

**TÉCNICAS ISOTÓPICAS APLICADAS EM ESTUDOS
HIDROGEOLÓGICOS NO MUNICÍPIO DE ARAGUARI, MG**

Minardi, P.S.P.¹; Velásquez, L.N.M.²; Bomtempo, V.L.¹; Cota, S.D.S.¹; Rodrigues, P.C.H.¹

Resumo – Isótopos ambientais (estáveis, ^2H e ^{18}O , e trítio ambiental) foram analisados para permitir a distinção entre águas dos aquíferos Bauru e Serra Geral em Araguari, a determinação de sua origem, processos de recarga e tempo de trânsito (idade). As análises físico-químicas permitiram identificar as águas do Aquífero Bauru como pouco mineralizadas e ácidas a moderadamente ácidas, enquanto as águas do aquífero Serra Geral apresentam condutividade elétrica mais elevada, tendendo a ser mais neutras. A relação de ^{18}O e D mostra que as águas subterrâneas se assemelham à reta mundial de águas meteóricas, com diferença verificada no excesso de deutério. Observou-se a ocorrência do efeito de altitude na concentração dos isótopos estáveis. O tempo de renovação mostrou que as águas do aquífero Bauru são relativamente jovens, com amostras mais antigas em áreas de recarga indicando a possibilidade da extração de águas mais profundas como resultado de exploração intensa.

Abstract – Environmental isotopes (stable, ^2H e ^{18}O , and tritium) were analyzed in order to distinguish samples from Bauru and Serra Geral aquifers in Araguari and the determination of its origin, recharge processes and transit time (water age). Physical-chemical analysis allowed to identify the Bauru aquifer waters as being less mineralized and acid to moderately acid, while Serra Geral aquifer water samples present higher electrical conductivity and have a more neutral characteristic. ^{18}O e D relation in groundwater samples has shown to be related to the global meteoric water line, with exception of the deuterium excess. Altitude effect on stable isotope concentration was identified. Transit time has shown that the Bauru aquifer waters are relatively young and that older samples in recharge areas indicate the possible extraction of deeper waters as result of intense exploitation.

Palavras-Chave – Aquíferos, Isótopos ambientais, Traçadores.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos 50 anos, a ciência nuclear vem desenvolvendo um conjunto de ferramentas analíticas e experimentais, conhecidas como técnicas isotópicas, que podem contribuir para a melhoria do manejo e da gestão dos recursos hídricos. Esse campo de trabalho é claramente interdisciplinar, envolvendo muitas disciplinas das ciências da Terra e das ciências naturais, dentre as quais se destacam a Hidrologia, Hidrogeologia e Geologia, bem como a Física, Química e Biologia. Ela inclui tanto a utilização de radioisótopos artificiais quanto a utilização de isótopos radioativos e estáveis que ocorrem naturalmente, também conhecidos como isótopos ambientais. Em ambos os casos, esses isótopos

¹ Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Caixa Postal 941. CEP:30.161-970. BH/MG, Brasil. pspm@cdtn.br

² Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, 6627. CEP: 31.270-901. BH/MG, Brasil.
menegase@dedalus.lcc.ufmg.br

A área estudada no município restringe-se à porção que compreende a seqüência de rochas juro-cretácicas da Bacia do Paraná numa extensão de 1.405,5km² (51% do município), compreendidas pelos elúvios silto-arenosos da Formação Marília (Grupo Bauru) e basaltos da Formação Serra Geral (Grupo São Bento). É nessa porção onde vive a maior parte da população total, estimada em 108.672 habitantes (IBGE, 2005), sendo 91% urbana. O restante do município é constituído de rochas pré-cambrianas granitóides do Complexo gnáissico-granulítico e de rochas xistosas do Grupo Araxá (Dardenne, 2000), Figura 2. Também estão presentes coberturas detrito-lateríticas coluvionares e eluvionares, e depósitos aluviais recentes.

As rochas basálticas da Formação Serra Geral, altamente fraturadas e em forma de disjunções colunares, com espessuras de 200 a 250m, consistem no segundo aquífero em importância para o abastecimento público e para as atividades agropecuárias e industriais. Atualmente, o aquífero mais explorado é o Bauru (Formação Marília), que é constituído por uma camada de conglomerados saturados de 5 a 6m de espessura na sua base, seguido de uma camada de arenitos friáveis silto-argilosos com espessura total (conjuntamente com a cobertura terciária laterizada eluvio-coluvional) entre 50 e 60m, com área total de 830km² (30% do município) e altitudes médias de 880m. A alta pluviosidade, 1.589,4mm (IBGE, 2000), o relevo suave da superfície superior e a textura do solo poroso, laterítico, desenvolvido sobre as rochas areníticas e basálticas, favorecem a recarga na região.

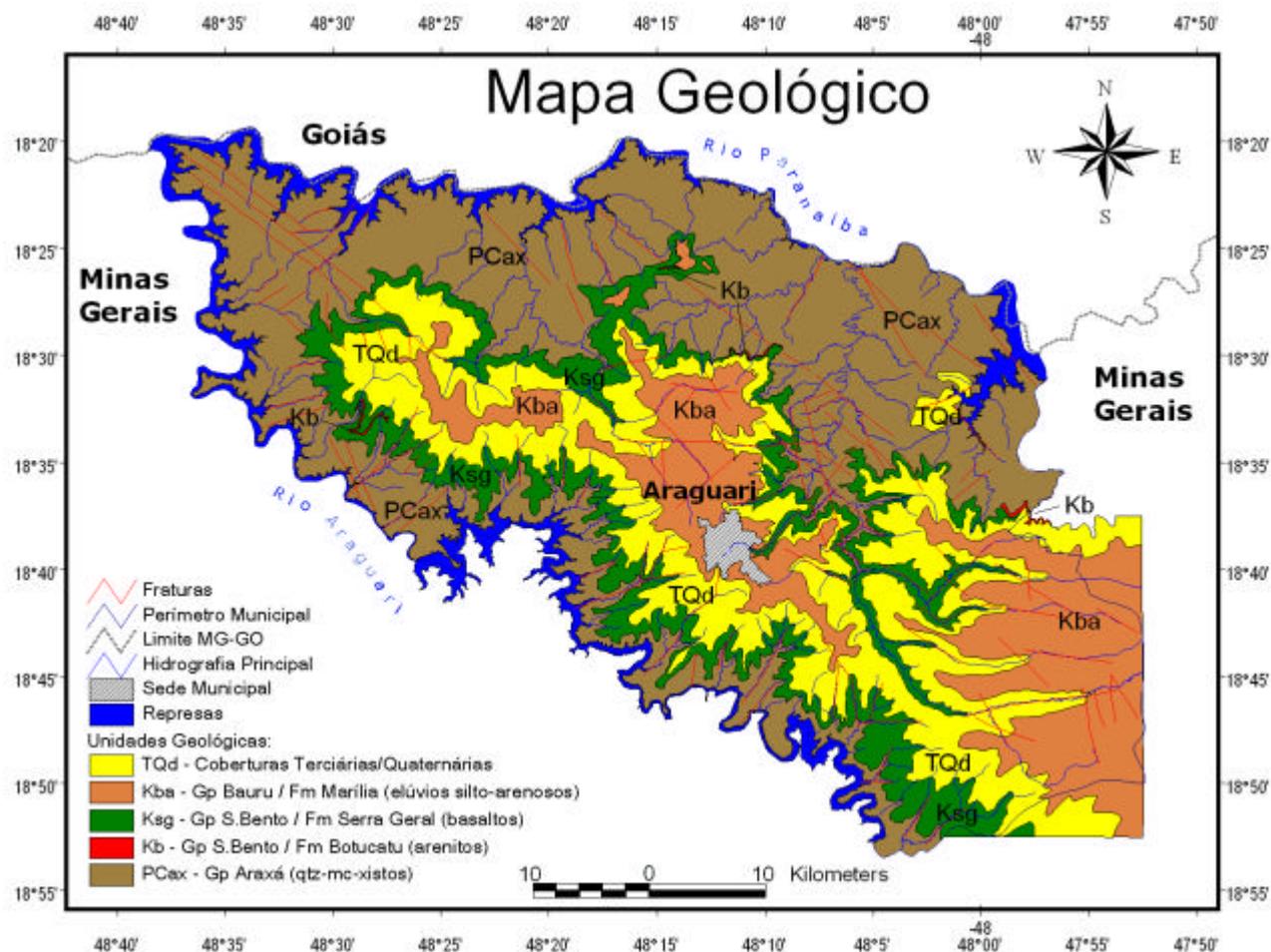


Figura 2. Mapa geológico do município de Araguari.

Tomando-se os dados da carga potencial hidráulica de 85 poços profundos e de 130 nascentes no aquífero Bauru, foi construído o mapa potenciométrico desse aquífero (Figura 3). A configuração da superfície potenciométrica mostra um grande divisor de água subterrânea ao longo de toda a chapada, região essa que constitui a zona de recarga direta. Destacam-se duas importantes áreas de recarga: uma situada na cabeceira do córrego Amanhece, a norte do município, e outra na porção central, junto à cabeceira do ribeirão Araras, onde está situada a parte norte da cidade de Araguari (ver localização dos corpos d'água na Figura 4).

Este trabalho apresenta os resultados relacionados com a hidroquímica, origem e tempo médio de trânsito das águas locais obtidos durante o desenvolvimento do Projeto. Isótopos ambientais (estáveis, ^2H e ^{18}O , e trítio ambiental) foram analisados para permitir a distinção entre águas dos aquíferos Bauru e Serra Geral, origem e processos de recarga e determinação de tempo de trânsito (idade). As campanhas de coleta de amostras de água para análises isotópicas ocorreram simultaneamente às campanhas para coleta de amostras para análises físico-químicas convencionais, devido ao caráter complementar entre as duas técnicas. Foram coletadas 51 amostras para análises isotópicas em duas campanhas (outubro/2004 e novembro/2005), antes das chuvas, em poços rasos e profundos (nas duas unidades hidrogeológicas), nascentes e corpos d'água superficiais, segundo localização indicada na Figura 4. As análises de trítio ambiental foram realizadas nos laboratórios do CDTN e as análises de isótopos estáveis foram realizadas nos laboratórios da Comissão Chilena de Energia Nuclear, em Santiago.

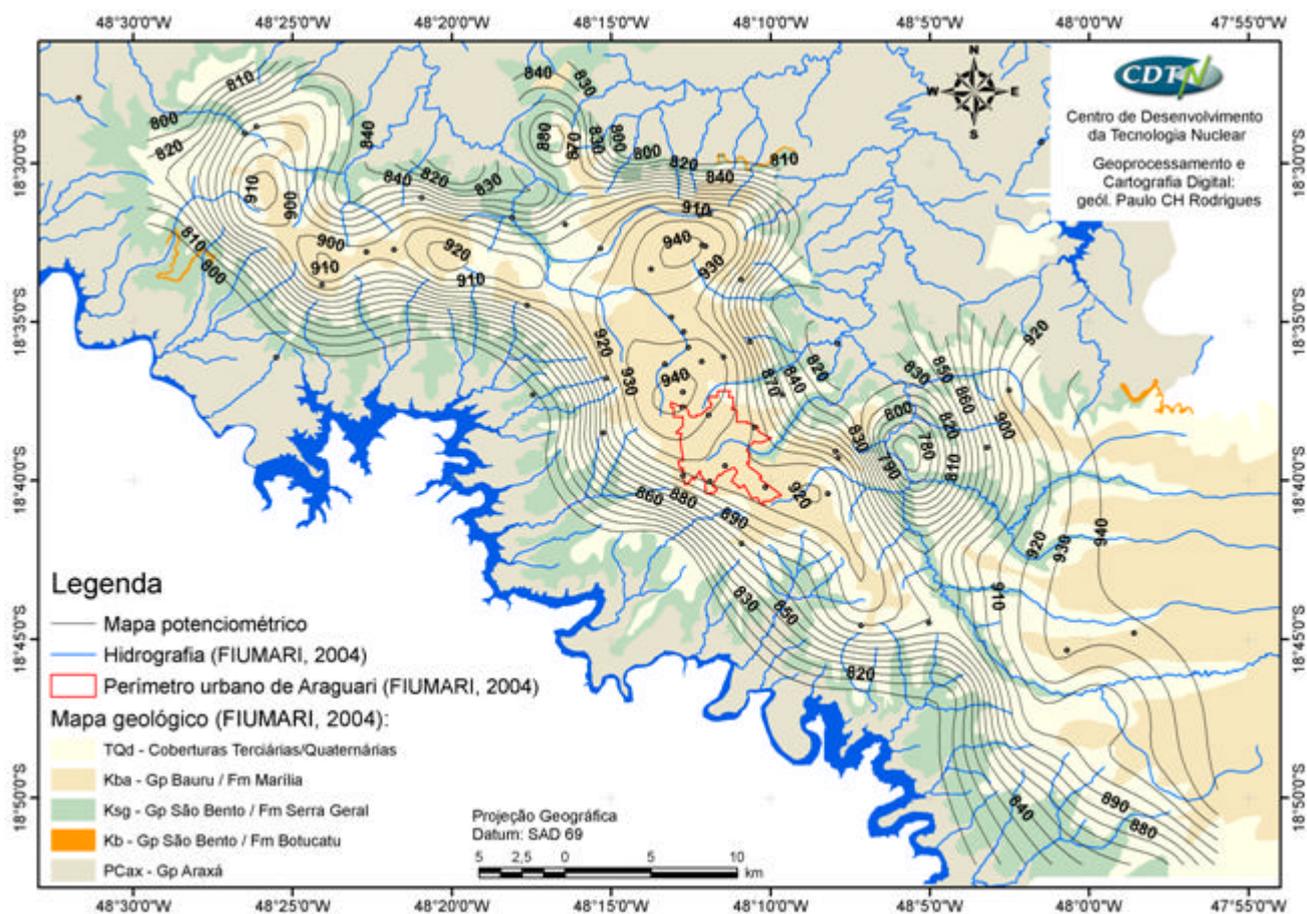


Figura 3. Mapa potenciométrico do aquífero Bauru em Araguari.

A interpretação dos valores de concentração de trítio exige o conhecimento das concentrações desse isótopo nas precipitações ocorridas na área do estudo após o início dos testes nucleares na atmosfera. Caso sejam inexistentes, essas concentrações podem ser deduzidas a partir de correlações com concentrações obtidas da rede mundial de monitoramento estabelecida pela IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica / Rede GNIP - Global Network of Isotopes in Precipitation). No caso de Araguari, a série histórica da estação de Brasília foi completada através de correlação com os dados de Kaitoke, Nova Zelândia. Foi utilizado o modelo de renovação exponencial ou de mistura total para estimar o tempo de renovação das amostras dos aquíferos.

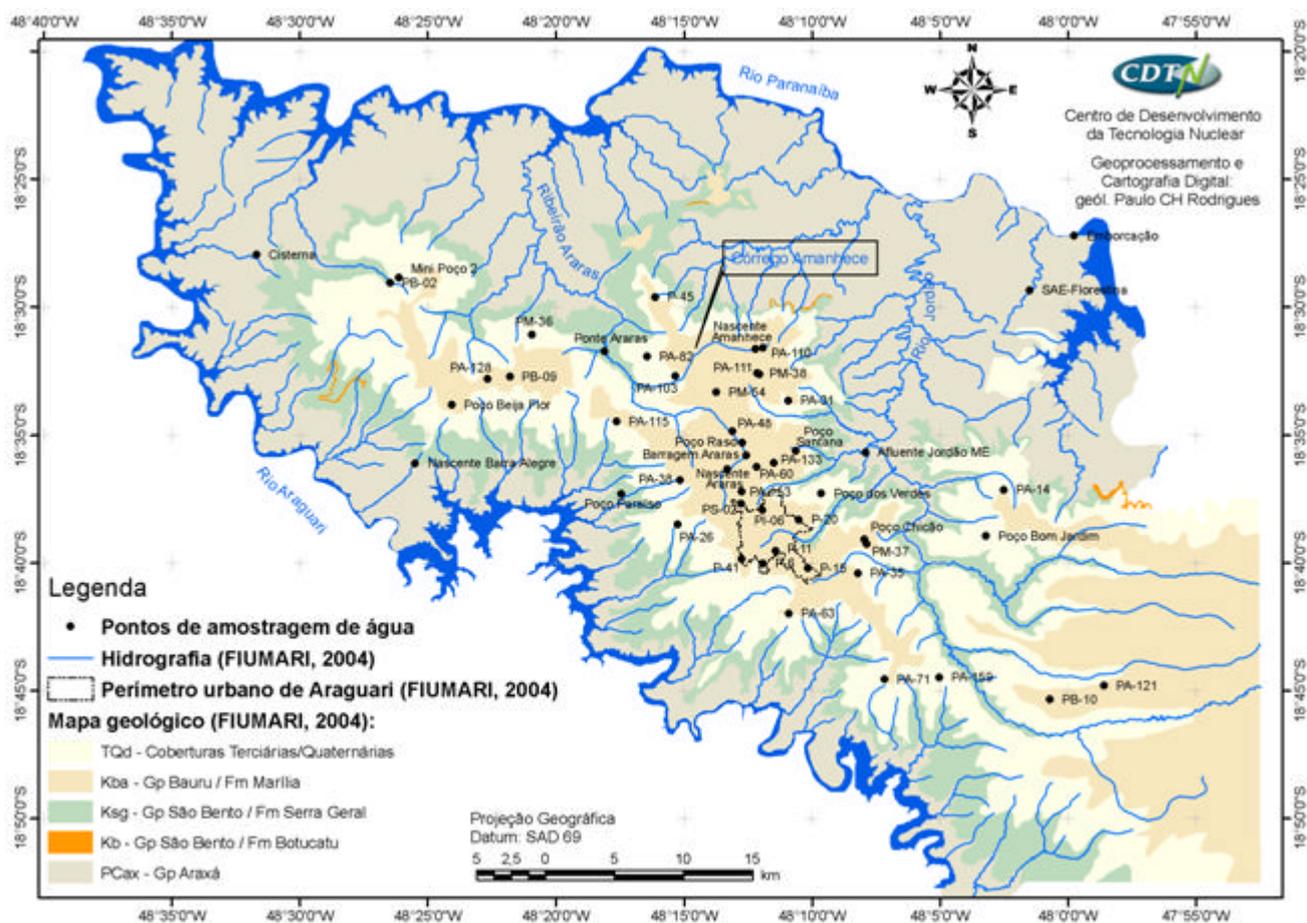


Figura 4. Mapa de localização dos pontos de água amostrados.

HIDROQUÍMICA

As análises físico-químicas das amostras de água apresentaram valores de pH entre 4,60 e 5,88, para a maioria das águas subterrâneas dos poços rasos e profundos do aquífero Bauru indicando águas ácidas a moderadamente ácidas. São exceções claras as águas de dois poços e de uma nascente da Formação Serra Geral, que apresentam pH em torno de 7.

De modo geral, a condutividade elétrica das águas subterrâneas é muito baixa, com valores da ordem de $10\mu\text{S}/\text{cm}$ ou menos, correspondendo em sua grande maioria a amostras provenientes do aquífero Bauru. Por outro lado, as amostras de água provenientes do basalto apresentam valores de condutividade elétrica bastante superiores, entre 133 e $303\mu\text{S}/\text{cm}$. Valores de condutividade situados entre esses extremos correspondem a uma mistura de águas desses dois aquíferos. A baixa condutividade elétrica resulta da pequena concentração de sólidos totais dissolvidos, cujos valores raramente ultrapassam $7\text{mg}/\text{L}$ para águas do Aquífero Bauru. Já para as águas do basalto, os sólidos dissolvidos são

muito mais elevados, podendo alcançar valores superiores a 100mg/L. Levando-se em conta as medições de condutividade elétrica e de sólidos totais dissolvidos realizadas em campo, as águas amostradas podem ser consideradas como sendo águas bicarbonatadas.

Os teores de cálcio, sódio, potássio, magnésio e manganês encontram-se quase sempre abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado (Absorção Atômica) de 0,10mg/L. O reduzido teor de sódio torna as águas adequadas para utilização em lavouras, pois essas não tendem a reduzir a permeabilidade do solo. A grande maioria das amostras analisadas apresentou teores de cloreto abaixo do limite de detecção de 0,25mg/L e todas as amostras apresentaram teor de sulfatos abaixo do limite de detecção de 0,25mg/L. Algumas águas amostradas apresentaram teores de ferro total que variam desde 0,14 até 1,6mg/L, embora a maioria delas apresente teores abaixo do limite de detecção de 0,10mg/L. Esses teores, apesar de ainda estarem dentro dos limites aceitáveis para consumo em geral, remetem a anomalias nos teores de ferro já detectadas em trabalhos anteriores.

Os nitratos encontram-se virtualmente ausentes, com valores muito abaixo do valor máximo permitido de 50mg/L. Apesar de ser um composto favorável à agricultura, altas concentrações de nitrato são prejudiciais à saúde humana e podem ser indicativas de contaminação por atividade antrópica. O teor médio de sílica encontrado foi de 7,1mg/L e o máximo, de 42 mg/L, valores pequenos que não prejudicam a saúde nem a agricultura.

ISÓTOPOS ESTÁVEIS NO ESTUDO DE ORIGEM

Na Figura 5, os resultados obtidos para os isótopos estáveis nas amostras coletadas nas duas campanhas são apresentados na forma do diagrama δD - $\delta^{18}O$, que reflete o fracionamento isotópico relativo das duas espécies moleculares pesadas da água e que permite uma visão geral da composição isotópica das águas locais. A Figura 6 mostra uma ampliação da área assinalada na Figura 5 para facilitar o reconhecimento dos pontos amostrados.

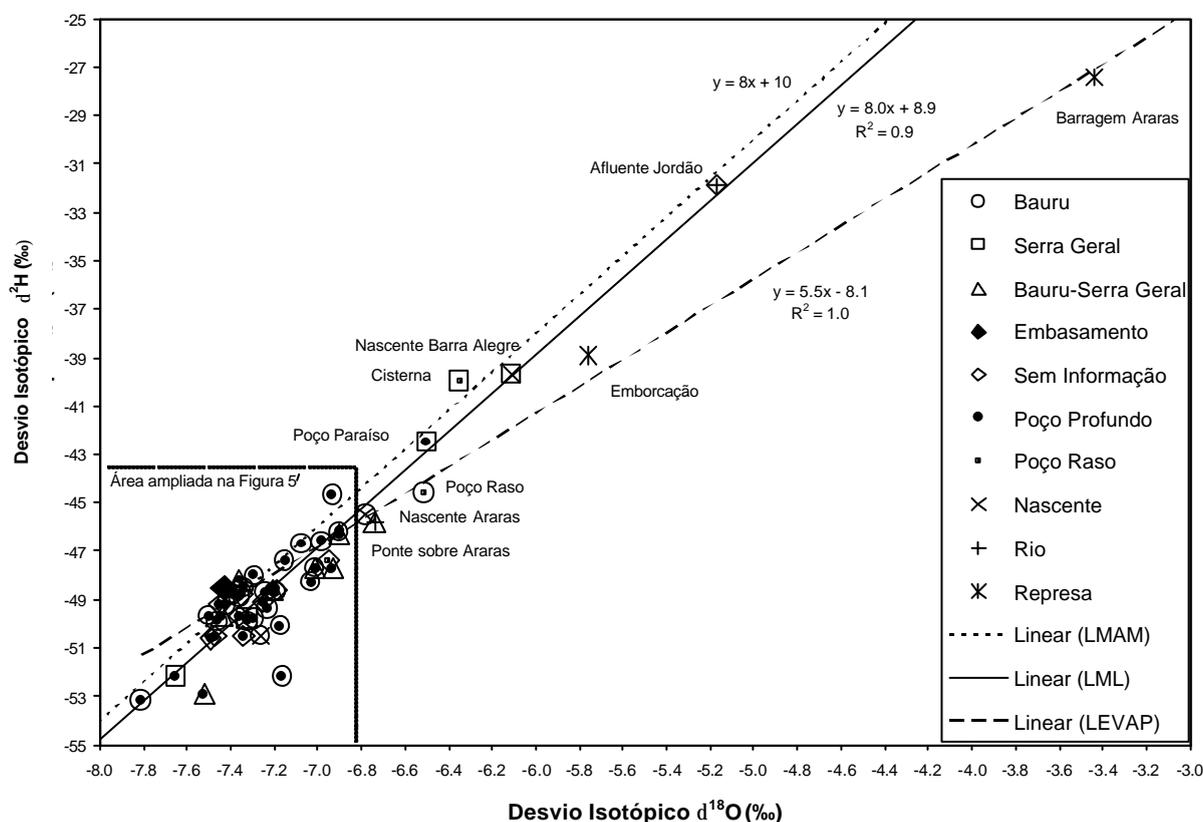


Figura 5. Diagrama δ^2H - $\delta^{18}O$ para todas as amostras de água analisadas.

Como se pode observar na Figura 5, existe um conjunto de pontos que se situam alinhados segundo uma linha de evaporação que obedece à seguinte equação: $\delta^2\text{H} = 5,5 \delta^{18}\text{O} - 8,1$ (Linear – LEVAP). Os pontos que definem essa reta correspondem a duas barragens (Barragem Araras e Emborcação), uma nascente (Nascente Araras), um mini-poço (Poço Raso) e um rio (Ponte sobre o ribeirão Araras).

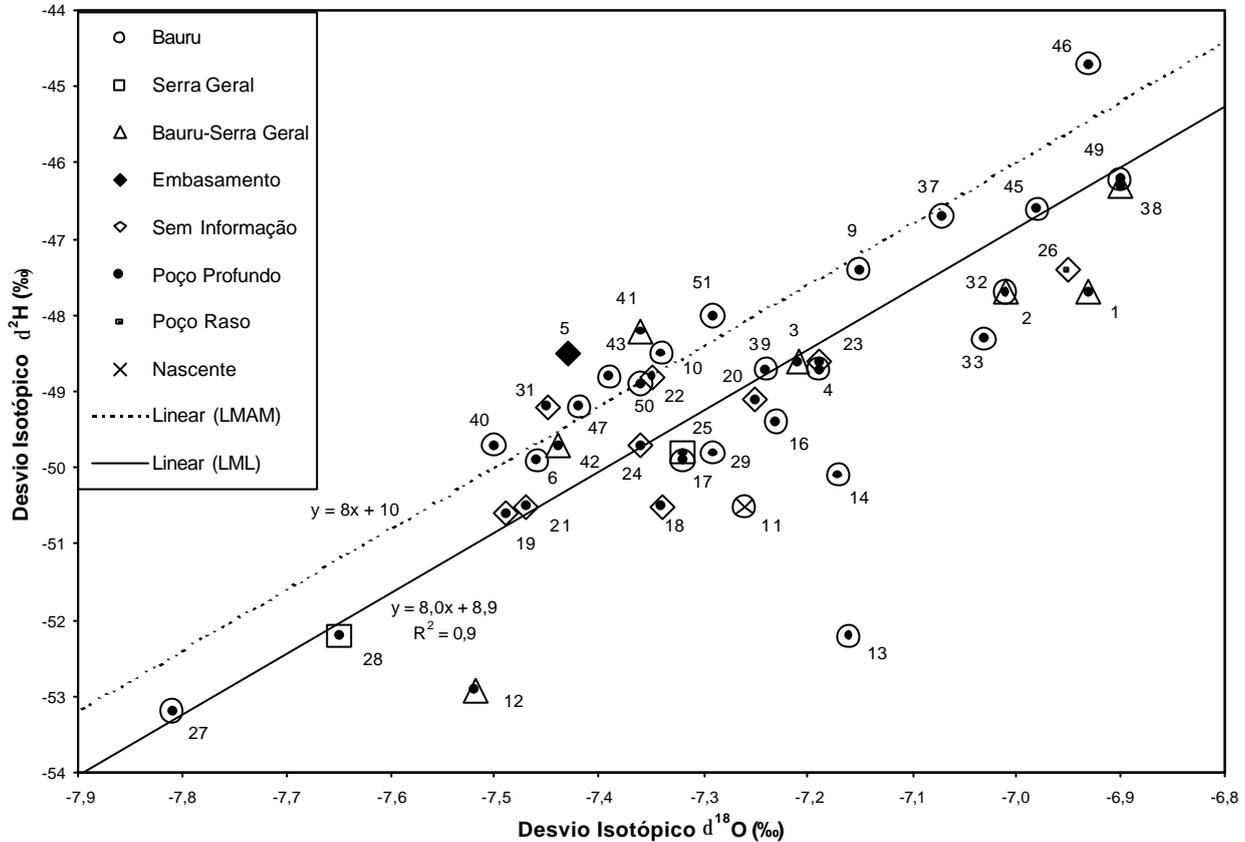


Figura 6. Ampliação do diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ (área assinalada na Figura 5).

Eliminando-se esses pontos, os demais se ajustam a uma reta de equação $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 8,9$ (Linear - LML). Essa reta é bastante semelhante à reta mundial de águas meteóricas, $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ (Linear – LMAM), com o mesmo coeficiente angular. A diferença existente entre essas duas retas está no excesso de deutério, indicando que as águas locais podem ter sofrido alguma evaporação antes de sua infiltração no subsolo. Outros fenômenos modificadores das relações entre esses dois isótopos, tais como intercâmbio isotópico com eventuais gases de origem endógena ou com os minerais oxigenados da rocha são descartados nessa área.

Como não se dispõe de valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as precipitações locais, pode-se adotar, para efeitos de comparação, o valor médio interanual ponderado pela precipitação para a estação de Brasília, obtido da rede GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), o qual é da ordem de -5‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e da ordem de -29‰ para $\delta^2\text{H}$. Esses valores são menos negativos do que qualquer valor encontrado para as amostras que definem a linha meteórica local. Uma única amostra que apresenta valores próximos a estes foi a proveniente do afluente do rio Jordão, com $\delta^{18}\text{O} = -5,17\text{‰}$ e $\delta^2\text{H} = -31,9\text{‰}$, podendo ser considerado representativo das águas atmosféricas locais.

Por meio da Figura 5 pode-se observar que as amostras de água da nascente Barra Alegre, da Cisterna e do Poço Paraíso formam um grupo com características próprias. Para esse conjunto, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre $-6,11\text{‰}$ e $-6,5\text{‰}$ e os valores de $\delta^2\text{H}$, entre $-39,7\text{‰}$ e $-42,5\text{‰}$. Como essas amostras foram coletadas na unidade basáltica sem

cobertura do arenito Bauru, pode-se atribuir valores entre $-6,1\text{‰}$ e $-6,5\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -39‰ e -43‰ para $\delta^2\text{H}$, para as águas infiltradas diretamente no basalto na região. À medida em que essas águas vão se aprofundando no basalto, os valores desses desvios isotópicos vão se tornando mais negativos, como mostram os desvios encontrados para o poço PB-02 ($\delta^{18}\text{O} = -7,3\text{‰}$ e $\delta^2\text{H} = -49,8\text{‰}$) e PB-09 ($\delta^{18}\text{O} = -7,7\text{‰}$ e $\delta^2\text{H} = -52,2\text{‰}$), no qual são extraídas águas da camada de 52 a 70 metros no basalto.

Outro conjunto de pontos em evidência nas Figuras 5 e 6 é o formado por amostras de água de poços no Bauru, poços mistos e poços sem informação litológica. Esse conjunto de pontos está relacionado a poços em que se extraem águas preferencialmente do Bauru, podendo conter pequenas quantidades de água provenientes do basalto, podendo-se atribuir valores entre $-6,9\text{‰}$ e $-7,5\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e, $-44,7\text{‰}$ e $-50,6\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$, como característicos para a formação Bauru.

O fato desses valores de desvios isotópicos serem mais negativos do que os valores adotados para a precipitação local com base na estação de Brasília, pode estar relacionado com a maior altitude do platô onde ocorre o Bauru, com relação às quatro amostras coletadas mais abaixo diretamente sobre o basalto. De acordo com Clark e Fritz (1999), em qualquer região, mesmo que dotada de feições de relevo pouco pronunciadas, ocorrerá precipitação orográfica na medida em que uma dada massa de vapor d'água se eleve acima do relevo e se resfrie adiabaticamente (por expansão), dando origem à precipitação. Nas altitudes mais elevadas, em que as temperaturas médias são mais baixas, as águas da chuva serão isotopicamente empobrecidas, isto é, conterão teores de isótopos pesados menores do que aqueles do padrão. Para o ^{18}O , o empobrecimento pode variar entre cerca de $-0,15$ e $-0,5\text{‰}$ por cada 100m de aumento da altitude, com um decréscimo correspondente de cerca de -1 a -4‰ para o ^2H .

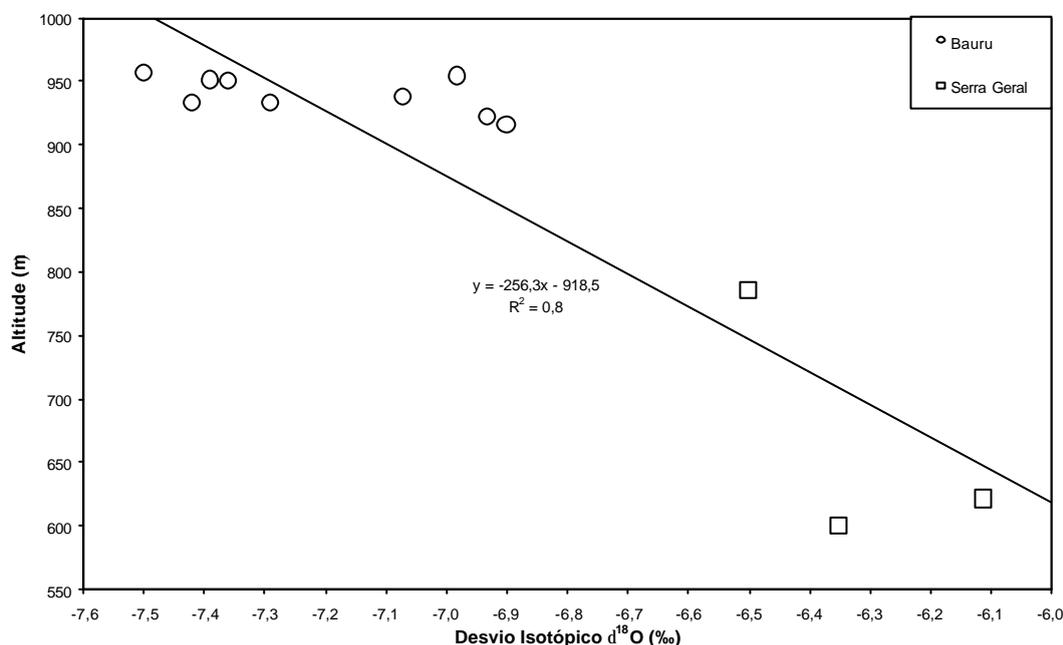


Figura 7. Efeito da altitude na composição isotópica de águas de poços

Com a finalidade de constatar a eventual ocorrência do efeito de altitude na região de Araguari, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 7, no qual são relacionados os valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos para águas de poços na formação Bauru com valores obtidos para poços na formação Serra Geral, com diferenças de altitude de cerca de 300m entre eles. Observa-se um bom ajuste linear entre os valores de desvios isotópicos e a altitude para os dois conjuntos de poços, com um empobrecimento médio de $-0,43\text{‰}$ por cada 100m de aumento da altitude, o que é coerente com a faixa de

variação estipulada pelos autores anteriormente mencionados. Partindo-se da premissa de que a recarga é local e levando-se em conta que o tempo de renovação das águas subterrâneas é rápido, pode-se considerar que a composição isotópica das águas dos poços reflete bem o que ocorre com a composição isotópica das águas de precipitação.

TRÍTIU AMBIENTAL NA ESTIMATIVA DE IDADE

Utilizando os dados de trítio na precipitação em Araguari, correlacionados a partir dos dados da estação GNIP em Brasília e de Kaitoke, como entrada ao modelo exponencial, obtém-se a Figura 8, a qual estabelece a relação entre a concentração de trítio (Unidades de Trítio – UT) e o tempo de renovação da água subterrânea. De modo geral, pode-se dizer que todas as águas com concentrações de trítio próximas ou maiores do que 2UT (Unidades de Trítio) procedem de precipitações recentes e têm tempos de renovação inferiores a 10 anos. Por outro lado, as águas com concentrações de trítio inferiores a 1,3UT contêm importantes frações procedentes de precipitações anteriores a 1953. Esse método não considera o tempo de trânsito correspondente entre a infiltração da água na zona não-saturada e a recarga do aquífero.

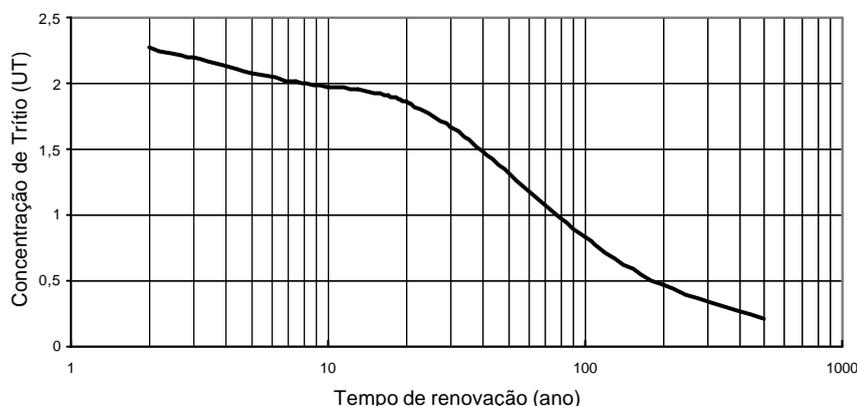


Figura 8. Relação entre a concentração de trítio e o tempo de renovação obtido com o modelo exponencial para a região de Araguari.

A Figura 9 mostra as linhas de isoconcentração de trítio e o tempo de renovação estimado para as amostras provenientes de poços profundos do aquífero Bauru, totalizando 31 amostras. Os dados mostram que as águas desse aquífero são relativamente jovens, variando de tempos inferiores a 2 anos a pouco mais de 50 anos. Das amostras analisadas, 19 (61,3% do total) apresentam tempos de renovação de até 10 anos; outras 10 amostras (32,2%) apresentam tempos de renovação entre 10 e 30 anos e apenas duas amostras apresentam tempo de renovação superiores a 30 anos.

As linhas de isoconcentração de trítio apresentadas na Figura 9 mostram que existe uma área de recarga subterrânea na região das cabeceiras do ribeirão Araras, pois os elevados valores de concentração indicam a presença de águas recentes. O mesmo ocorre a sudeste de Araguari, nas proximidades da área urbana. No entanto, entre essas duas regiões aparece uma concentração de isolinhas com valores menores, indicando que as águas daí extraídas têm tempo de renovação maior, ou seja, são mais antigas, denotando o uso intensivo da água subterrânea na cidade de Araguari para o abastecimento público e irrigação.

Na região do córrego Amanhece também se observa fato semelhante, isto é, a presença de águas mais antigas inseridas em uma área de águas mais recentes correspondentes a águas de recarga, o que pode ser explicada pela grande retirada de água subterrânea para fins agrícolas nessa parte da região. Excluindo-se as duas regiões de concentração de

águas antigas, as demais regiões indicadas pelos valores de trítio como sendo áreas de recarga estão de acordo com o que se observa no mapa potenciométrico (Figura 3).

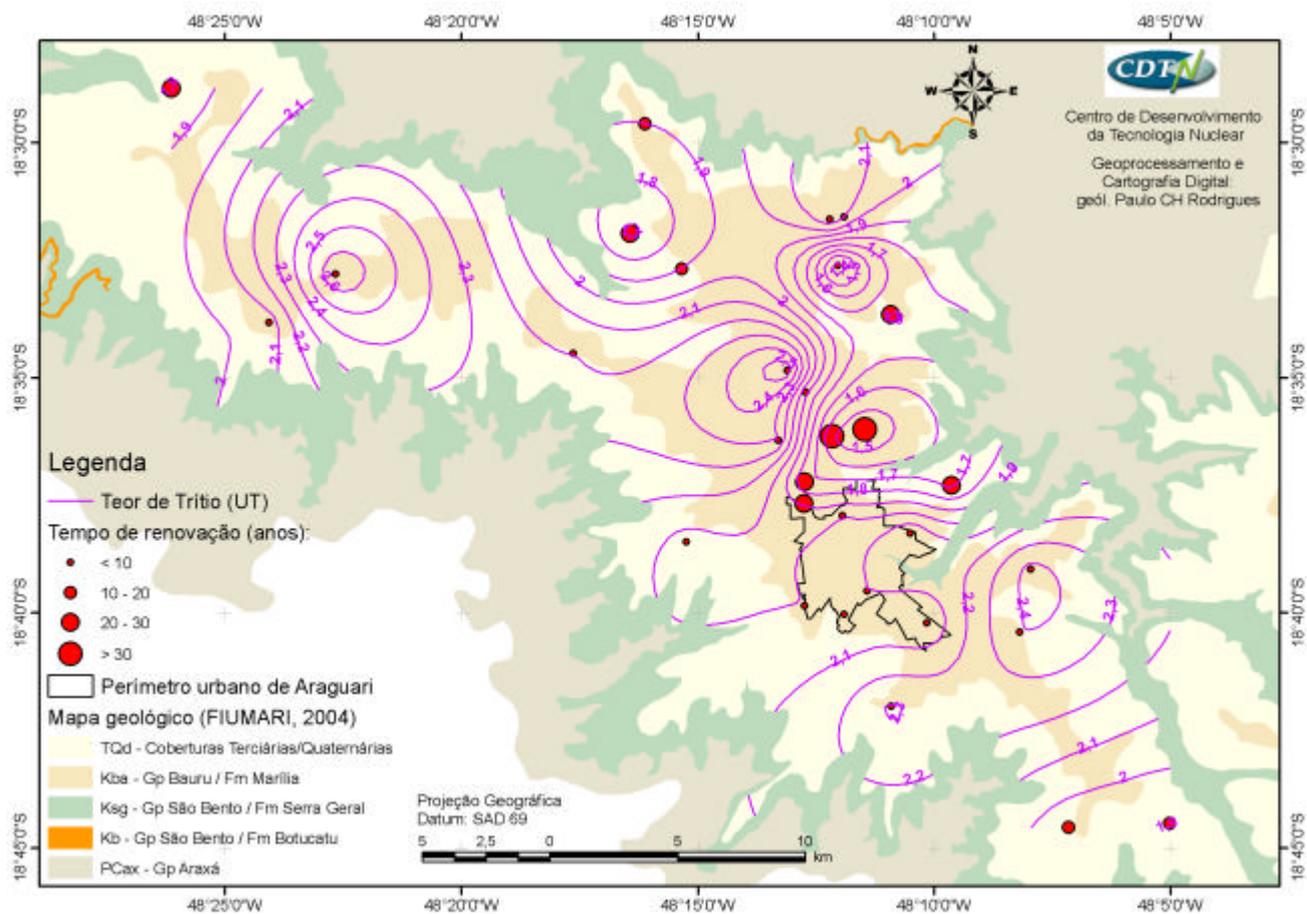


Figura 9. Linhas de isoconcentração de trítio e tempo de renovação estimado para o aquífero Bauru.

CONCLUSÕES

As análises físico-químicas das amostras de água procedentes de poços, nascentes, cursos d'água, represas e barragens da região de Araguari permitiram verificar que as águas do Aquífero Bauru são pouco mineralizadas, apresentando baixa condutividade elétrica e baixos valores de pH, indicando águas ácidas a moderadamente ácidas. As águas do aquífero Serra Geral apresentam condutividade elétrica mais elevada, tendendo a ser mais neutras.

Os pontos de águas subterrâneas amostrados se ajustaram à equação $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 8,9$, que é bastante semelhante à reta mundial de águas meteóricas. A diferença verificada no excesso de deutério, indicando que as águas locais podem ter sofrido algo de evaporação antes de sua infiltração no subsolo. Pontos de água superficial (rios, barragens e alguns poços mais rasos) se enquadraram na categoria de águas evaporadas.

Para a Formação Bauru, como existe a dificuldade de se isolarem poços que bombeiam águas exclusivamente dessa formação daqueles que bombeiam também uma pequena parcela de água procedente dos basaltos, poderiam ser adotados os seguintes intervalos característicos: $-6,9\text{‰}$ e $-7,5\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $-44,7\text{‰}$ e $-50,6\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$.

Observou-se a ocorrência do efeito de altitude na concentração dos isótopos estáveis entre um conjunto de poços situado na Formação Bauru e outro situado em cota cerca de 300 metros inferior, na Formação Serra Geral. O empobrecimento médio de $-0,43\text{‰}$ por cada 100m de aumento da altitude encontrado para os poços, pode ser esperado também nas águas de precipitação, o que é coerente com a faixa de variação encontrada na literatura, considerando-se

que o tempo de renovação das águas subterrâneas é rápido e partindo-se da premissa de que a recarga ocorre localmente.

O tempo de renovação das águas do aquífero Bauru são relativamente jovens, com idades entre 2 e 53 anos. As águas mais antigas foram detectadas em pontos junto às áreas de exploração intensa para irrigação e abastecimento público, como verificado a norte da mancha urbana, na cabeceira do ribeirão Araras, indicando a possibilidade da extração de águas mais profundas. Por se constituir de uma área preferencial de recarga do aquífero Bauru, esse fato demonstra a necessidade de uma melhor gestão das águas subterrâneas no município.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clark, I., e Fritz, P. 1999. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, 2nd Printing, Boca Raton, Florida, USA.

Dardenne, M.A., 2000. The Brasília Fold Belt. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, D. e CAMPOS, D.A. (Editores) *Tectonic evolution of South America*, Rio de Janeiro, p 231 – 263.

Fiumari, S. L. 2004. Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari – MG. Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia, UFMG, Belo Horizonte, 122 p.

IAEA, 2000. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and application. UNESCO/IAEA Series. In: [www-naweb.IAEA.org\naweb\ih\index.html](http://www-naweb.IAEA.org/naweb/ih/index.html).

IBGE, 2000. Censo 2000: Informações socioeconômicas: População, indicadores sociais, pesquisa nacional de Saneamento básico. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://www.ibge.gov.br>, acessado em 22/02/2004.

IBGE, 2005. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://www.Ibge.gov.br>, acessado em 06/02/2006.

UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais); CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) e UFMT (Universidade Federal do Mato Grosso), 2006. Avaliação dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Guarani no município de Araguari, Minas Gerais, Brasil. Informe Final. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Del Sistema Acuífero Guaraní, Fondo de Universidades, SG/OEA, Belo Horizonte.