁTICOS, GEOLÓGICOS E FISIOGRÁFICOS

As precipitações pluviométricas no domínio da área são em média de 728 mm anuais (período 1931-1990), com chuvas concentradas num período anual muito curto, que vai de três a quatro meses e a evapotranspiração potencial é elevada atingindo 1542 mm/anuais. Os dados climáticos permitiram a caracterização de um “déficit” hídrico na maior parte do ano, o que atribui a área o caráter de semi-aridez.

O arcabouço geológico básico da região apresentado na Figura 2 mostra que a área de estudo é constituída de arenitos da Formação Açu, na borda sul da Bacia Potiguar, do Cretáceo Superior, com a ocorrência de depósitos Cenozóicos de paleocascalheiras de domínios restritos e coberturas aluviais recentes, com destaque para a planície aluvial do Apodi. A Formação Açu está sobreposta a rochas do embasamento cristalino pré-cambriano e o seu contato no setor sul da área se faz com estas rochas, no qual distinguem-se corpos granitóides brasilianos, o complexo gnaíssico-migmatítico e os traços de foliações e zonas de cisalhamento, de idade brasiliana ou mais antiga. O limite norte da área se faz com os calcários da Formação Jandaira, do Cretáceo Superior, em alguns trechos envolvendo escarpas retilíneas, as quais podem corresponder a falhas ou fraturas (possível reativação neotectônica de falhas cretáceas ou terciárias, segundo Medeiros *et al.*, 2001).

A área é cortada pelos rios Apodi e do Carmo (intermitentes) no sentido de sul para norte após drenarem os terrenos das rochas cristalinas. Seus afluentes desenvolvem uma rede de drenagem pouco densa, o que sugere reduzidos escoamentos e elevadas taxas de infiltração, o que neste caso, não chega a ocorrer devido às elevadas perdas por evapotranspiração.

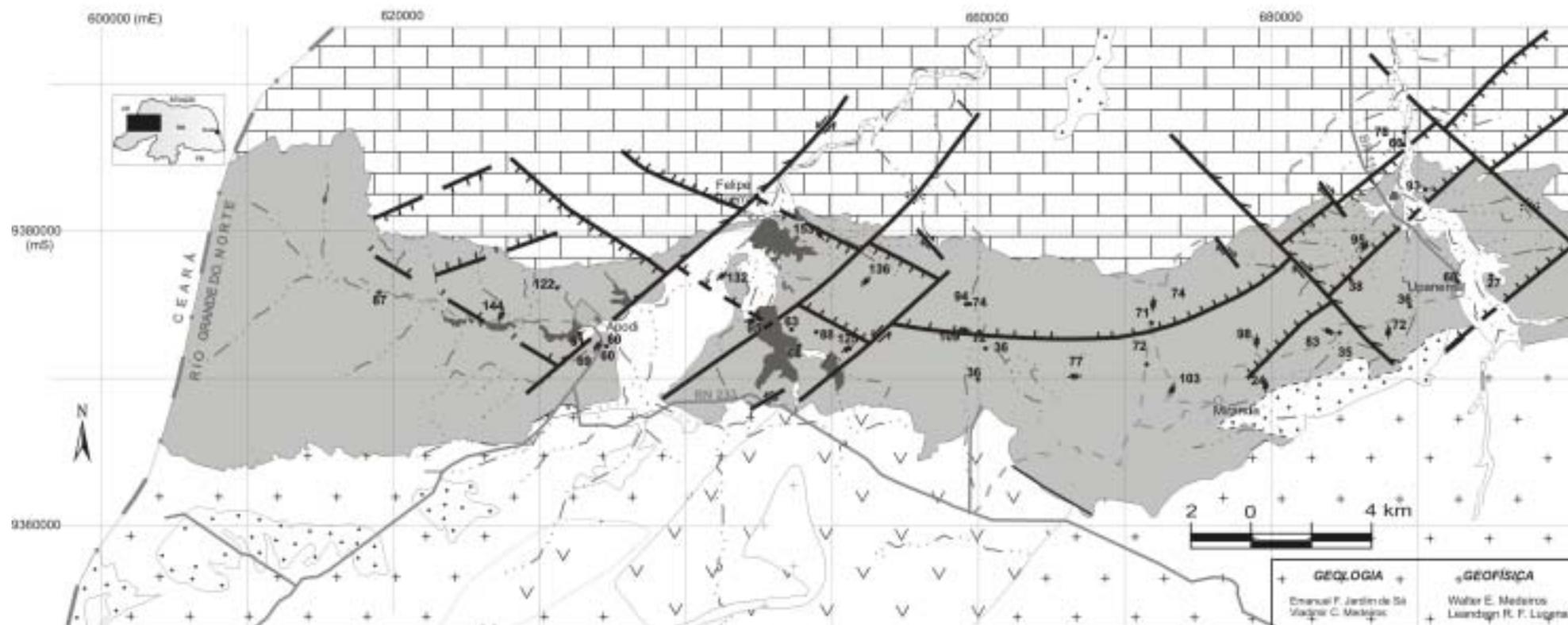
Na paisagem regional distinguem-se diferentes formas de relevo associadas aos diferentes tipos litológicos e as estruturas geológicas. No domínio das rochas cristalinas, ao sul da área, predomina um relevo acidentado, composto por alinhamento de serras e morros isolados, desenvolvendo uma rede de drenagem dendrítica e bastante densa. Ao norte da área, tem-se a ocorrência de um relevo típico de chapada (Chapada do Apodi) formada por calcários da Formação Jandaira, com formas bastante planas e suaves variações de cotas. Na área de estudo, constituída por arenitos da Formação Açu, o relevo é predominantemente tabular e suavemente ondulado, Com a presença de vales associados às drenagens superficiais. O contato da Formação Açu com os calcários da Formação Jandaira ocorre em grande parte sob a forma de escarpa abrupta.

ESTRUTURA HIDROGEOLÓGICA

A caracterização da estrutura hidrogeológica do terreno une ferramentas de análise estrutural, da geofísica e da hidrogeologia. O levantamento geofísico-estrutural foi desenvolvido numa escala regional e compreendeu: compilação de mapa geológico em escala 1:200 000 e interpretação de

lineamentos, com base em imagem Landsat; levantamento de dados estruturais do terreno; análise de dados gravimétricos e execução de sondagens elétricas (Medeiros et al, 2001).

Figura 2. Mapa geológico e estrutural da borda sudoeste da Bacia Potiguar



LEGENDA

	Alluvião - Areias e cascalhos		Contato geológico		Drenagem
	Cenozóico - Arenitos finos a médios, avermelhados e paleocascalheiras.		Falha transcorrente sinistral		Açude
	Formação Jandaíra - Calcarenitos e calcilitos de coloração creme e cinza claro, por vezes com bioclastos.		Falhas com expressão principal em subsuperfície		Cidade
	Formação Açu - Arenitos finos a grossos, por vezes conglomeráticos, de coloração esbranquiçada, amarelada ou avermelhada; conglomerados e níveis de argilitos e/ou siltitos, avermelhados ou esverdeados.		Profundidade do embasamento (dados de sondagens elétricas verticais e de poços tubulares)		Rodovia férrea
	Granitóides Brasileiros - Granitóides porfíricos, grossos a médios, com biotita e/ou anfíbólio.				
	Complexo Gnáissico-Migmatítico - Ortognaisses graníticos a tonalíticos predominantes, com textura equigranular ou <i>augen</i> . Raras metabásicas.				

Denota-se no mapa geológico a presença de altos e baixos estruturais. As principais falhas com rejeitos verticais inferidos a partir dos dados geofísicos (geo-elétricos e gravimetria) e ou poços, situam-se próximas às estruturas que, em subsuperfície, são mapeadas pela PETROBRAS como limites do *graben* central. Embora algumas das anomalias (ou simplesmente “altos” e “baixos”) também possam ser interpretadas como feições associadas a um paleorelevo, a geometria das isogálicas, o contraste entre as sondagens elétricas adjacentes, e os dados do terreno, favorecem uma interpretação estrutural (falhas) na maioria dos casos (Medeiros et al. 2001). Ver figuras 3A a 3C.

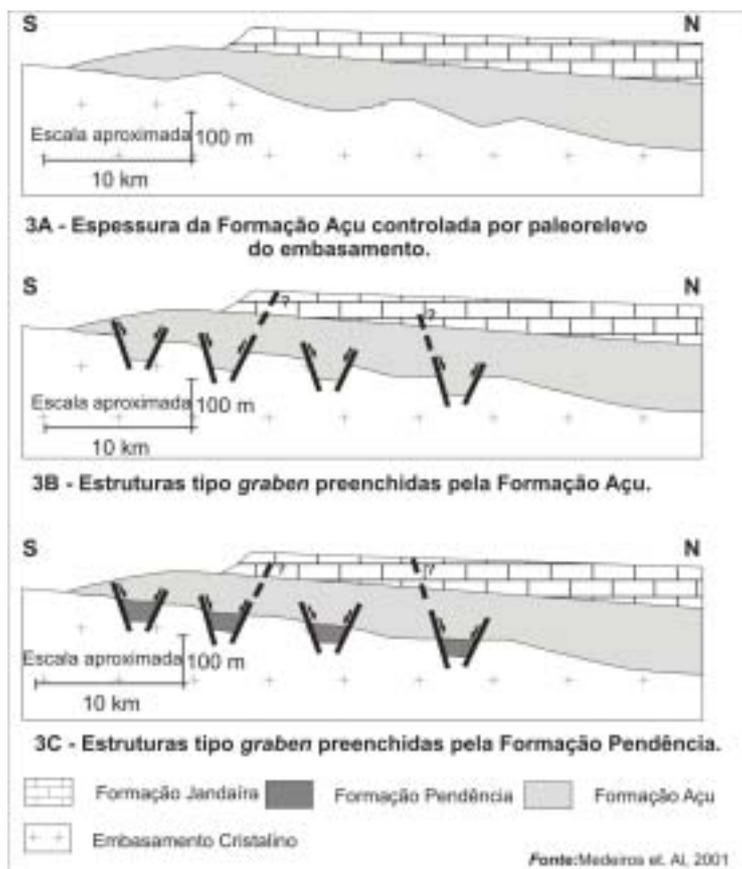


Figura 3 - Modelos de condicionamento estrutural-hidrogeológico na borda sudoeste da Bacia Potiguar

As figuras 4 e 5 apresentam iso-linhas de espessura da Formação Açu e de espessuras saturadas do aquífero Açu (Fevereiro 2001), respectivamente, as quais foram obtidas com base nos dados do cadastramento de poços, nos perfis de poços, sondagens elétricas verticais segundo Medeiros et al. (2001) e sondagens elétricas longitudinais (Santos, 1977). Verifica-se que há um aumento das espessuras do aquífero Açu no sentido de sul (embasamento cristalino) para norte (Formação Jandaira).

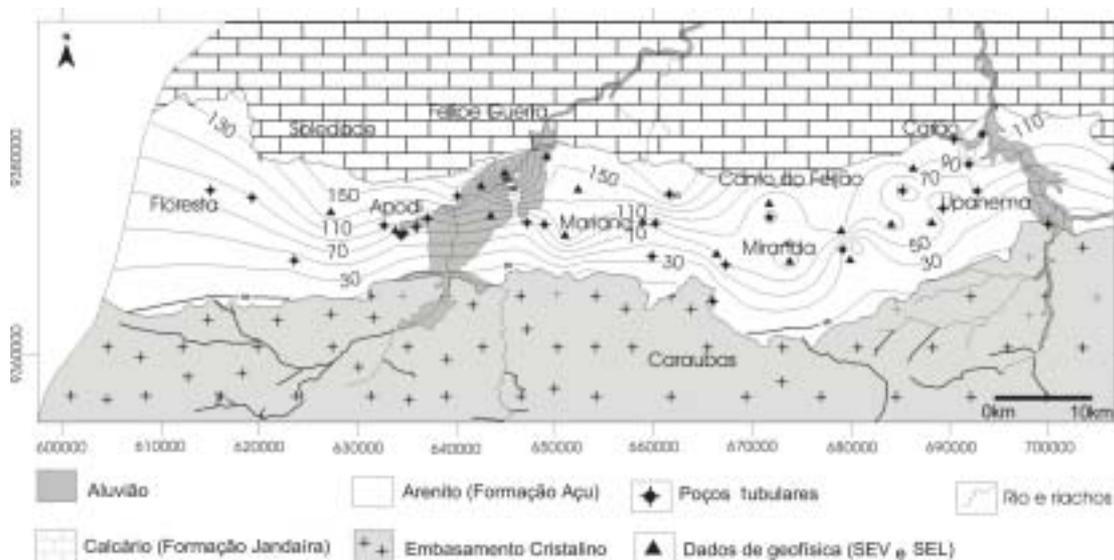


Figura 4 - Espessura da Formação Açú

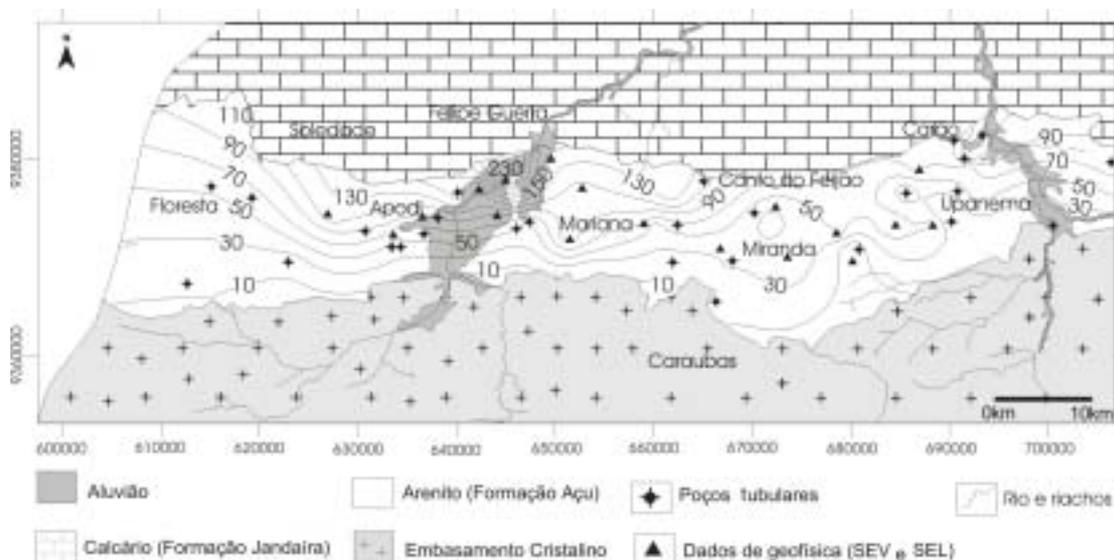


Figura 5 - Espessura saturada do Aquífero Açú

A espessura da Formação Açú varia de menos de 10 m na faixa sul da área (próximo ao contato com o embasamento cristalino) a mais de 90 m na faixa norte (em direção aos calcários). A porção centro-norte da área é que desenvolve maiores espessuras, podendo atingir 275 m (sul de Felipe Guerra).

O comportamento geral das espessuras saturadas do aquífero Açú é similar (Figura 5), variando de menos de 10 m na faixa sul a mais de 70 m na faixa norte.

Tal como ocorre com a espessura total da Formação Açú, a parte central da faixa norte é que desenvolve maiores espessuras saturadas, superiores a 130 m, podendo chegar a 255 m ao sul de Felipe Guerra a luz dos dados levantados. A espessura saturada média, no setor norte, é da ordem de 150 m.

Tendo em vista uma melhor visualização e caracterização da estrutura hidrogeológica do terreno, foram elaboradas seções hidroestratigráficas (figuras 6 a 9) baseadas nos perfis de poços segundo a direção S-N. Em todas as seções denota-se o aumento das espessuras do aquífero Açú de sul para norte, podendo estas variações estar associadas a falhamentos verticais escalonados, tal como sugerem os estudos geofísicos. A seção da Figura 6 cruza a planície aluvial do Apodi na direção SW – NE, passando próximo a cidade de Apodi até Felipe Guerra. Apenas o poço P-180, com 176 m, não penetra toda a espessura do aquífero Açú. Verifica-se a ocorrência de depósitos aluviais cuja espessura atinge até 35,0 m, formados por arenitos finos a grossos com intercalações argilosas. Com relação ao aquífero Açú, há um domínio de sedimentos areno-argilosos próximo ao embasamento cristalino mudando para sedimentos finos e grossos, calcíferos em direção aos calcários da Formação Jandaira, no setor norte. O topo do embasamento cristalino neste setor situa-se a profundidades superiores a 176 m, o que equivale a dizer que a espessura do aquífero Açú é superior a 142 m, já que os primeiros 36 m são compostos por sedimentos aluvionares. Na seção da Figura 7, de direção SE-NW, apenas o poço P-23, com 69 m, distanciado de 6 km do limite sul da área, atinge o embasamento cristalino. No demais poços, com profundidades que vão de 88 a 126 m, o topo do embasamento não é atingido. Com relação a litologia, há um domínio de sedimentos mais grosseiros na parte mais inferior dos perfis, com a presença de arenitos argilosos nos níveis mais superiores. Na seção hidrogeológica da Figura 8 o topo do embasamento cristalino foi atingido a profundidades de 36 e 74 m, a distâncias do limite sul da área de 3 e 8 km, respectivamente. O poço P-209, já próximo dos calcários, com 142 m de profundidade, não atingiu o embasamento rochoso. A correlação litoestratigráfica, neste caso, é muito difícil de ser estabelecida pela grande variação lateral de fácies, o que poderia estar associado a falhamentos ou na pior das hipóteses erros associados a descrição do perfil do poço p-209, o qual exhibe um perfil formado de argilas próximo do poço P-294 cujo perfil encerra arenitos finos a grossos e é de boa produção (60 m³/h). A seção hidrogeológica da Figura 9 situa-se próxima ao extremo leste da área do projeto, passando próximo a cidade de Upanema. O poço P-331 atingiu o embasamento cristalino a uma profundidade de 68 m e está distanciado de 7 km do limite sul da área. Com relação a litologia, com raras exceções o comportamento é similar as demais seções, com a ocorrência de sedimentos mais grossos nos níveis mais inferiores dos perfis.

FLUXO SUBTERRÂNEO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS

De acordos com a configuração das equipotenciais (Figura 10), a estrutura geológica do terreno condiciona linhas de escoamento subterrâneo em geral orientadas no sentido de sul para norte, partindo do contato com as rochas cristalinas em direção aos domínios dos calcários da Formação

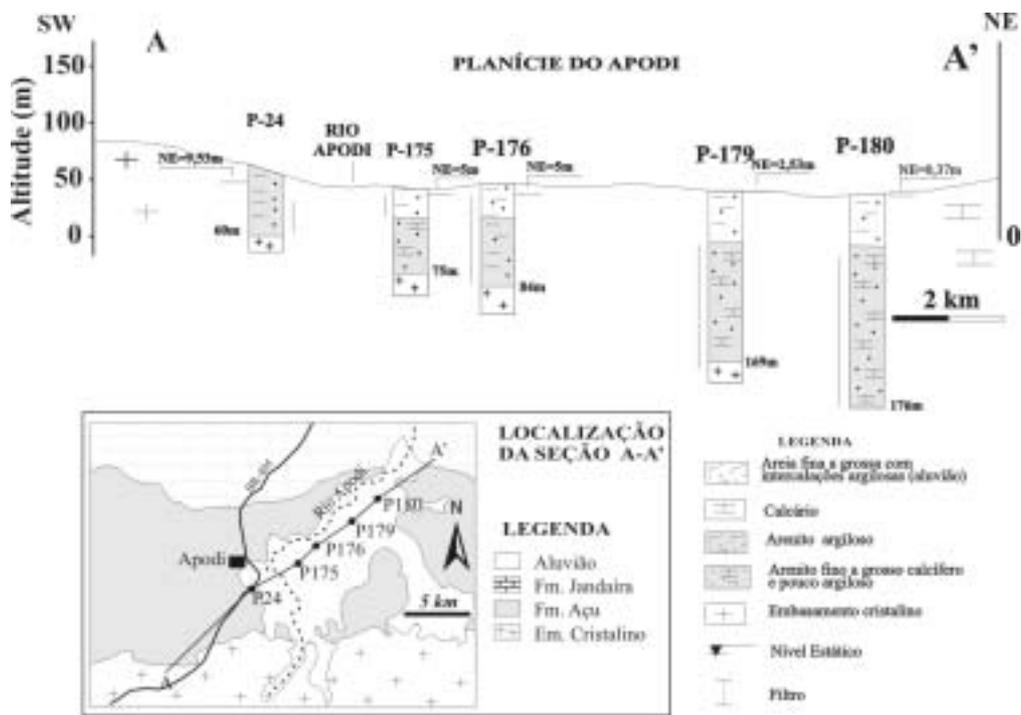


Figura 6 - Seção hidroestratigráfica AA'-Área de Apodi.

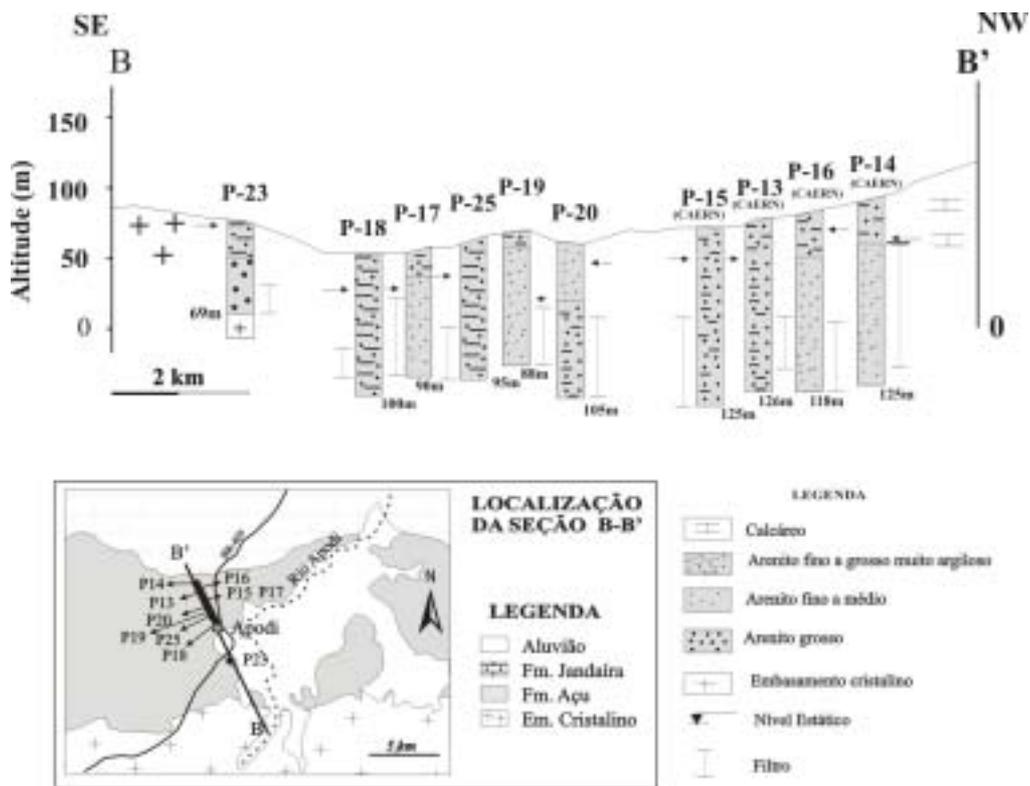


Figura 7 - Seção hidroestratigráfica BB'-Área de Apodi.

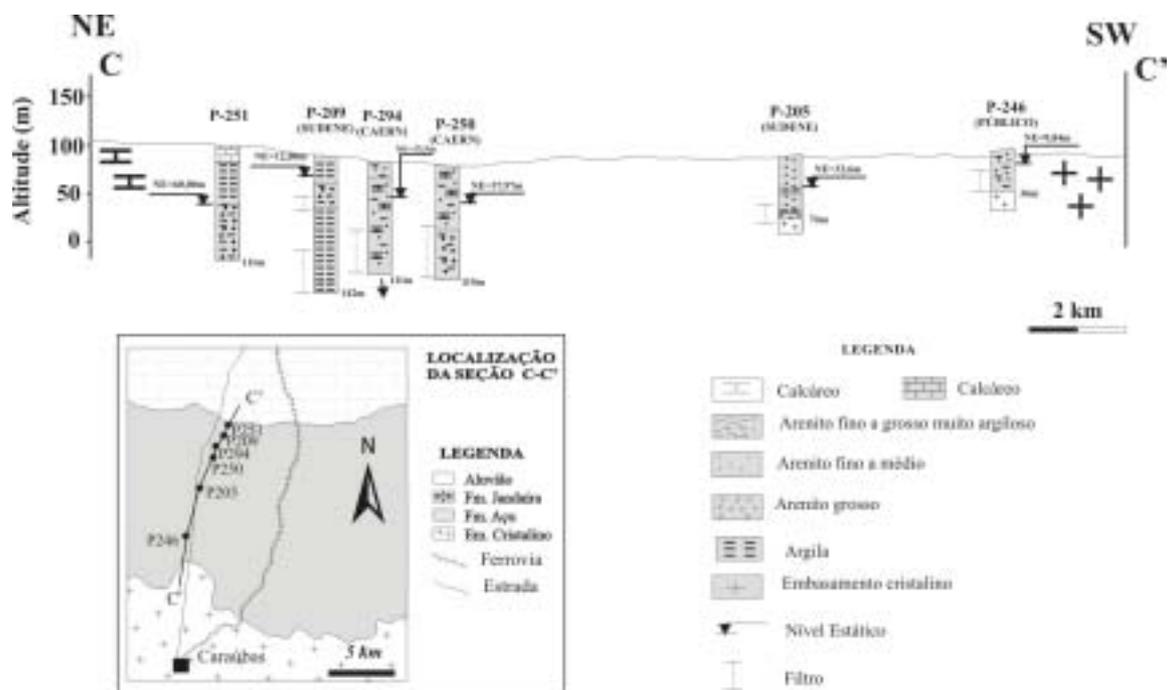


Figura 8 - Seção hidroestratigráfica CC'-Área de Caraúbas.

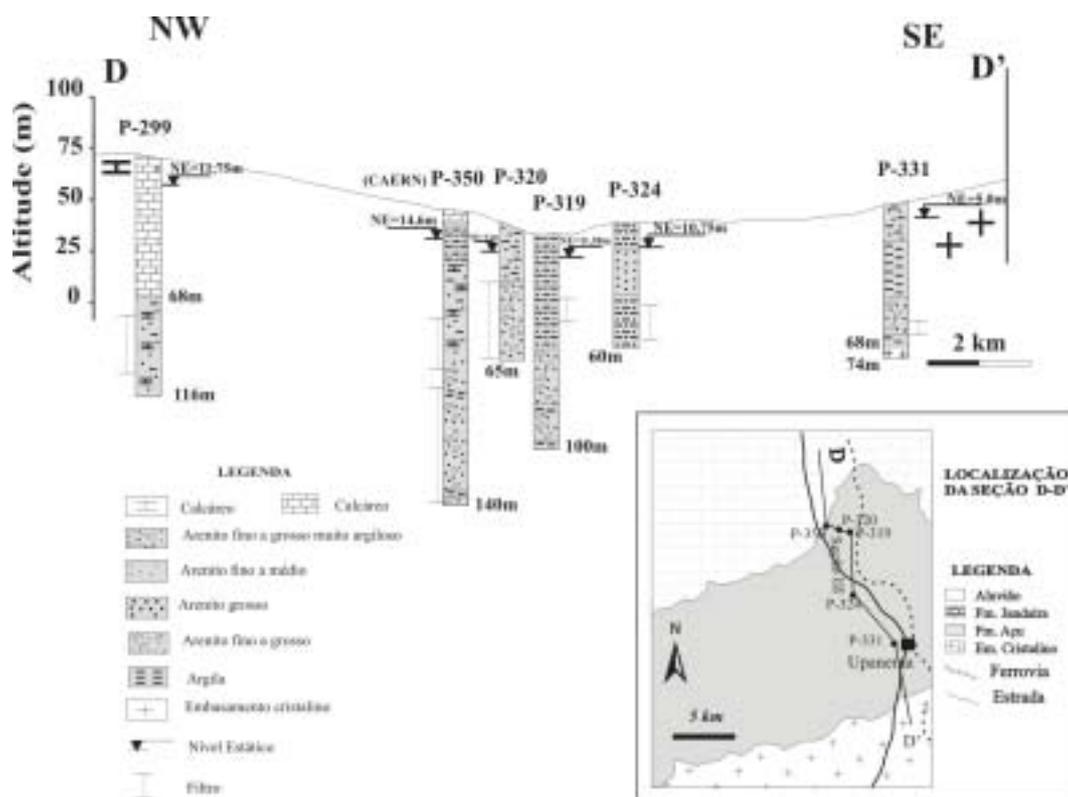


Figura 9 - Seção hidroestratigráfica DD'-Área de Upanema.

Jandaira. Verificam-se ocasionalmente inflexões das linhas de escoamento para nordeste e noroeste em direção aos vales dos rios principais que drenam a área (rios Apodi e do Carmo).

As águas subterrâneas escoam na faixa sul da área com gradientes hidráulicos relativamente elevados, superiores a 1%, enquanto que na faixa norte, contígua aos calcários, os gradientes são

mais baixos, da ordem de 0,2%, sugerindo melhores condições hidrogeológicas neste setor, o que na região da Planície do Apodi pode estar associado também a recarga propiciada pelo aquífero aluvial em direção ao aquífero Açu por drenança vertical descendente.

Os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Açu foram avaliados a partir da interpretação dos resultados de 41 testes de bombeamento em poços de produção, cujos ensaios tiveram uma duração de no máximo 24 horas, com observação da recuperação dos níveis d'água depois de encerrado os bombeamentos. Os locais dos ensaios não estão distribuídos regularmente, o que seria o desejável; como também áreas importantes do ponto vista hidrogeológico não foram testadas. Os ensaios permitiram a avaliação da transmissividade e condutividade hidráulica. A porosidade efetiva não chegou a ser avaliada, já que o único teste de bombeamento com dispositivo de poço de observação realizado teve curta duração e não ficou caracterizado o fenômeno de drenagem retardada na curva de rebaixamento com o tempo. Os testes foram interpretados pela aplicação dos métodos de Cooper & Jacob para rebaixamento e Jacob-Theis para os dados de recuperação. Na maioria dos casos, a correção de Jacob para aquíferos livres foi aplicada aos dados de rebaixamento. A distribuição espacial da transmissividade é apresentada na Figura 11, na qual pode se observar que a transmissividade cresce no sentido de sul para norte na direção do fluxo subterrâneo, atingindo os valores mais elevados próximo ao contato com os calcários. No setor sul da área a transmissividade é inferior a 10 m²/d e no setor norte este parâmetro atinge valores superiores a 170 m²/d (oeste de Felipe Guerra).

A condutividade hidráulica tem um comportamento similar a transmissividade, ou seja, cresce no sentido de sul para norte. Na faixa meridional da área o aquífero Açu apresenta valores de condutividade hidráulica inferior a 0,2 m/d, enquanto que na sua faixa meridional este parâmetro assume valores em média de 1,86 m/d.

Os valores de transmissividade do setor norte da área foram obtidos com base em resultados de testes de bombeamento em poços com penetração parcial no aquífero Açu. Para condições de penetração total, tomando por base a espessura saturada média de 150 m (obtida com base em sondagens mecânicas e sondagens geofísicas) e a condutividade hidráulica média de 1,86 m/d, verifica-se que a transmissividade do aquífero Açu pode atingir valores da ordem de 280 m²/d, em média.

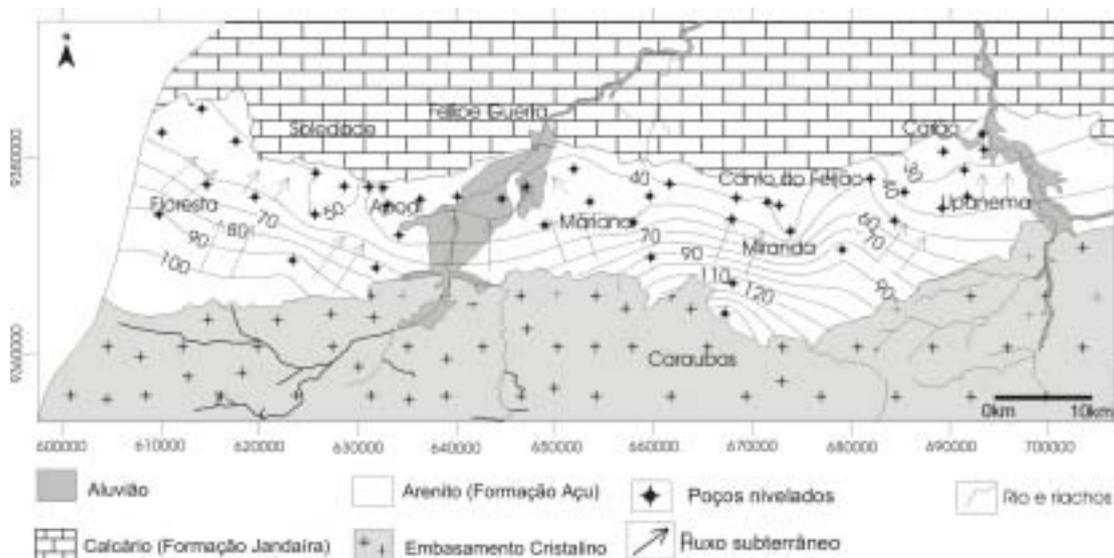


Figura 10 - Potenciometria do aquífero Açú

RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A recarga das águas subterrâneas pode ser definida no senso geral como o fluxo d'água descendente que alcança o nível d'água de um aquífero livre, formando uma reserva de água adicional para as águas subterrâneas. A quantificação da recarga das águas subterrâneas é um pré-requisito básico para um eficiente manejo dos recursos de águas subterrâneas, e é particularmente vital em regiões semi-áridas onde tais recursos são freqüentemente a chave do desenvolvimento econômico. Nestas condições, em regiões semi-áridas a necessidade de estimativa de uma recarga confiável é fundamental (Simmers, 1997). Este parâmetro é, entretanto, muito difícil de ser avaliado principalmente em regiões semi-áridas (Lerner et. al., 1990; Simmers et al., 1997; Lerner, 1997; Healy & Cook, 2002; Sanford, 2002 e Vries & Simmers, 2002). A recarga das águas subterrâneas pode ocorrer naturalmente das precipitações, rios, canais e como um fenômeno induzido pelo homem através de atividades de irrigação e de urbanização. A maioria das técnicas de avaliação de recarga em meio insaturado fornecem estimativas pontuais, enquanto que as técnicas na zona saturada comumente integram áreas muito mais extensas. Ainda, enquanto as abordagens na zona insaturada fornecem estimativas potenciais da recarga, as abordagens na zona saturada fornecem evidências da recarga real porque a água alcança o nível d'água (Scanlon & Cook, 2002). Devido as incertezas associadas com as técnicas para a estimativa da recarga, o uso de diferentes métodos é recomendado para que se possa comparar resultados e se chegar a um número mais confiável.

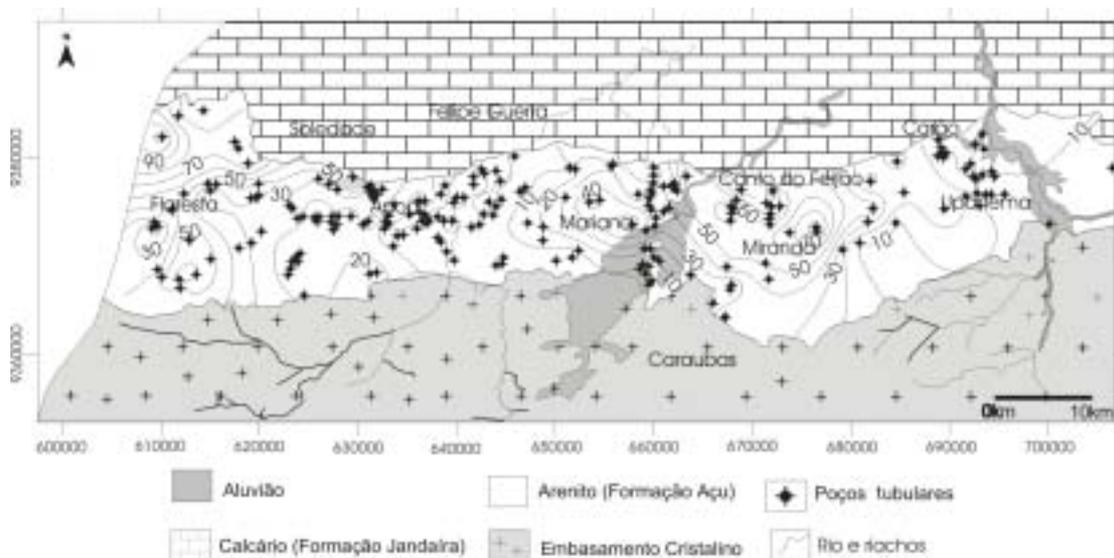


Figura 12 - Profundidade do nível das águas subterrâneas.

Balanco hidroclimatológico

O método do balanço hidroclimatológico é um procedimento elementar que pode fornecer uma primeira indicação potencial sobre o montante da recarga das águas subterrâneas. A equação geral do balanço hídrico estabelece que:

$$P = E + R + I \quad (1)$$

Onde P é a precipitação (mm); E é a evapotranspiração real (mm); R é o escoamento superficial (mm) e I é a infiltração (mm).

O excedente anual de água no solo de precipitação (R + I) pode corresponder à lâmina d'água infiltrada no terreno (Castany, 1975 e Fetter, 1994). Nestas condições, o excedente de água de precipitação obtida no balanço hídrico foi de 47,6 mm, o qual pode corresponder à recarga das águas subterrâneas na área de estudo. Considerando a precipitação pluviométrica média na área é de 798,24 mm, a taxa de infiltração correspondente é de 5,96%.

Aplicação da Ley de Darcy

Em aquíferos livres, como é o caso do aquífero Açú, suas potencialidades estão condicionadas principalmente as infiltrações diretas das águas de chuva, cujo volume efetivamente infiltrado restitui as reservas de águas subterrâneas que se perdem nos escoamentos naturais e exploração por poços e, também, alimentam o fluxo subterrâneo. Por definição, em condições de equilíbrio, sem considerar a exploração por poços, a infiltração eficaz é equivalente a vazão do fluxo subterrâneo natural. A descarga do fluxo subterrâneo natural em direção à região dos calcários, obtida a partir

do mapa potenciométrico (Figura 10), foi de $1,688 \text{ m}^3/\text{s}$, o que equivale a $50,64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, que em termos de lâmina d'água corresponde a 38 mm. A equação utilizada foi:

$$Q = TIL \quad (2)$$

Onde Q é a vazão do fluxo subterrâneo (m^3/s); T é a transmissividade (m^2/s); e L é a frente de escoamento (km).

Nas avaliações foi considerado um valor médio de transmissividade de $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, obtido a partir da condutividade hidráulica média de $2,31 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e espessura saturada de 130 m do aquífero Açú na faixa contígua aos calcários. A vazão do fluxo subterrâneo foi avaliada para uma condição no qual o aquífero estava sendo explotado, e assim sendo, o montante correspondente a esta exploração deve ser considerado na recarga anual, o que corresponde a $8,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ (equivalente a 6mm/anuais). A recarga de água subterrânea, neste caso, será o somatório da vazão de fluxo obtida com o correspondente volume anual explotado, ou seja, $58,64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou 44 mm de lâmina d'água infiltrada. A taxa de infiltração, portanto é da ordem de 5,7%, tomando por base a precipitação pluviométrica média de 765,10 mm/ano.

Flutuação sazonal do nível d'água

O método da flutuação do nível d'água é baseado na premissa de que a elevação do nível d'água subterrânea em aquíferos livres é devido a água de recarga que chega ao aquífero. A recarga é calculada como:

$$R = S_y(dh/dt) = S_y(\Delta h/\Delta t) \quad (3)$$

Onde S_y é a porosidade específica (adm); h é a altura do nível d'água (mm), e t é o tempo (s).

O método da flutuação de nível d'água tem sido usado em vários estudos (Rasmussen and Andreasen 1959; Gerhard 1986; Hal and Risser 1993) e descrita em detalhe por Healy and Cook (2002). As dificuldades de aplicação do método é atribuída em geral a falta de um conhecimento mais preciso da porosidade efetiva do material aquífero sujeito a variação sazonal. No presente estudo, a porosidade específica não chegou a ser avaliada, de forma que para efeito de avaliação da recarga este parâmetro teria que ser estimado com base em suas características litológicas e o correspondente valor na literatura. Quanto a variação do nível d'água, as observações efetuadas não foram suficientes para uma caracterização adequada de Δh , impossibilitando, portanto a aplicação do método da Flutuação do nível d'água.

Balanço de cloreto

A recarga das águas subterrâneas pode ser avaliada de forma aproximada pelo método do balanço do íon cloreto, o qual pode ser estabelecido pela equação:

$$IC_i = PC_p, \text{ ou seja, } I = PC_p / C_i \quad (4)$$

Onde I é a lâmina de água infiltrada (mm/ano); C_i é a concentração de cloreto nas águas subterrâneas (mg/L); P é a precipitação pluviométrica (mm/ano); e C_p é a concentração de cloreto na água de chuva (mg/L).

Esse método baseia-se no fato de que o íon cloreto é conservativo e não sofre modificações durante a infiltração. Os resultados do balanço do íon cloreto são bons em zonas áridas e zonas arenosas, porém não tanto em zonas úmidas ou com elevado escoamento superficial (Custódio, 1973 e Custódio & LLamas, 1986). A concentração de cloreto nas águas subterrâneas do aquífero Açú, considerada para efeito de cálculo, corresponde ao valor representativo da faixa norte da área onde as águas estão mais diluídas e menos afetadas por processos de salinização, cujo teor de cloreto é de 50 mg/L; no caso das águas de chuva, foi tomado o valor médio de 2,53 mg/L. Desde que a precipitação pluviométrica na área é de 765,1 mm/ ano, aplicando a equação do balanço de cloreto resulta uma lâmina d'água infiltrada de 38,71 mm, que corresponde a uma taxa de infiltração de 5,6%.

Tabela 1 - Recarga das águas subterrâneas

Método	Balanço Hídrico	Lei de Darcy	Balanço de cloreto
Lâmina de água infiltrada (mm/ano)	47,60	44,00	38,71
Taxa de infiltração (%)	5,96	5,70	5,06
Volume infiltrado ($10^6 m^3$ /ano)	62,83	58,64	51,08

CONDIÇÕES DE EXPLOTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A recarga das águas subterrâneas do aquífero Açú a ser considerada neste trabalho corresponde à média obtida pela aplicação da Lei de Darcy e pelo Balanço de cloreto, ou seja, é da ordem de 41 mm/ ano. Em regiões semi-áridas com precipitações pluviométricas da ordem de grandeza de 800 mm anuais, as lâminas d'água infiltradas atingindo as águas subterrâneas em aquíferos livres à semi-confinados são em geral consideradas superiores a 40 mm (Foster et al.,

1994 e Simmers, 1997). Assim sendo, as estimativas feitas no âmbito deste trabalho para o aquífero são aceitáveis. Em função desses resultados, admitindo condições de equilíbrio, ou seja, sem exploração das águas por poços, os recursos exploráveis poderiam ser teoricamente tomados como equivalentes à recarga anual. Isto, entretanto, deve ser tomado com certa reserva, haja vista a ocorrência de águas salinizadas principalmente no setor sul da área, o que limita desta feita o uso das águas subterrâneas. Ressalta-se, entretanto que os aspectos relativos a qualidade das águas não é considerado neste artigo.

A integração geral dos resultados dos estudos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos levam à caracterização de subáreas ou zonas com diferentes possibilidades quanto aos recursos exploráveis, que em termos potenciais são apresentados a seguir (Figura 13):

Zona A: Localiza-se no setor norte da área e corresponde a zona de maior potencial hidrogeológico. O aquífero Açú desenvolve espessura saturada em média de 150 m e transmissividade de $280 \text{ m}^2/\text{d}$. Os poços neste domínio, com profundidade em média de 160 m, podem produzir até $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Zona B: É contígua a Zona A e de potencial hidrogeológico médio. A espessura saturada é da ordem de 50 m e a transmissividade do aquífero é de $100 \text{ m}^2/\text{d}$. Os poços nesta zona com profundidades da ordem de 120 m podem produzir até $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

Zona C: Situa-se no setor sul da área e é a zona que apresenta potencial hidrogeológico mais baixo. O aquífero desenvolve espessura saturada de menos de 10 m até 50 m, e a transmissividade é em geral inferior a $10 \text{ m}^2/\text{d}$. A produtividade de poços com 70 m de profundidade, é de no máximo $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Da análise empreendida e de acordo com a Figura 13, verifica-se que quase 50% da área de estudo (de 1320 km^2) apresenta limitações quanto a ocorrência e a exploração das águas subterrâneas por problemas lito-estruturais que limitam as espessuras saturadas dos aquíferos Açú, tal como se verifica no setor sul da área. O volume de água que se infiltra na Zona C foi estimado com base na vazão do fluxo subterrâneo natural que transita da Zona C para a Zona B pela aplicação da Lei de Darcy (com base na Figura 13), tendo sido obtido uma descarga de $0,152 \text{ m}^3/\text{s}$ ou 4,6 milhões de m^3/ano . Este valor representa apenas 8,5% do volume total da recarga de 54 milhões de m^3/ano . Assim sendo, o volume de água efetivamente infiltrado nas zonas A e B é de aproximadamente 49,4 milhões de m^3/ano , o que teoricamente em condições de equilíbrio corresponde ao volume de água explorável nas zonas A + B sem considerar os problemas de salinização. Nestas condições, os recursos exploráveis na Zona C são relativamente baixos (inferiores a 4,6 milhões de m^3/ano), ressaltando-se ainda quanto as limitações de uso dessas águas devido a reduzida vazão dos poços de captação.

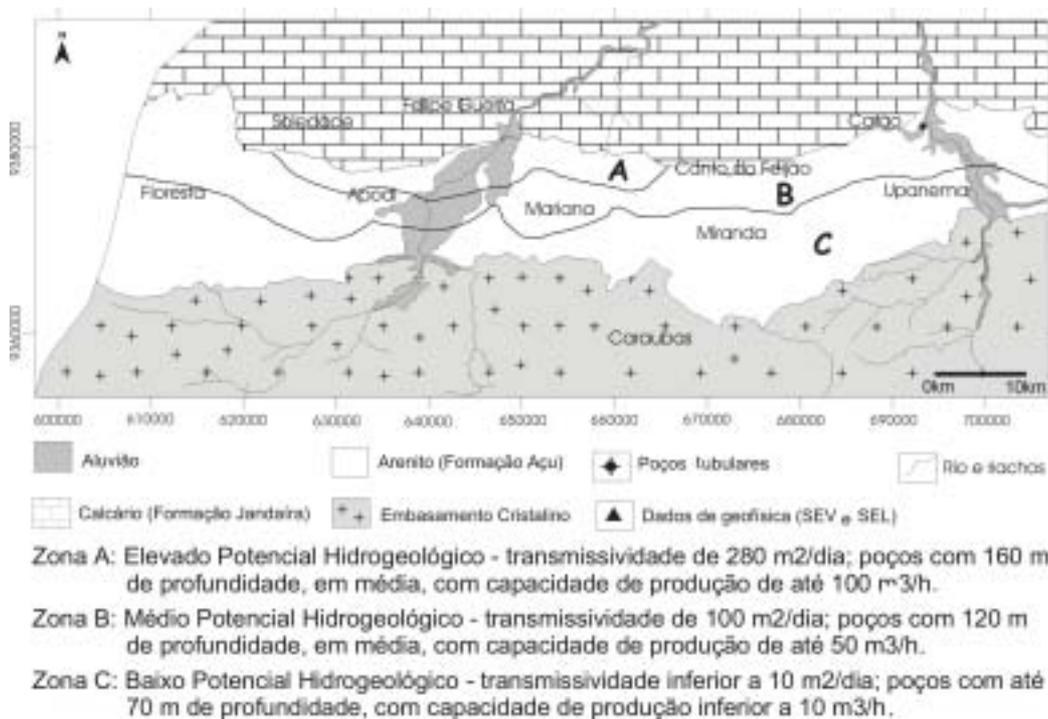


Figura 13 - Potencialidades hidrogeológicas do aquífero Açú

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os aspectos lito-estruturais da Formação Açú condicionam a ocorrência de um aquífero livre sujeito a semiconfinamentos localizados, com diferentes comportamentos quanto a recarga e suas potencialidades. Pouco mais de 90% dos recursos do aquífero Açú estão concentrados na faixa norte da área, que abrange cerca de 660 km² (metade da área de estudo). O restante, menos de 10%, está situada na metade inferior da área.

O volume de água que é disponibilizado atualmente à população é da ordem de 10 milhões de m³/ano, o que representa menos de 20% da recarga anual (54 milhões de m³). Nestas condições, fica caracterizada a possibilidade de manutenção das descargas atuais que estão sendo captadas no aquífero Açú e também a ampliação da oferta d'água, que pode chegar a 40 milhões de m³/ano. A preocupação neste caso está associada ao manejo do uso dessas águas, o qual requer poços criteriosamente locados, projetados e explorados de forma que não haja riscos de sobretiragem, salinização e ou outras formas que possam afetar os recursos e poços de captação. Neste sentido são feitas a seguir recomendações visando a melhoria do conhecimento do aquífero Açú e uso racional dos seus recursos hídricos:

- Monitoramento dos níveis, das descargas bombeadas e da qualidade das águas o que permitirá avaliar periodicamente a eficiência das captações;
- Execução de sondagens de reconhecimento lito-estratigráfico na faixa norte da área;
- Execução de estudos geofísicos de detalhe em áreas específicas;

- Elaboração de teste de aquífero de longa duração para avaliação da porosidade efetiva do aquífero Açu.

Os resultados a serem obtidos com esses estudos complementares deverão levar a uma avaliação mais precisa das dimensões, parâmetros hidrodinâmicos e condições de exploração do aquífero Açu, bem como a definição de estratégias de manejo que venham a assegurar o uso sustentável do aquífero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTANY, 1975. Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Ediciones Omega, Barcelona.
- [2] CUSTODIO, E., 1973. Estudio de los recursos de aguas subterráneas en la cuenca de la Riera de Carme e área de Capellades: alrededores de Igualada (Barcelona). Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Serviço Geológico de Obras Públicas, Barcelona.
- [3] CUSTODIO, E & LLAMAS, M. R., 1976. Hidrologia Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2ed, Tomo I e II.
- [4] DE VRIES, J. J. & SIMMERS, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol J* 10: DOI 10.1007/s10040-001-0171-7
- [5] FETTER, C. W., 1994. *Applied Hydrogeology*. 3^a ed. New Jersey: University of Wisconsin-Oshkosh. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- [6] FOSTER, S.S.D., MORRIS, B.L., LAWRENCE, A. R., 1994. Effects of urbanization on groundwater recharge. In: *Proc ICE Int Conf on Groundwater problems in Urban Areas*, London, pp43-63.
- [7] GERHART, J. M., 1986. Groundwater recharge and its effect on nitrate concentrations beneath a manures field site in Pennsylvania. *Groundwater* 24:483-489.
- [8] HALL, D. W. & RISSER, D. W., 1993. Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster country, Pennsylvania. *Water Resour Bull* 29:55-76.
- [9] HEALY, R. W. & COOK, P. G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeologic J* DOI 10.1007/s10040-001-0178-0.
- [10] IPT, 1982. Estudo hidrogeológico regional do Estado do Rio Grande do Norte, São Paulo, IPT/SIC (Relatório 15.795 – volume 1).
- [11] LERNER, D. N., 1997. Groundwater recharge. In: Saether OM, de Caritat P (eds) *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*. AA Balkema, Rotterdam, pp 109-150.

- [12] LERNER, D. N., ISSAR, A. S., SIMMERS, I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH Int Contrib Hydrogeolog 8. Heinz Heise, Hannover, 345 pp.
- [13] MANUEL FILHO, J. M., 1971. Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste. Folha 10, Jaguaribe, NE. SUDENE, DD, Série Hidrogeologia nº 30, Recife.
- [14] MEDEIROS, W. E; DE SÁ, F. J. MEDEIROS, V. C.; LUCENA, L.R.F., 2001. Estrutura geológica do aquífero Açú na borda sul da Bacia Potiguar entre Apodi e Upanema, RN. Convênio CAERN/FUNPEC/UFRN. Relatório Técnico.
- [15] PIPPER, A. M., 1983. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. In: Chemical Hydrogeology, p.50-59. Edited by William Back and Allan Freeze, Hutchinson Ross Publishing Company.
- [16] RASMUSSEN, W. C. & ANDREASEN, G. E., 1959. Hydrologic budget of the Beaverdam Creek Basin, Maryland. US Geol Surv Water –Supply Pap 1472: 106 p.
- [17] REBOUÇAS, A.C., 1967. Bacia Potiguar. Estudo Hidrogeológico. In: Bacia Escola de Hidrogeologia, Recife, SUDENE/DD. (Série Hidrogeologia nº 15). Relatório Interno.
- [18] SANFORD, W., 2002. Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeol J 10: DOI 10.1007/s10040-001-0173-5.
- [19] SANTOS, M. V., 1977. Estudo hidrogeológico da Planície Aluvial do Apodi, RN. Economicidade de poços para a irrigação, Recife, SUDENE/UFPE, 185p.
- [20] SCANLON, B. R., HEALY, R. W.; COOK, P. G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeologic J DOI 10.1007/s10040-001-0176-2..
- [21] SIMMERS, I (ed), 1997. Recharge of phreatic aquifers in (semi)arid areas. IAH Int Contrib Hydrogeolog 19, AA Balkema, Rotterdam, 277 pp.