

Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão

Synthesis of the hydrogeological studies in the sedimentary basins Amazon and Solimões: the Aquifers Systems Içá-Solimões and Alter do Chão

Eliene Lopes de Souza¹, Paulo Henrique Ferreira Galvão², Cleane do Socorro da Silva Pinheiro³, Marcus Paulus Martins Baessa⁴, José Geilson Alves Demétrio⁵, Wilker Roberto Rodrigues Brito⁶

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará - UFPA, Rua Augusto Corrêa 1, Guamá, CEP 66075-110, Belém, PA, BR (eliene@ufpa.br)

²Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, BR (hidropaulo@gmail.com)

³Instituto de Meio Ambiente e Ordenamento Territorial do Estado do Amapá - IMAP, Macapá, AP, BR (cleannessp@gmail.com)

⁴Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello - CENPES, Rio de Janeiro, RJ, BR (marcus.baessa@petrobras.com.br)

⁵Laboratório de Hidrogeologia, Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, BR (geilson@ufpe.br)

⁶Mineração Aurizona S/A, Godofredo Viana, MA, BR (wilker.roberto@mineracaoaurizona.com.br)

Recebido em 21 de março de 2012; aceito em 30 de novembro de 2012

Resumo

Mapas geológicos e cartas estratigráficas das bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões foram revisados, enfatizando-se as formações Alter do Chão, Içá e Solimões, detentoras das maiores reservas de água doce subterrânea, nessas bacias. A carência de informações sobre essas formações foi minimizada pela utilização de amostras de sondagens estratigráficas e de perfis construtivos, litológicos e geofísicos de poços de captação de água e de petróleo obtidos na Base Operacional Geólogo Pedro de Moura, região de Urucu, cerca de 650 km a sudoeste de Manaus (AM). Na Bacia do Amazonas, o Sistema Aquífero Alter do Chão comporta aquíferos livres e confinados, com coeficiente de transmissividades entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $9,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, indicados para abastecimento público; na Bacia do Solimões, esse Sistema é confinado pelo Aquicludo Solimões, ao qual se sobrepõe o Sistema Aquífero Içá-Solimões. A reserva de água estimada é de 33.000 km^3 . O Sistema Aquífero Içá-Solimões, em Urucu, é livre-confinado, com dois aquíferos hidráulicamente conectados: o mais superficial, com topo e base em profundidades próximas de 20 e 70 m, respectivamente, e o mais profundo, entre 50 e 120 m. Com área de afloramento na Bacia do Solimões de 948.600 km^2 , a reserva estimada desse sistema foi calculada em 7.200 km^3 , menos expressiva que a do Sistema Aquífero Alter do Chão. Os parâmetros hidrodinâmicos médios foram: $T = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 5 \times 10^{-4}$ e $K = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, de ordens de grandeza similares aos valores encontrados no Sistema Aquífero Alter do Chão. Avaliando-se as inter-relações regionais e potencialidades desses dois sistemas aquíferos procurou-se contribuir para o conhecimento hidrogeológico na Região Hidrográfica Amazônica, onde as pesquisas sobre águas subterrâneas ainda são incipientes.

Palavras-chave: Sistemas aquíferos; Içá-Solimões e Alter do Chão; Água subterrânea; Reservas.

Abstract

Geological maps and stratigraphic charts of the Amazon and Solimões sedimentary basins were reviewed, emphasizing the formations *Alter do Chão*, *Içá* and *Solimões*, the largest reserves of fresh groundwater in these basins. The lack of information on these formations was minimized by sample probe and stratigraphic profiles of construction, lithological and geophysical water and oil wells, obtained in the *Base Operacional Geólogo Pedro de Moura*, *Urucu* region, about 650 km southwest of Manaus (AM). In the Amazon Basin, the Aquifer System *Alter do Chão* is characterized by unconfined and confined aquifers, with transmissivity between 1.5 and $9.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, indicated for public supply. In the *Solimões* Basin, this system is confined by *Aquicludo Solimões*, recovered by the *Içá-Solimões* Aquifers. The reserve is estimated as $33,000 \text{ km}^3$.

The Aquifer System *Içá-Solimões*, in *Urucu*, is unconfined-confined, with two aquifers hydraulically connected: the superficial, with top and bottom at depths near 20 and 70 m, respectively; and the deeper, between 50 and 120 m. With an outcrop area of 948,600 km² in the *Solimões* Basin, the reservation of this system was estimated as 7,200 km³, less expressive than the Aquifer System *Alter do Chão*. The average hydrodynamic parameters were: $T = 3 \times 10^{-3}$ m²/s, $S = 5 \times 10^{-4}$ and $K = 1 \times 10^{-4}$ m/s, orders of magnitudes similar to those found in the aquifer *Alter do Chão*. Assessing the interrelationships and potential of these two regional aquifers sought to contribute to the hydrogeological knowledge in the Amazon Basin region, where researches on groundwater are still incipient.

Keywords: Aquifer systems; *Içá-Solimões* and *Alter do Chão*; Groundwater; Reserves.

INTRODUÇÃO

Na Região Hidrográfica Amazônica (Brasil, 2006), as pesquisas sobre águas subterrâneas são ainda incipientes e concentradas nos aquíferos da Formação *Alter do Chão* (Tancredi, 1996; Aguiar et al., 2002; Souza e Verma, 2006). Além disso, ainda não se dispõe de uma integração abrangente desses estudos com as informações geológicas regionais existentes, dificultando o planejamento e a execução de programas voltados para a gestão integrada dos recursos hídricos nessa região.

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2005), o Sistema Aquífero *Alter do Chão* é do tipo livre, ocorrendo na região centro-norte do Pará e leste do Amazonas, ocupando uma área de 312.574 km² na Bacia Sedimentar do Amazonas.

No trabalho de Cunha et al. (1994), o Sistema Aquífero *Alter do Chão* é caracterizado como sendo livre e confinado, representado por intercalações de arenitos, argilitos, siltitos e, subordinadamente, conglomerados. Em Manaus, o estudo desenvolvido por Aguiar et al. (2002) determinou para o sistema espessura em torno de 200 m, sendo 175 m saturados, com uma reserva permanente estimada em 10 km³, para uma porosidade efetiva de 15% e área de ocorrência de 400 km².

Também em Manaus, Souza e Verma (2006) mapearam as unidades geológicas que compõem o Sistema Aquífero *Alter do Chão* por meio de dados de sondagens elétricas verticais, perfisagens geofísicas de poços e perfis litológicos de amostragem de calha, identificando duas zonas aquíferas: a primeira, até 50 m de profundidade, constituída por camadas argilosas, arenosas e areno-argilosas, de dimensões variadas; e a segunda, de 50 a 290 m, caracterizada por camadas mais arenosas e areno-argilosas, propícias ao armazenamento de água devido à sua boa continuidade lateral, à maior espessura e aos corpos mais arenosos. Os poços que captam essa zona apresentam vazão em torno de 300 m³/h, servindo para o abastecimento público.

Em Santarém, no estado do Pará, os estudos realizados por Tancredi (1996) indicam que, assim como nas pesquisas realizadas em Manaus, a Formação *Alter do Chão* constitui um aquífero livre e outros confinados, estes separados por aquícludes e/ou aquitardes, pouco espessos; o aquífero livre possui espessura média de 50 m, enquanto que os confinados totalizam 430 m. Os aquíferos possuem elevada produtividade, com valores de transmissividades

compreendidos entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $9,1 \times 10^{-3}$ m²/s, superiores aos indicados para poços de abastecimento. Nesse mesmo estudo, o autor obteve uma reserva permanente de 86,55 km³, considerando uma área de ocorrência de 900 km², espessura total e porosidade efetiva de 480 m e 20%, respectivamente. A reserva reguladora, calculada para uma área de cerca de 150 km², foi de 0,037 km³.

A qualidade da água do Sistema *Alter do Chão* é considerada boa, apresentando pH médio de 4,8 e sólidos totais dissolvidos inferiores a 100 mg/L (ANA, 2005). Na região de Manaus, as águas apresentam pH médio variando de 4,1 a 5,4; são fracamente mineralizadas, com condutividade elétrica variando entre 15,1 a 82,9 μ S/cm, sendo predominantemente cloretadas sódicas ou potássicas. Na cidade de Manaus, Vasconcelos (2006) estudou a qualidade da água de 30 poços tubulares, nas épocas chuvosa e seca, identificando evidências de contaminação antrópica em algumas áreas, principalmente nos poços que captam aquíferos livres.

No levantamento bibliográfico feito no presente estudo constatou-se que a caracterização do denominado Sistema Aquífero *Solimões* é bastante escassa, sendo a sua descrição obtida essencialmente da ANA (2005). De acordo com essa publicação, esse Sistema é representado pelos sedimentos do topo da sequência sedimentar da Bacia do Amazonas, possuindo uma área de recarga de 457.664 km², correspondente ao estado do Acre e a parte do oeste do estado do Amazonas. A qualidade da água é considerada boa, embora haja limitações para o seu uso nas áreas urbanas devido à elevada vulnerabilidade natural à poluição (aquífero freático com nível da água raso), associada à carência de saneamento básico e aos riscos de contaminação representados por poços mal construídos.

Este trabalho fundamentou-se principalmente em estudos geológicos e hidrogeológicos publicados, desenvolvidos nas bacias sedimentares do Amazonas e do *Solimões*, com ênfase para as Formações *Alter do Chão*, *Solimões* e *Içá*, detentoras das maiores reservas de água doce subterrânea, nessas bacias.

Às informações publicadas acrescentam-se novas, obtidas na Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), da Petrobras, na região de Urucu, a cerca de 650 km a sudoeste de Manaus (AM). Os dados são resultado do Projeto Caracterização Hidrogeológica para o Uso Sustentável da Água Subterrânea (ECO-03), desenvolvido

por meio de uma parceria entre a Petrobras, a Universidade Federal do Pará (UFPA) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Procurou-se mostrar regionalmente as inter-relações entre os sistemas aquíferos constituídos pelas formações enfocadas, além de efetuar estimativas preliminares de suas reservas. Buscou-se, dessa forma, contribuir para o conhecimento hidrogeológico da Região Hidrográfica Amazônica.

GEOLOGIA

O entendimento da hidrogeologia na Amazônia Brasileira passa pelo conhecimento da geologia das duas maiores bacias sedimentares da região, a do Solimões e a do Amazonas.

A Bacia Paleozoica Sedimentar do Solimões ocupa uma área de aproximadamente 948.600 km² (Barata e Caputo, 2007). Desse total, afloram cerca de 576.300 km² de sedimentos pertencentes à Formação Içá, enquanto que nos 372.300 km² restantes afloram os sedimentos da Formação Solimões (Figura 1). Essa bacia se desenvolveu em rochas cristalinas e sedimentares proterozoicas da Província Amazônia Central, sendo subdividida em sub-bacia de Jandiutuba, a oeste, e sub-bacia do Juruá, a leste, separadas pelo Alto de Carauari (Figura 2).

Por sua vez, o limite com a Bacia do Amazonas é feito através do Arco de Purus (Eiras et al., 1994). O arcabouço estratigráfico da Bacia do Solimões divide-se em seis sequências: Ordoviciano, Siluriano-Devoniano, Devoniano-Carbonífero, Carbonífero-Permiano, Cretáceo e Terciário-Quaternário, na qual se encerra a sedimentação nessa bacia. Com relação aos ambientes deposicionais das formações em estudo, a sequência Cretáceo é caracterizada por um sistema fluvial de alta energia, responsável pela deposição da Formação Alter do Chão, sob clima úmido, enquanto que a sequência Terciário-Quaternário, discordante sobre a Formação Alter do Chão, e representada pelas formações Solimões e Içá, forma uma cunha sedimentar desde o Arco de Purus até as bacias subandinas (Barata e Caputo, 2007). Os ambientes de deposição dessas duas formações foram interpretados como fluvial meandrante e fluvial deltaico, respectivamente (Silveira, 2005).

A Bacia Paleozoica do Amazonas ocupa uma área sedimentar total de aproximadamente 615.600 km², com as superfícies de afloramentos das Formações Alter do Chão e Içá correspondendo a 410.000 e 205.000 km², respectivamente (Figura 1). O preenchimento sedimentar da bacia atinge espessuras superiores a 5.000 m (Figura 2) e os seus limites geológicos são definidos pelo Arco de Purus a oeste, pelo Arco de Gurupá a leste, pelo Escudo

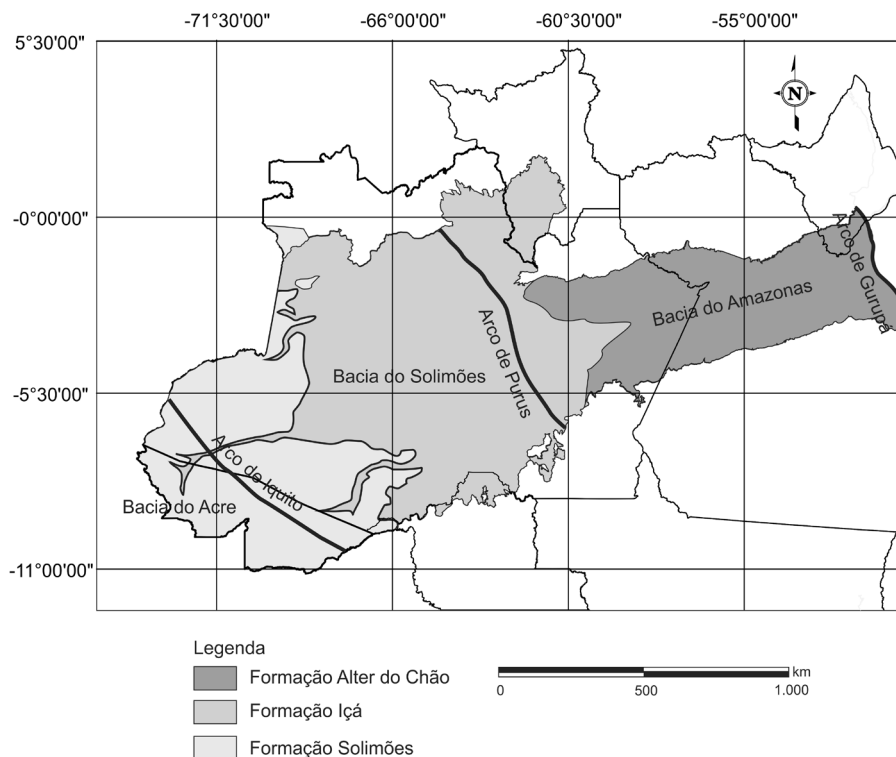


Figura 1. Áreas de afloramento das formações Içá, Solimões e Alter do Chão, nas bacias sedimentares do Solimões e do Amazonas.

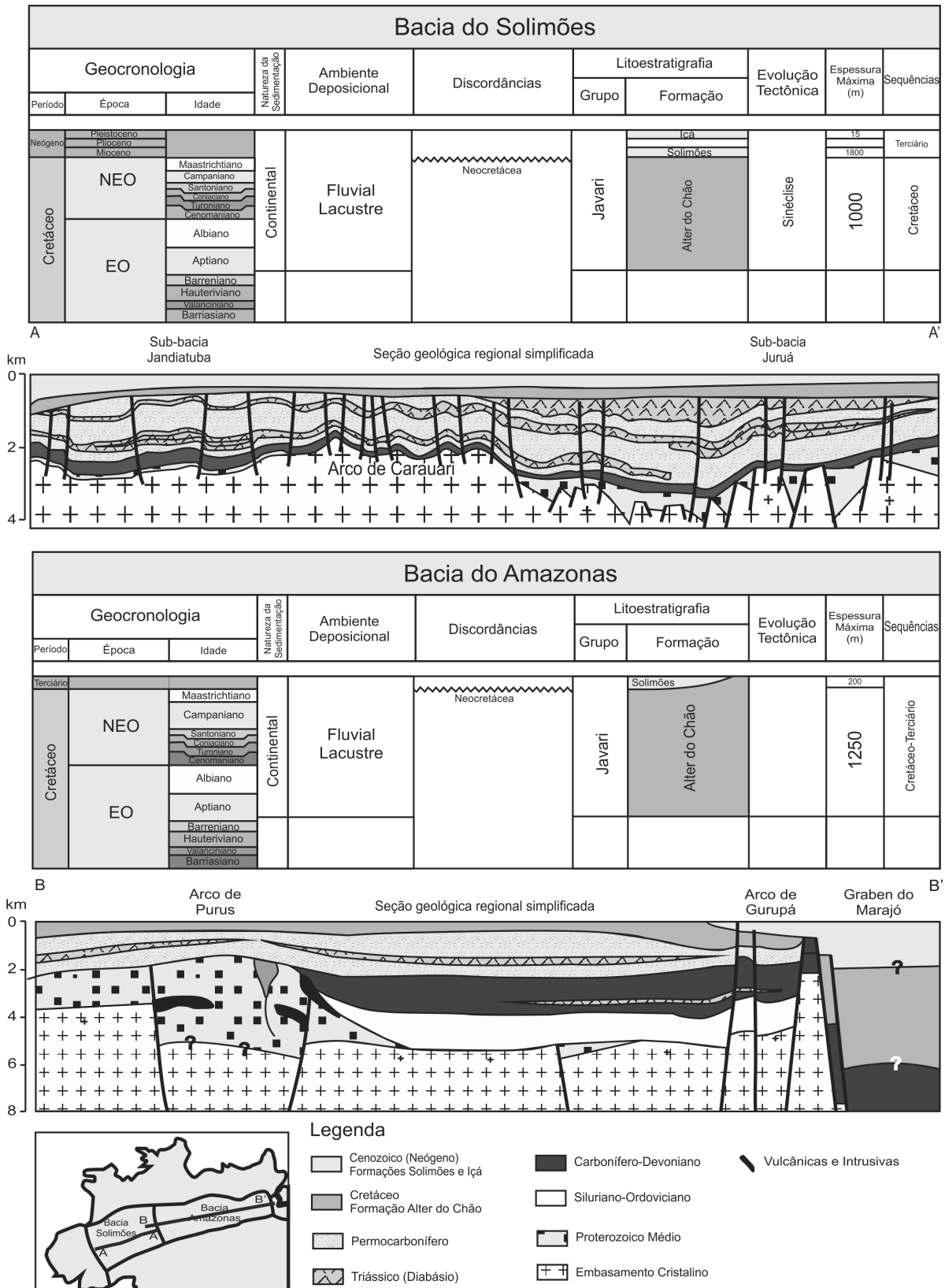


Figura 2. Colunas estratigráficas das bacias do Solimões (modificado de Eiras et al., 1994) e do Amazonas e suas respectivas seções geológicas regionais simplificadas (modificadas de Eiras, 1998; Wanderley Filho, Travassos, Alves, 2005).

das Guianas ao norte e pelo Escudo Brasil Central ao sul (Barata e Caputo, 2007). Segundo esses autores, a evolução da Bacia do Amazonas compreende as seqüências deposicionais Ordoviciano-Devoniana, Devoniana-Carbonífera, Permo-Carbonífera e, por fim, a seqüência Cretáceo-Terciário, que encerra a sedimentação nessa bacia; a seqüência Cretáceo-Terciário é inicialmente caracterizada pela deposição da Formação Alter do Chão, sob condições climáticas úmidas e sistema fluvial arenoso de alta energia. Com o soerguimento da Cadeia Andina, os rios cretáceos transformaram-se em lagos doces e rasos, alimentados por rios de baixa energia, responsáveis pela deposição da Formação Solimões, que grada para o topo da Formação Alter do Chão. O Magmatismo Penatecaua (Santos, 1978), representado pela intrusão de soleiras de diabásio, ocorreu durante o Triássico.

De acordo com as colunas estratigráficas e suas respectivas seções geológicas regionais simplificadas, mostradas na Figura 2, constata-se que, na Bacia do Solimões, a formação homônima alcança espessura máxima de 1.800 m, enquanto que na Bacia do Amazonas sua espessura máxima é de 200 m. No caso da Formação Alter do Chão, sua espessura máxima na Bacia do Solimões é de 1.000 m, enquanto que na Bacia do Amazonas pode atingir 1.250 m. Com relação à Formação Içá, na Bacia do Solimões, ela sobrepõe-se discordantemente à Formação Solimões, exibindo espessura média geral de 15 m (Maia et al., 1977).

Do ponto de vista das reservas de água subterrânea na região, nas bacias sedimentares do Solimões e do Amazonas as formações mais expressivas são Içá, Solimões e Alter do Chão, enfocadas neste trabalho.

A Formação Içá é constituída por arenitos finos a médios e siltitos, localmente com conglomerados argilosos de colorações amarelo avermelhadas (Nogueira et al., 2003); sobrepõe-se discordantemente à Formação Solimões. Nos estudos da Petrobras, a separação entre as Formações Içá e Solimões é feita principalmente com base em relações estruturais e possíveis discordâncias observadas em seções de detalhe, com apoio de poços.

A Formação Solimões consiste em uma sucessão de pelitos de cor cinza claro e cinza esverdeado, maciços e laminados, com linhetos intercalados em camadas de 2 a 10 m de espessura, e arenitos finos a grossos, subangulares a subarredondados; é muito rica em fósseis vegetais e animais, como troncos, folhas, ostracodes, escamas, dentes, entre outros (Caputo, 1984). As associações esporopólicas permitem o estabelecimento de três zonas palinológicas, correspondendo ao Mioceno, Mioceno/Plioceno e Plioceno, sugerindo uma deposição em ambiente fluvial meandrante fino e lagos formados por canais abandonados (Cruz, 1987).

A Formação Alter do Chão aflora essencialmente na Bacia do Amazonas, sendo composta por arenitos grossos, friáveis e de cores variadas, que recobrem os

estratos paleozoicos (Caputo, Rodrigues, Vasconcelos, 1971, 1972). Na Bacia do Solimões essa formação insere-se, em discordância angular, entre o Grupo Tefé e a Formação Solimões. Nessa bacia, devido à ausência de datações, a idade da parte superior da Formação Alter do Chão é estimada como sendo neocretácea, por correlação com a Bacia do Amazonas (Caputo, 1984). O ambiente de deposição é continental, com fácies de planície e leques aluviais. Algumas bandas ferrosas podem indicar períodos de formação de lateritas sob condições climáticas mais úmidas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram avaliados mapas geológicos e cartas estratigráficas das bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões, com ênfase para as Formações Alter do Chão, Içá e Solimões, detentoras das maiores reservas de água doce subterrânea, nessas bacias. Entre as diversas publicações consultadas nessa etapa destacaram-se Eiras et al. (1994), Eiras (1998), Wanderley Filho, Travassos e Alves (2005), Bahia (2007) e Barata e Caputo (2007).

A carência de informações sobre a hidrogeologia dos aquíferos das Formações Içá e Solimões foi minimizada com dados obtidos na BOGPM. Esses dados compreenderam 14 perfis construtivos, 19 perfis litológicos e 18 perfis geofísicos (resistência elétrica, de potencial espontâneo e de raios gama) de poços de captação de água, além de 25 perfis litológicos de poços de captação de petróleo. Esse conjunto de dados foi fornecido pela Petrobras.

Com relação às profundidades, os perfis dos poços de petróleo alcançavam até 465 m de profundidade, enquanto que os de abastecimento de água variavam entre 36 e 120 m.

No âmbito do projeto ECO-03 foram executadas 3 sondagens estratigráficas, com 300, 330 e 150 m de profundidade, coletando-se amostras de calha a cada metro perfurado, para obter informações mais detalhadas da seqüência litológica na região da BOGPM. Nessas amostras foram realizadas análises granulométricas e mineralógicas, objetivando uma caracterização mais precisa dos litotipos perfurados. Essas análises e os seus resultados foram apresentadas em um Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia da UFPA (Oliveira, 2010).

Após a análise dos dados mencionados nos parágrafos precedentes, foram selecionados perfis litológicos e geofísicos das sondagens estratigráficas e de poços com mais de 100 m de extensão, para elaboração de uma seção hidrogeológica esquemática representativa da província petrolífera de Urucu.

Com base nas informações obtidas, foram elaboradas seções geológicas simplificadas regionais das bacias do Solimões e do Amazonas, que permitiram visualizar as inter-relações entre as Formações Alter do Chão, Içá e Solimões, nessas

bacias, além de fundamentar estimativas preliminares de reservas de água subterrânea nessas formações.

No domínio da Hidrogeologia, os poucos trabalhos disponíveis para obtenção de dados referiam-se, sobretudo, aos Aquíferos da Formação Alter do Chão, destacando-se o estudo realizado por Tancredi (1996), na região de Santarém; entre as publicações pesquisadas apenas nesta foram encontrados resultados de testes de aquífero, possibilitando comparações com os parâmetros hidrodinâmicos obtidos na BOGPM, no projeto ECO-03. Informações complementares, principalmente relacionadas com as características litológicas e espessuras das camadas arenosas, bem como áreas de afloramento e qualidade da água, foram obtidas nos trabalhos de Cunha et al. (1994), Aguiar et al. (2002), Souza e Verma (2006) e ANA (2005).

Para os parâmetros hidrodinâmicos — coeficiente de armazenamento (S), condutividade hidráulica (K) e coeficiente de transmissividade (T) — do Sistema Alter do Chão foram considerados os valores obtidos de trabalho realizado em Santarém (PA), enquanto que para o Içá-Solimões foram adotados os parâmetros resultantes de dois testes de aquíferos realizados na BOGM, apresentados em Galvão et al. (2012). Nesses testes as curvas rebaixamento *versus* tempo não evidenciaram feições de recarga, compatíveis com as zonas confinadas do Sistema; desse modo, os resultados foram interpretados pelos métodos de Theis (1935) e Cooper-Jacob (1946), para aquíferos confinados não drenantes, em regime transiente.

Embora os perfis de poços e seções hidrogeológicas mostrem que o Sistema Aquífero Içá-Solimões é do tipo livre-confinado, essa caracterização foi confirmada com base nos resultados obtidos por Souza e Demétrio (2011) que observaram o comportamento hidráulico do sistema em níveis distintos. Para tanto, foram realizadas medidas de nível d'água em dois poços de pesquisa, cada um deles com outros dois pontos de observação associados, com profundidades diferentes.

Nas estimativas de reservas de água subterrânea para o Sistema Aquífero Içá-Solimões, considerou-se apenas a reserva permanente. Nos aquíferos confinados, a soma dos volumes acumulados por saturação (V_s) e sob pressão (V_p) constituem a reserva permanente, que representa o volume armazenado, passível de mobilização. Essa aproximação pode ser considerada como representativa da reserva total, posto que os níveis d'água subterrânea nos aquíferos confinados apenas respondem de maneira muito retardada, em ciclos de longo período.

Na prática, a retirada de água dos aquíferos confinados é feita apenas das reservas sob pressão, uma vez que o aquífero, na grande maioria dos casos, permanece totalmente saturado durante a exploração: se a captação de água rebaixar o nível potenciométrico de um aquífero confinado para uma posição abaixo da camada confinante este passará a ser livre. Para aquíferos confinados a reserva permanente é dada pela Equação 1.

$$V = V_p + V_s = (A_c \cdot S \cdot \Delta h) + (A \cdot \eta_e \cdot b) \quad (1)$$

Onde,

V: reserva permanente;

V_p : reserva confinada;

V_s : volume de saturação;

A: área de ocorrência do aquífero (L^2);

A_c : área sob confinamento (L^2);

η_e : porosidade efetiva (adimensional);

b: espessura média saturada (L);

S: coeficiente de armazenamento (adimensional);

Δh : carga piezométrica acima da base da camada confinante (L).

Para os aquíferos livres, a reserva permanente é representada apenas pelo volume de saturação (V_s).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Hidrogeologia

Sistema Aquífero Alter do Chão

As condições geológicas descritas anteriormente, associadas à análise de perfis de poços de captação de água e de poços de petróleo, permitiram concluir que na Bacia do Solimões as unidades aquíferas da Formação Alter do Chão são confinadas por espessas camadas argilosas da Formação Solimões. Nos trabalhos de Galvão et al. (2012) e Souza e Demétrio (2011), na região de Urucu, esse pacote argiloso apresenta espessura entre 150 a 180 m, tendo sido denominado Aquicludo Solimões, enquanto que a Formação Alter do Chão ocorre a partir dos 300 m de profundidade (Figura 3).

Tendo como base o mapa geológico da Figura 1, foi elaborado um perfil esquemático regional, englobando as duas bacias consideradas neste estudo (Figura 4), adotando-se para as formações Içá, Solimões e Alter do Chão as espessuras reconhecidas em trabalhos da Petrobras, para se estimar as suas porções não aflorantes. Com base nesse perfil, é possível observar que, entre as três formações, cerca de 50% da espessura total da bacia do Solimões são representados pela Formação Alter do Chão, sendo essa recoberta pelas Formações Içá/Solimões.

Embora a espessura da Formação Alter do Chão na bacia do Amazonas possa alcançar 1.250 m (Figura 2), na região de Urucu, as poucas informações obtidas no âmbito do projeto ECO-03, sobre a qualidade da água dessa formação, sugerem um teor de sais superior a 1.000 mg/L (Souza e Demétrio, 2011). Desse modo, nas estimativas de reservas de água subterrânea na bacia do Solimões, a Formação Alter do Chão não deve ser levada em conta, pelo menos até que estudos futuros

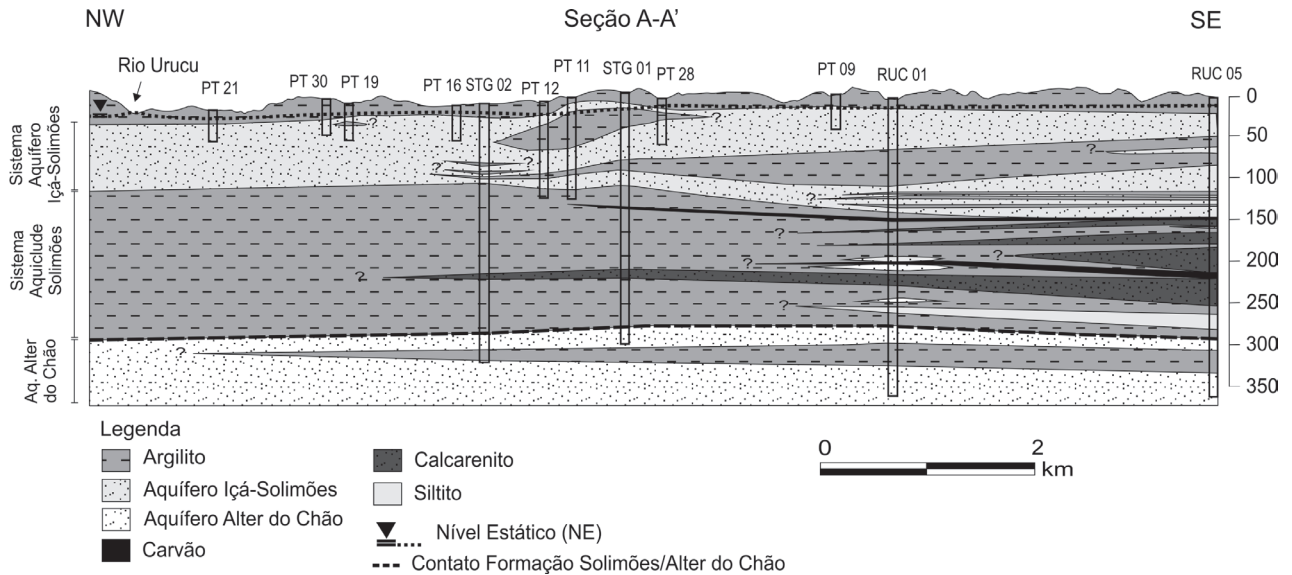


Figura 3. Seção hidrogeológica esquemática da província petrolífera de Urucu (Galvão et al., 2012).

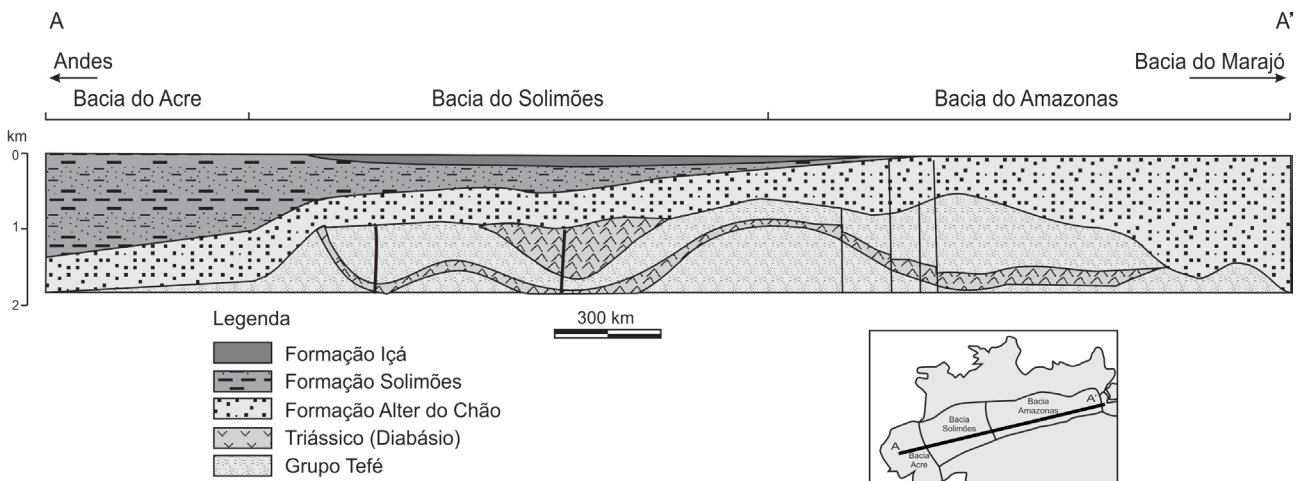


Figura 4. Seção esquemática da área, com espessuras aproximadas das formações Içá, Solimões e Alter do Chão.

caracterizem mais especificamente a qualidade da água nesse domínio hidrogeológico.

Com base nos dados disponíveis até o momento, nas estimativas de reservas para o Sistema Aquífero Alter do Chão, pode-se considerar uma área de ocorrência de cerca de 410.000 km² (Figura 1) e uma espessura média de 400 m (Figura 2). Admitindo-se uma porosidade efetiva de 20%, chega-se a um volume de saturação em torno de 33.000 km³. Embora não se tenha dados suficientes para estimar o volume sob pressão, sabe-se que este é bem menor do que o volume de saturação, uma vez que o sistema aquífero confinado possui normalmente valores iguais

ou menores que 10⁻⁴. Desse modo, para fins de estimativas de caráter regional considera-se válido adotar o volume de saturação como representativo da ordem de grandeza da reserva permanente do Sistema Aquífero Alter do Chão.

Os números referentes às estimativas de reserva permanente de água no Sistema Aquífero Alter do Chão apontam para uma grande possibilidade de uso dessas águas. Isto se deve, sobretudo, ao fato delas serem menos vulneráveis à contaminação do que as águas superficiais e com custo de captação/distribuição que, em geral, não chega a 50% da captação, tratamento e distribuição da água superficial (Tancredi, 1996). Entretanto, deve-se ter em mente que a

água retirada de aquíferos confinados praticamente não se renova, uma vez que a sua recarga é um processo extremamente lento. Também é fundamental considerar que as águas subterrâneas participam ativamente do ciclo hidrológico, contribuindo para manter o fluxo dos rios. Estudo realizado por Tancredi (1996) na região de Santarém (PA) mostrou que, localmente, a contribuição subterrânea para a descarga superficial chega a 46% da descarga do rio. Sem a contribuição da água proveniente dos aquíferos, os rios perenes podem se tornar intermitentes, gerando perdas ambientais e sociais incalculáveis. As águas dos aquíferos podem ainda descarregar na superfície dos terrenos, originando fontes, lagoas, alagados, entre outros. Caso ocorra a retirada excessiva de água subterrânea, essas áreas tendem a secar, causando desequilíbrios ecológicos.

A importância de se entender as relações entre os recursos hídricos, a biodiversidade e a complexidade do Bioma Amazônico foi bem ressaltada em um trabalho abordando o possível modelo de gestão de recursos hídricos que seria pertinente para a Amazônia, tendo a bacia do Rio Madeira como unidade de estudo (Masson, 2005).

No que se refere aos parâmetros hidrodinâmicos, os dados disponíveis como referência até agora são os obtidos por Tancredi (1996), para a região de Santarém. Os resultados obtidos por esse autor, em poços com profundidades variando de 13,5 a 167,1 m, indicaram T mínimo de $1,5 \times 10^{-3}$ m²/s e máximo de $9,1 \times 10^{-3}$ m²/s. Trata-se, portanto, de aquíferos com potencial de abastecimento municipal, industrial ou para irrigação, tendo em vista que transmissividades superiores a $1,4 \times 10^{-3}$ m²/s são indicadas para essas finalidades (Driscoll, 1987). Quanto ao S, o valor máximo obtido por Tancredi (1996) foi de $4,1 \times 10^{-4}$ e o mínimo de $3,3 \times 10^{-4}$; para os valores de K, o máximo e o mínimo foram de $2,1 \times 10^{-4}$ e $5,0 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente.

Sistema Aquífero Içá-Solimões

Ao contrário dos aquíferos do Sistema Alter do Chão, para os quais já existem alguns dados, mesmo que localizados, o Sistema Içá-Solimões é praticamente desconhecido. Desse modo, aqui são apresentados os resultados obtidos na região de Urucu, no projeto ECO-03.

Inicialmente, se faz necessário esclarecer a denominação Sistema Içá-Solimões assumida: a opção de acrescentar o termo Içá, ao já denominado Sistema Aquífero Solimões (ANA, 2005), se deve primeiramente ao fato de que na região de Urucu o primeiro aquífero ocorre em profundidades variando entre 20 (ou menos) e 70 m, zona onde pode se referir tanto a base da Formação Içá como os níveis superiores da Solimões. Assim, devido à dificuldade para se separar litologicamente essas duas formações, tendo em vista as semelhanças observadas entre ambas, considerou-se que o

intervalo de ocorrência desse primeiro aquífero insere-se, pelo menos em parte, no domínio da Formação Içá.

Além disso, esse aquífero superior é hidraulicamente conectado com outro, com topo e base em profundidades próximas de 50 e 120 m, respectivamente, pertencendo à Unidade Superior da Formação Solimões (Figura 3). Essa conexão ficou evidenciada em testes de aquífero com observação de níveis em poços captando individualmente esses dois aquíferos (Souza e Demétrio, 2011). Durante o bombeamento dos poços de pesquisa, constatou-se que os pontos de observação evidenciaram, também, rebaixamento do nível d'água, mostrando que não há separação hidráulica entre os aquíferos superior e inferior captados pelos poços e que o conjunto pode ser considerado um único sistema aquífero, do tipo livre-confinado, ou seja, o Içá-Solimões.

No aquífero inferior existem arenitos com boa porosidade e permeabilidade, com espessura variando de 45 a 50 m, passíveis de serem captados por meio de poços tubulares (Figura 3). É nesse aquífero que estão localizadas as seções de filtros da maioria dos poços tubulares utilizados para o abastecimento de água na região de Urucu. Entretanto, o aquífero superior tem uma grande importância para a disponibilidade de água na região, pois a sua eventual contaminação poderá afetar também o aquífero mais explotado, tendo em vista a conexão hidráulica entre esses dois reservatórios de água subterrânea. Esse aspecto deve ser devidamente considerado pelos órgãos gestores de recursos hídricos.

A qualidade das águas nesse sistema aquífero apresenta semelhança hidrogeoquímica com a do Sistema Aquífero Alter do Chão, com baixos teores de cátions e ânions; na maioria dos poços dessa região, as águas são classificadas como bicarbonatadas-sódicas, com teores de Na⁺ e HCO₃⁻ geralmente inferiores a 7 e 30 mg/L; em alguns poços, entretanto, os teores de K⁺ são expressivos, com máximo de 5,5 mg/L. As baixas concentrações iônicas se refletem nos valores de condutividade elétrica, com mínimo próximo de 12 µS/cm e máximo em torno de 100 µS/cm. Em todos os poços estudados nessa área, a água é ácida, predominando valores de pH entre 5 e 6 (Souza e Demétrio, 2011).

Em Urucu, a reserva permanente (V) (Equação 1) para o Sistema Aquífero Içá-Solimões foi determinada considerando-se a área sob confinamento (Ac) de 40,5 km², correspondendo àquela com informações mais representativas. Nessa área se encontram o aeroporto, os alojamentos e o polo industrial Arara, abrigando a quase totalidade dos poços de captação de água instalados na BOGPM e, por conseguinte, a maior parte das informações a respeito do aquífero estudado. O valor adotado para o S foi 10^{-4} , com base na média dos valores determinados em testes de aquífero; para a carga hidráulica acima da base da camada confinante (Δh) o valor médio considerado foi de 35 m, estimado com base na profundidade do topo do aquífero confinado e de informações

acerca da potenciometria da região. A partir desses dados, a V_p estimada foi de 141.750 m^3 ($1,418 \times 10^{-4} \text{ km}^3$).

No cálculo do V_s , a área de ocorrência do aquífero (A) foi também considerada de $40,5 \text{ km}^2$. Para a porosidade efetiva (η_e) adotou-se 10%, valor correspondente a areias argilosas, predominante nos aquíferos identificados; a espessura saturada (b) considerada foi de 50 m, média dos valores registrados nos perfis. Desse modo, a reserva saturada (V_s) obtida foi de $202.510.000 \text{ m}^3$ ($0,20251 \text{ km}^3$).

Somando-se as parcelas de V_s e V_p , a reserva permanente (V) calculada para a área anteriormente especificada foi de $202.651.750 \text{ m}^3$ ($0,20264 \text{ km}^3$).

Extrapolando o cálculo para toda a área de afloramento na Bacia do Solimões, que é de 948.600 km^2 (Barata e Caputo, 2007) (Figura 1), a reserva total estimada para os aquíferos Içá-Solimões é de 7.200 km^3 . Comparando-a com aquela que foi admitida para o Sistema Aquífero Alter do Chão, em torno de 33.000 km^3 , trata-se de uma reserva consideravelmente menos expressiva, equivalente a cerca de 22% da estimada para o Sistema Aquífero Alter do Chão.

Os valores médios observados para os parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Içá-Solimões em Urucu foram $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ para T e 5×10^{-4} para S. Considerando uma espessura (b) do aquífero de 50 m, o valor médio de K ($K = T/b$) foi de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (Galvão et al., 2012). Comparando-se esses valores com aqueles obtidos por Tancredi (1996) para os aquíferos da Formação Alter do Chão, no município de Santarém (T entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $9,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, S de $4,1 \times 10^{-4}$ a $3,3 \times 10^{-4}$, e K de $2,1 \times 10^{-4}$ a $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) constata-se que no Sistema Içá-Solimões os parâmetros hidrodinâmicos têm ordens de grandezas compatíveis com os valores mínimos obtidos no Sistema Alter do Chão, em Santarém.

CONCLUSÕES

Na Região Hidrográfica Amazônica as pesquisas sobre águas subterrâneas são incipientes e concentradas nos aquíferos da Formação Alter do Chão, havendo uma carência quase absoluta de informações a respeito da hidrogeologia das Formações Içá e Solimões.

A associação do mapa geológico das bacias do Solimões e do Amazonas com as espessuras não aflorantes reconhecidas para as Formações Alter do Chão, Solimões e Içá mostra que cerca de 50% da espessura total dessas formações na bacia do Solimões são representados pela Formação Alter do Chão, recoberta pelas Formações Içá/Solimões.

Na Bacia do Solimões, os aquíferos da Formação Alter do Chão são confinados pelo Aquicludo Solimões, cuja espessura na região de Urucu varia de 150 a 180 m.

As poucas informações obtidas no âmbito do projeto ECO-03 na região de Urucu referentes à qualidade da água da Formação Alter do Chão, a partir dos 300 m de

profundidade, sugerem um teor de sais superior a 1.000 mg/L . Desse modo, nas estimativas de reservas de água subterrânea na bacia do Solimões, a Formação Alter do Chão não deve ser levada em conta, pelo menos até que estudos futuros caracterizem mais especificamente a qualidade da água nesse domínio hidrogeológico.

Na Bacia do Amazonas, embora a espessura da Formação Alter do Chão alcance 1.250 m, nos aquíferos confinados mais profundos a água pode apresentar teor de sais elevado, como evidenciado na bacia do Solimões.

Na Bacia do Amazonas, a reserva estimada para o Sistema Aquífero Alter do Chão é em torno de 33.000 km^3 . Estudos da qualidade da água dos aquíferos mais profundos dessa formação poderão demonstrar valores diferentes dessa estimativa.

Estudos realizados no projeto ECO-03 caracterizaram o Sistema Aquífero Içá-Solimões na região de Urucu, podendo servir de base para pesquisas hidrogeológicas regionais, na bacia do Solimões. Na região em apreço, esse sistema é do tipo livre-confinado, constituído por dois aquíferos hidráulicamente conectados: o mais superficial com topo e base em profundidades próximas de 20 e 70 m, respectivamente, e o mais profundo com intervalo de profundidades que varia de 80 a 130 m.

Com relação à qualidade das águas, os sistemas aquíferos Alter do Chão e Içá-Solimões, apresentam semelhança hidrogeoquímica, com baixos teores de cátions e ânions, predominando Na^+ , K^+ e HCO_3^- , cujos teores mais elevados obtidos em Urucu em geral não ultrapassam 7,0, 5,5 e 30 mg/L, respectivamente. Em todos os poços estudados nessa área, a água é ácida, predominando valores de pH entre 5 e 6, enquanto que, para a condutividade elétrica, o mínimo situa-se próximo de $12 \mu\text{S/cm}$ e o máximo em torno de $100 \mu\text{S/cm}$.

Os parâmetros hidrodinâmicos médios para os aquíferos do Sistema Içá-Solimões foram $T = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 5 \times 10^{-4}$ e $K = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, de ordens de grandezas similares aos valores mínimos obtidos no Sistema Alter do Chão, em Santarém.

Para o Sistema Içá-Solimões, com uma área de afloramento de aproximadamente 948.600 km^2 , a reserva total estimada é de 7.200 km^3 , consideravelmente menos expressiva e equivalente a cerca de 22% da obtida para o Sistema Aquífero Alter do Chão.

AGRADECIMENTOS

À Petrobras pelo apoio a todas as atividades do projeto Caracterização Hidrogeológica para o Uso Sustentável da Água Subterrânea na BOGPM, sobretudo ao geofísico Marcus Paulus Martins Baessa, pelo profissionalismo e relação de amizade e confiança com toda a equipe que participou dos trabalhos, durante a sua fase de coordenador do projeto, pelo CENPES.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil*. Coordenação Geral: João Gilberto Lotufo Conejo. Coordenação Executiva: Marcelo Pires da Costa, José Luiz Gomes Zoby. Brasília. 2005. 80 p.
- AGUIAR, C. J. B.; HORBE, M. A.; ROSA FILHO, S. F.; LOPES, E. S.; MOURA, U. F.; ANDRADE, N. M.; DIÓGENES, H. S. *Carta hidrogeológica da cidade de Manaus*. CPRM-AM Manaus. 2002.
- BAHIA, R. B. C. *Evolução tectonossedimentar da bacia dos Parecis - Amazônia*. Ouro Preto: UFOP, 2007. 149 p. (Contribuição às ciências da terra. Série D, v. 18, n. 26). Originalmente apresentada como tese de Doutorado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.
- BARATA, C. F.; CAPUTO, M. V. Geologia do petróleo da Bacia do Solimões. 2007. “O Estado da Arte”, 4º DPETRO – Campinas, SP - ABPG.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Caderno da Região Hidrográfica Amazônica*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2006. 124 p.
- CAPUTO, M. V. *Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basin of Brazil*. 1984. Tese (Doutorado) - University of California, p. 163-170.
- CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: Histórico e Atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972. Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1972. v. 3, p. 35-46.
- CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. *Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas*. Belém: Petrobras, 1971. Relatório interno.
- COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formational constants and summarizing well field history. *Transactions American Geophysical Union*. v. 27, n. 4, p. 526-634, 1946.
- CRUZ, N. M. C. *Quitinozóários da Bacia do Solimões, Brasil*. Belém: Convênio CPRM/Petrobras, 1987. Relatório interno.
- CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, n. 1, p. 47-55, 1984.
- DRISCOLL, G. *Groundwater and Wells*. 2.ed. St. Paul: Johnson Division, 1987. 1088 p.
- EIRAS, J. F. Tectônica, sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. In: TAHA, M. *Searching for oil and gas in the land of giants: the search magazine*. Edição Especial sobre o Brasil. Argentina: Schlumberger, 1998.
- EIRAS, J. F.; BECKER, C. R.; SOUZA, E. M.; GONZAGA, J. E. F.; SILVA, L. M.; DANIEL, L. M. F.; MATSUDA, N. S.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, n. 1, p. 17-45, 1994.
- GALVÃO, P. H. F.; DEMÉTRIO, J. G. A.; SOUZA, E. L.; PINHEIRO, C. S. S.; BAESSA, M. P. M. Hidrogeologia e Geometria dos Aquíferos das Formações Cretáceas Içá e Solimões, Bacia Paleozóica do Solimões, na Região de Urucu/AM. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, suppl 1, p. 141-152, 2012.
- MAIA, R. G.; GODOY, H. K.; IAMAGUTTI, H. S.; MOURA, P. A.; COSTA, F. S. F.; HOLANDA, M. A.; COSTA, J. A. *Projeto Carvão no Alto Solimões*. Manaus: Amazonas, 1977, 137p. Relatório Interno.
- MASSON, C. G. M. J. *Subsídios para uma gestão dos recursos hídricos na Amazônia: estudo de caso na Bacia do Rio Madeira*. 2005. 258p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NOGUEIRA, A. C. R.; ARAI, M.; HORBE A. M.; SILVEIRA, R. R.; SILVA, J. S. A Influência marinha nos depósitos da Formação Solimões na região de Coari (AM): registro da transgressão miocênica na Amazônia ocidental. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 8., 2003. Manaus. *Resumos expandidos...* Manaus: SBG, 2003.
- OLIVEIRA, K. S. *Fatores responsáveis pela ocorrência da sílica na água de aquíferos da Formação Solimões, em Urucu-AM com ênfase para a composição mineralógica*. 2010. 98p. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará.
- SANTOS, J. O. S. Magmatismo Básico-Alcalino no Proterozóico Superior da Plataforma Amazônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. 1978. Recife. *Anais...* Recife: SBG, 1978. v. 3, p. 1309-1322.
- SILVEIRA, R. R. *Cronoestratigrafia e interpretação paleoambiental de depósitos miocenos da Formação Solimões, Região de Coari, AM*. 2005. 93 p. Dissertação

(Mestrado) - Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

SOUZA, E. L.; DEMÉTRIO, J. G. A. *Caracterização Hidrogeológica da Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM)*. Convênio UFPA/Petrobras, 2011. Relatório interno. Manaus.

SOUZA, L. S. B.; VERMA, O. P. Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus/AM (zonas norte e leste) através de perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 19, n. 1, p. 111-127, 2006.

TANCREDI, A. C. F. N. S. *Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: fundamentos para uso e proteção*. 1996. 154 p. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e

Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions American Geophysical Union*, v. 16, p. 519-524, 1935.

VASCONCELOS, T. A. *Estudos físico-químicos e microbiológicos de águas de poços tubulares da cidade de Manaus*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S.; ALVES, D. B. O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas - herói ou vilão. *Boletim Geociências da Petrobras*, v. 14, n. 1, p. 177-184, 2005.