

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS E HIDROQUÍMICOS DAS REGIÕES DOS MUNICÍPIOS DE MOGI MIRIM, MOGI GUAÇU E ITAPIRA NO ESTADO DE SÃO PAULO

CHANG Hung Kiang, Antonio José TEIXEIRA, Alexandre Campana VIDAL

Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista.
Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: chang@rc.unesp.br.

- Introdução
- Metodologia
- Unidades Aquíferas
 - Aqüíferos do Pré-Cambriano
 - Aqüífero Manto Intemperizado
 - Aqüífero Fraturado
 - Aqüífero Itararé
- Balanco Hídrico
 - Fluviometria
 - Estimativa dos Deplúvios do Domínio de Itapira
 - Estimativa dos Deplúvios dos Domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu
 - Balanco Hídrico dos Domínios
 - Reservas Hídricas Subterrâneas
 - Reservas Renováveis e Permanentes do Aqüífero Manto Intemperizado
 - Reservas Renováveis e Permanente do Aqüífero Itararé nos Domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu
 - Reservas Explotáveis
- Hidroquímica
 - Características Hidroquímicas dos Aqüíferos Manto Intemperizado e Fraturado (Pré-cambriano)
 - Características Hidroquímicas do Aqüífero Itararé (Paleozóico)
- Conclusões
- Referências Bibliográficas

RESUMO: A análise hidrogeológica foi realizada com vistas ao desenvolvimento socioeconômico da área que abrange os municípios de Itapira, Mogi Guaçu e Mogi Mirim, região esta geologicamente localizada entre a borda oriental da Bacia Sedimentar do Paraná - onde ocorrem as rochas sedimentares do Paleozóico pertencentes ao Subgrupo Itararé - e as rochas pré-cambrianas pertencentes ao Complexo Amparo. Foram identificados alguns aquíferos, dos quais se destacam como principais: o Aqüífero Itararé, na parte ocidental, o Manto Intemperizado e o Aqüífero Fraturado, na parte oriental da área estudada. Um balanço hídrico foi realizado para toda a área, por meio do qual foi possível estimar as reservas renováveis e permanentes dos Aqüíferos Itararé e Manto Intemperizado. Também foi efetuada uma análise hidroquímica para a caracterização qualitativa das águas dos referidos aquíferos, mediante a qual foi verificada a predominância das águas bicarbonatadas cálcicas para os aquíferos das rochas do Pré-Cambriano e bicarbonatadas cálcicas e sódicas para os das rochas do Paleozóico.

Palavras-chave: balanço hídrico; hidroquímica; hidrogeologia.

ABSTRACT: *Chang, H.K., A.J. Teixeira, A.C. Vidal - Hydrochemistry and hydrogeological aspects of Mogi Mirim, Mogi Guaçu and Itapira regions of São Paulo State.* The hydrogeological analysis was accomplished foreseeing the social and economical development for the area encompassed by the cities of Itapira, Mogi Guaçu and Mogi Mirim. The study area is geologically located on the oriental border of Paraná Sedimentary Basin, on Paleozoic units of the Itararé Subgroup and Precambrian rocks of the Amparo Complex. The main identified aquifers in the area are the Weathered Mantle Aquifer - on eastern side - and the Itararé Aquifer - on western side of the area. A hydrologic balance was performed for the whole study area, from which it was possible to estimate the renewable and permanent reserves in the groundwater for the Weathered Mantle and for the Itararé aquifers. Likewise, a hydrochemistry analysis was accomplished in order to characterize the quality of the groundwater. From this analysis, it became evident the predominance of calcium and bicarbonate waters for the Precambrian aquifers; and calcium and sodium bicarbonate waters for the Paleozoic aquifer.

Keywords: hydrologic balance; hydrochemistry; hydrogeology.

INTRODUÇÃO

A área dos municípios de Mogi Mirim, Mogi Guaçu e Itapira está geologicamente posicionada na borda oriental da Bacia Sedimentar do Paraná. É formada, a oeste, por sedimentos do Subgrupo Itararé. Correspondem, pois, às sub-bacias dos municípios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu e, a leste, por rochas pré-cambrianas do Complexo Amparo, correspondentes à sub-bacia de Itapira (Figura 1).

Essa região limítrofe da Bacia do Paraná é caracterizada pela complexidade quanto ao comportamento de seus aquíferos, sendo, por isso, alvo de grande número de trabalhos (Oda et al., 1990; Yoshinaga-Pereira, 1996; entre outros). Esta complexidade é explicada, em parte, pelo condicionamento da distribuição das fraturas nos terrenos pré-cambrianos (Fernandez & Amaral, 2002) e pelo comportamento

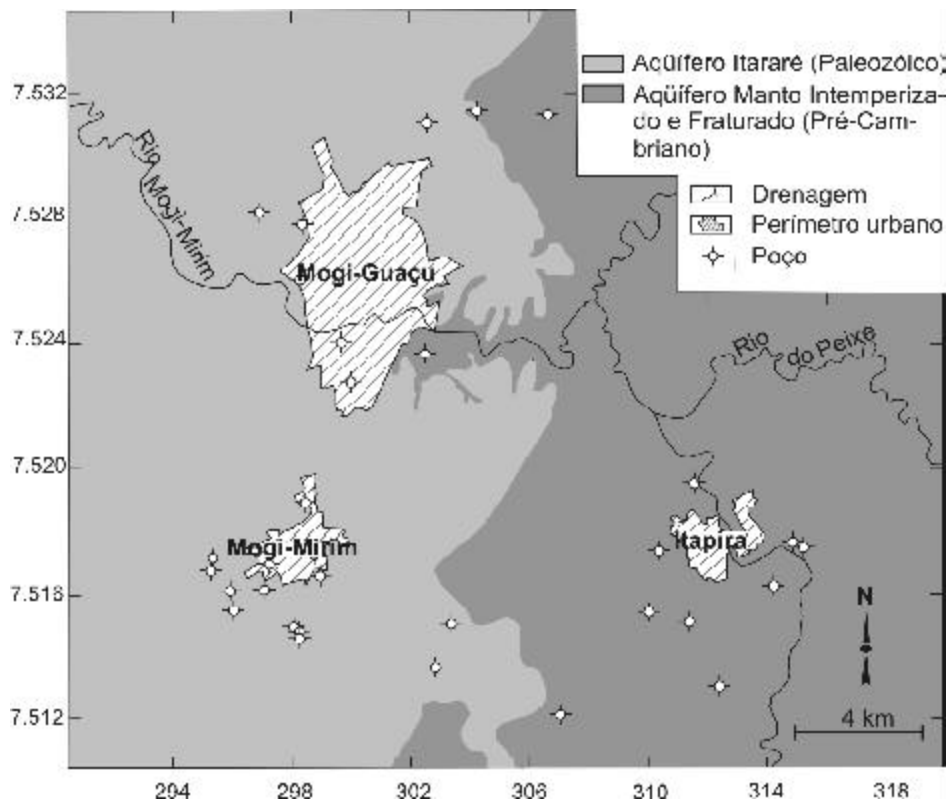


FIGURA 1. Mapa da área de estudo com a localização dos pontos de coleta para a análise físico-química.

estocástico das unidades arenosas nos sedimentos do Subgrupo Itararé (Caetano-Chang, 1984; Stevaux et al., 1987, Vidal 2002; entre outros).

Foi realizada a análise hidrogeológica dos aquíferos presentes na área, enfatizando a avaliação das reservas hídricas e levando em conta a qualidade e o potencial de exploração das águas subterrâneas. O estudo realizado visa contribuir com mais informações sobre os principais aquíferos da área. Assim, foram levados a efeito, além do balanço hídrico, a caracterização hidrogeológica e hidroquímica dos diferentes aquíferos. Para isso, foram realizados os trabalhos geológicos de campo, a catalogação dos poços perfurados na área e

as análises físico-químicas das águas subterrâneas coletadas durante as tarefas de campo. Os levantamentos de campo foram desenvolvidos como tarefa disciplinar dos alunos concluintes do Curso de Geologia da UNESP - Câmpus de Rio Claro - Turma de 1996, sob a supervisão dos professores de Hidrogeologia.

A caracterização dos aquíferos é de fundamental importância, principalmente para esta área que vem apresentando uma densidade demográfica crescente. Chama-se a atenção das autoridades constituídas para a referida caracterização, pois é dela que depende o planejamento criterioso e a gestão adequada dos recursos hídricos disponíveis.

METODOLOGIA

O trabalho iniciou-se com a catalogação dos poços perfurados na área de estudo. A esta etapa, seguiram-se as pesquisas bibliográficas e as visitas às empresas perfuradoras de poços, bem como aos órgãos de abastecimento público. Incurções a campo foram realizadas para delimitação geológica dos aquíferos e coleta de amostras de água para a análise hidroquímica.

No Laboratório de Hidroquímica da UNESP foram realizadas as análises físico-químicas das águas provenientes de 45 poços (Figura 1). As medidas de pH, condutividade e temperatura foram realizadas no instante

da coleta. A alcalinidade foi analisada no mesmo dia da coleta, utilizando-se titulador automático Orion 960. Os cátions foram analisados a partir das alíquotas filtradas e acidificadas. Análises de Na^+ e K^+ foram efetuadas no espectrômetro de absorção atômica CBG 906, enquanto os demais elementos foram analisados através de plasma de acoplamento indutivo ICP-AES, utilizando espectrômetro ARL 3410+ICP. O fluoreto foi analisado pelo método de eletrodo íon seletivo, utilizando-se o titulador Orion 960 e, os ânions Cl^- e SO_4^{2-} analisados através da cromatografia de íons Shimatsu LC-10AD.

UNIDADES AQUÍFERAS

Na área ocorrem duas unidades litoestratigráficas com potencialidades aquíferas:

- as rochas pertencentes ao Embasamento Cristalino pré-cambriano representadas por gnaisses e migmatitos escuros que abrangem a parte oriental da área objeto deste estudo, rochas estas sobre as quais se inclui o domínio de Itapira;
- as rochas sedimentares paleozóicas, pertencentes ao Subgrupo Itararé, representadas pelos arenitos finos a grossos e até conglomerados, intercalados por argilitos. Estes sedimentos ocupam a parte ocidental da área e se estendem para além dela, envolvendo os domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu.

Além destas unidades, ocorrem outras consideradas secundárias, como os sedimentos aluvionares do Cenozóico, com baixa potencialidade hídrica, em função, principalmente, de suas pequenas espessuras. Tais sedimentos são representados pelos arenitos avermelhados finos a grossos, pouco consolidados, que ocupam a porção setentrional da área em estudo, envolvendo o domínio Mogi Guaçu.

AQUÍFEROS DO PRÉ-CAMBRIANO

As rochas pré-cambrianas do domínio de Itapira são representadas por um Manto Intemperizado de gnaisses e migmatitos até a profundidade média da ordem de 40 m e pelas mesmas rochas, porém inalteradas e intensamente fraturadas, de 40 aos 150 m de profundidade. Do ponto de vista hidrogeológico, comportam-se como dois aquíferos distintos, pois são bem diferenciados quanto às suas condutividades hidráulicas.

Por causa do intemperismo, tais rochas tiveram condições propícias para o desenvolvimento de porosidade intersticial, da qual resultou a formação de uma importante zona favorável à recarga, armazenamento e circulação das águas procedentes diretamente das precipitações pluviométricas.

A baixa condutividade elétrica das águas que ocorrem neste manto intemperizado comprova que tais águas estão se comunicando com a superfície em constante processo de renovação. À referida zona dar-se-á, para efeito deste estudo, a designação de Aquífero Manto Intemperizado.

As fraturas, embora difíceis de serem observadas no campo por causa da vasta cobertura intempérica que as mascaram, seguem as mais variadas direções com predominância das noroeste/sudeste e nordeste/sudoeste.

Quanto ao mergulho, as fraturas apresentam-se ora subverticais, ora fortemente inclinadas, ora paralelas e de sentidos opostos. Este último caso constitui o denominado fraturamento angular, no qual as fraturas

exibem mergulhos de aproximadamente 60° e se interceptam em planos que fazem entre si ângulos em torno de 120°. Este tipo de fraturamento é o que melhor absorve as águas do Manto Intemperizado. Porém, as aberturas das fraturas, as interconexões entre elas e também a capacidade de recarga deste meio – a partir das águas procedentes do manto sobrejacente – são os atributos que melhor caracterizam as referidas rochas como aquíferos. A este meio, para fins deste trabalho, dar-se-á a denominação de Aquífero Fraturado.

Aquífero Manto Intemperizado

Este meio aquífero se caracteriza por apresentar:

- espessuras que variam de 5 m, nas cotas mais baixas, a 60 m, nas maiores elevações;
- espessura média de 40 m;
- espessura saturada média da ordem de 20 m;
- porosidade efetiva variável de 2 a 3%;
- condutividades hidráulicas variáveis de 10^{-1} a 10^{-3} m/h.

As águas do Aquífero Manto Intemperizado, muito embora isoladas durante a construção dos poços tubulares, são indiretamente captadas por estes no Aquífero Fraturado, pois, além deste aquífero ser exutório daquele, não é a cravação de poucos metros de revestimento na rocha fraturada que garantirá a estanqueidade das águas do meio intemperizado.

De qualquer maneira, é importante a opção pela preservação ou pelo não-uso direto do Aquífero Manto Intemperizado, pois é dele que depende a maior quantidade de água captada do Aquífero Fraturado.

Aquífero Fraturado

Neste meio, por causa de sua descontinuidade, heterogeneidade e anisotropia, as possibilidades de obtenção de água estão diretamente relacionadas com a ocorrência de fraturas e, principalmente, pelo grau de abertura e entrelaçamento entre elas.

Nestas condições, e considerando o acolhimento de água a partir do Meio Intemperizado, torna-se sem muito sentido a determinação das características hidrodinâmicas do Aquífero Fraturado, uma vez que estas, estando fortemente influenciadas pelas do aquífero sobrejacente, refletem as características dos dois aquíferos (Aquífero Manto Intemperizado + Aquífero Fraturado).

O DAEE (1981) atribuiu ao Aquífero Fraturado o valor da transmissividade de 0,125 m³/h.m e o valor da vazão específica de 0,41 m³/h.m, valores estes determinados a partir de um teste de aquífero realizado no domínio das rochas pré-cambrianas (Meio Intemperizado + Meio Fraturado) de Itapira.

Assim, as características que denotam a eficiência dos poços (vazão e vazão específica) no Aquífero Fraturado, com pouca espessura do manto de intemperismo, refletem melhor as características hidrodinâmicas deste aquífero.

Por conseguinte, com base nos dados obtidos, estima-se, com certa margem de segurança, para o âmbito do Aquífero Fraturado, que:

- poços locados de acordo com as peculiaridades hidrogeológicas locais apresentam vazões médias de 5 m³/h;
- muitos são os poços que apresentam vazões superiores a 10 m³/h;
- os poços locados nas partes mais elevadas topograficamente devem apresentar vazões inferiores a 5 m³/h;
- as profundidades dos níveis estáticos das águas, nos poços tubulares, variam de menos de 1 m, nas baixadas, a até 40 m, nas partes mais elevadas topograficamente;
- as vazões específicas dos poços perfurados até o presente momento variam de 0,02 a 1,55 m³/h.m.

AQUÍFERO ITARARÉ

As águas subterrâneas que ocorrem nas rochas sedimentares, ou seja, nas rochas que estão presentes nos domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu, de um modo geral, apresentam-se livres.

Tais águas podem apresentar-se com certos níveis de confinamento, pois, litologicamente, o Subgrupo

Itararé compõe-se de arenitos finos a grossos, conglomerados, bem como de arenitos argilosos e argilitos que se sucedem ou se intercalam acunhadamente de maneira irregular, tornando difícil o estabelecimento de perfis de correlação.

A ocorrência ou não de corpos de diabásio, conforme sua posição, poderá ter influência positiva ou negativa na constituição de tais rochas como aquíferos isolados.

O Aquífero Itararé, nos domínios de Mogi-Mirim e Mogi Guaçu, apresenta-se caracterizado por:

- área de recarga, considerada para fins de cálculo, de 100 km² em cada um dos domínios;
- espessuras que variam de 5 a 10 m (nas proximidades do contato com as rochas pré-cambrianas) a 150 ou 200 m (nas cercanias das cidades de Mogi Mirim e Mogi Guaçu);
- espessura saturada média estimada, para fins de cálculo, como sendo de 50 m;
- porosidade efetiva de 1% (mínima admissível para aquífero livre);
- poços com vazões variáveis de 0,5 a 7,5 m³/h, com média em torno de 3 m³/h;
- vazão específica variável de 0,07 a 0,15 m³/h.m, com média de aproximadamente 0,1 m³/h.m;
- transmissividade variável de 0,02 a 0,33 m³/h.m;
- coeficiente de armazenamento de 10⁻⁵ (valor mínimo admissível e compatível com os encontrados para este aquífero na bacia hidrográfica do Rio Capivari).

BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico tem a finalidade de contabilizar a quantidade de água que faz parte do ciclo hidrológico. A expressão geral do balanço hídrico é:

$$P = E_{tr} + R + I,$$

onde P é a precipitação pluviométrica, E_{tr} é evapotranspiração real, R é o deflúvio superficial e I é o deflúvio básico.

Nesta expressão, todos os seus elementos dependem dos parâmetros do clima. Dentre tais parâmetros, os que mais exercem influência sobre a área são a precipitação pluviométrica e a temperatura.

Os dados históricos disponíveis referentes à pluviometria e à termometria foram registrados no período de 1976 a 1993, na Estação Campininha, do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo, localizada na bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu.

Para representar a variação climática da área foi adotado o ano hidrológico, ou seja, os dados representativos do ano médio do referido período.

A totalidade da água que circula no ciclo hidrológico é denominada precipitação pluviométrica ou, simplesmente, precipitação.

A precipitação pluviométrica média mensal da área em estudo varia desde a máxima de 225,3 mm em janeiro até a mínima de 31,1 mm em julho. A precipitação anual é relativamente alta mostrando valor médio de 1.400,5 mm para o ano hidrológico do período (Tabela 1).

As temperaturas médias mensais do ano hidrológico variam desde a máxima de 22,3° C em janeiro até a mínima de 14,6° C em julho. Quanto à temperatura média anual, esta apresentou um valor de 19,3° C. As temperaturas extremas variaram desde a máxima de 38,5° C em novembro de 1985 até a mínima de -2,6° C registrado em julho de 1981.

As precipitações pluviométricas médias mensais e as temperaturas médias mensais da região em estudo, comportam-se semelhantemente durante o ano hidrológico, uma vez que apresentam valores relativamente altos na época mais chuvosa, outubro a março, quando

TABELA 1. Precipitações pluviométricas médias mensais e total anual, P, bem como temperaturas médias mensais e média anual, t, dos domínios de Itapira, Mogi Mirim e Mogi Guaçu, observadas no ano hidrológico do período de 1975 a 1993, na Estação Campininha - Prefixo: D4-100M.

Coordenadas da Estação: latitude 217°S;
longitude: 47°09'W; altitude: 580 m. Fonte: DAEE.

Mês	Precipitação (P) (mm)	Temperatura (t) (°C)
Janeiro	225,3	22,3
Fevereiro	176,9	22,3
Março	155,2	21,9
Abril	83,7	19,9
Maior	71,7	17,1
Junho	36,1	15,1
Julho	31,1	14,6
Agosto	31,3	16,3
Setembro	79,6	18,1
Outubro	130,7	20,3
Novembro	166,6	21,4
Dezembro	212,3	21,9
Ano	1400,5	19,3

chove 76% do total anual, e relativamente baixos na época menos chuvosa, abril a setembro, quando chove 24% do total anual.

É importante também caracterizar a inexistência da estação seca na área objeto deste estudo, pois, nenhum mês apresentou altura de chuva que fosse inferior ao dobro da sua temperatura média em graus centígrados.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima que caracteriza a área é do tipo Cfa, ou seja, clima quente (ou quase temperado) úmido sem estiagens, no qual a temperatura média do mês menos quente é inferior a 18°C e a temperatura média do mês mais quente ultrapassa 22°C. Além disso, o total de chuvas do mês mais seco ultrapassa 30 mm.

FLUVIOMETRIA

O escoamento ou deflúvio superficial, R, é a parcela das precipitações pluviométricas que se escoam sobre uma determinada área de drenagem sem nela se infiltrar e sem haver perdas para a atmosfera, ou seja, é a parcela diretamente responsável pela descarga das bacias hidrográficas.

O escoamento subterrâneo (escoamento básico, deflúvio subterrâneo ou deflúvio básico) constitui a parcela da precipitação que é restituída aos rios após a percolação através dos aquíferos. Expressa, pois, a alimentação ou recarga dos aquíferos. Por isso, é quase sempre referido como infiltração ou recarga, I.

O escoamento total (R + I) representa a soma do escoamento superficial com a infiltração.

Analisando o comportamento das sub-bacias hidrográficas do Rio Mogi Guaçu, nas quais os domínios em estudo estão inseridos, pode-se estimar os deflúvios a partir dos índices que levam em conta as relações entre os regimes pluviométrico e fluviométrico no âmbito das referidas sub-bacias (DAEE, 1981).

Assim, escolheram-se os dados fluviométricos registrados no posto codificado como 3D-004, uma vez que este está inserido na sub-bacia hidrográfica do domínio de Itapira e, principalmente, por revelarem a influência das rochas cristalinas que constituem os aquíferos deste domínio.

Do mesmo modo, escolheram-se os valores dos deflúvios registrados no posto nº 61886000, na sub-bacia dos domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu (DAEE 1981), onde ocorrem os aquíferos das rochas sedimentares.

Estimativa dos deflúvios do domínio de Itapira

Nesta unidade hidrográfica, observa-se que o rendimento, relação entre o escoamento total e a precipitação pluviométrica $[(R + I)/P]$, é de 21%. A relação entre o escoamento básico e o escoamento total $[I/(R + I)]$ corresponde a 66% e a relação entre o escoamento básico e precipitação pluviométrica (I/P) é de 14%.

Com isso, adotando o valor da precipitação igual a 1.400,5 mm, pode-se obter o valor do escoamento total igual a 294,1 mm e da infiltração igual a 196,1 mm. Isto quer dizer que 14% (196,1 mm) das águas que são precipitadas anualmente sobre a área de drenagem do referido domínio, efluem, no ponto de controle dos registros fluviométricos, em forma de escoamento básico.

Por fim, o escoamento superficial, R, sobre a área de drenagem do domínio Itapira é igual a 98,0 mm.

Estimativa dos deflúvios dos domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu

Da rede hidrográfica do domínio das rochas sedimentares, observa-se que o rendimento é igual a 22%. A relação entre o escoamento básico e o escoamento total corresponde a 55% e a relação entre o escoamento básico e precipitação pluviométrica é de 12%.

Novamente, adotando o valor da precipitação igual a 1.400,5 mm tem-se escoamento total igual a 308,1 mm, infiltração de 168,1 mm e escoamento superficial de 140 mm.

BALANÇO HÍDRICO DOS DOMÍNIOS

Admitindo-se que a evapotranspiração real, Etr (parcela da precipitação que é restituída à atmosfera pela evaporação do solo e transpiração das plantas),

seja determinada pela diferença $E_{tr} = P - (R + I)$, pode-se obter a equação de balanço hídrico para o domínio das rochas pré-cambrianas de Itapira e para o domínio das rochas sedimentares de Mogi Mirim e Mogi Guaçu (Tabela 2).

TABELA 2 Parcelamento do ciclo hidrológico por meio do balanço hídrico das sub-bacias hidrográficas, nas quais os domínios de Itapira e Mogi Mirim e Mogi Guaçu estão inseridos, aplicando-se os índices que caracterizam os rendimentos dos deflúvios destas sub-bacias. Postos fluviométricos 3D-004 (Itapira) e 61886000 (Mogi Mirim/Mogi Guaçu).

Parcelas do ciclo hidrológico (mm/ano)	Domínios		
	Itapira	Mogi-Mirim	Mogi-Guaçu
Evapotranspiração real	1106,4	1092,4	1092,4
Esgotamento superficial	98,0	140,0	140,0
Infiltração	196,1	168,1	168,1
Precipitação	1400,5	1400,5	1400,5

RESERVAS HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS

Em que pese a heterogeneidade e a anisotropia bem como a transferência de água de cada meio aquífero para o seu subjacente (conforme ocorre do Aquífero Manto Intemperizado para o Aquífero Fraturado, e deste para o Aquífero Itararé), far-se-á um esforço no sentido de que sejam aduzidos valores que reproduzam, embora com ressalvas, o potencial hídrico subterrâneo dos domínios em estudo.

Para fins de cálculo, será feita a estimativa das reservas de águas subterrâneas considerando-se somente os aquíferos de porosidades intersticiais (o Aquífero Manto Intemperizado e o Aquífero Itararé), uma vez que as reservas hídricas do Aquífero Fraturado (porosidade fissural), no qual só há condições de infiltração, escoamento e armazenamento nas fraturas ou fissuras, são praticamente impossíveis de serem efetuadas. Ademais, a exploração de água subterrânea das rochas pré-cambrianas no domínio de Itapira é, em última análise, efetuada indiretamente a partir do Aquífero Manto Intemperizado.

Reservas Renováveis e Permanentes do Aquífero Manto Intemperizado

Considerando-se a área (A) do domínio em questão, bem como a lâmina de água que efetivamente se infiltra, ou seja, a precipitação pluviométrica efetiva ou infiltração (I), as reservas renováveis anualmente podem ser determinadas pela expressão:

$$R_r = A.I$$

Assim, as reservas renováveis do Aquífero Manto

Intemperizado correspondem a $19,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, ou seja, as águas que se renovam anualmente neste aquífero são da ordem de 19 milhões de m^3 .

As reservas permanentes do Aquífero Manto Intemperizado podem ser calculadas com base nos valores que caracterizam a área (A) em estudo, a espessura média saturada (b) e a porosidade efetiva (m), pela expressão:

$$R_p = A.b.\mu,$$

onde, $A = 100 \times 10^6 \text{ m}^2$, $b = 20 \text{ m}$, $\mu = 0,025$.

Nestas condições, as reservas permanentes ou os volumes acumulados anualmente no Aquífero Manto Intemperizado são da ordem de 50 milhões de m^3 .

Reservas Renováveis e Permanente do Aquífero Itararé nos Domínios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu

Tomando-se a área (A) adotada para o estudo, e, também, a precipitação efetiva média do aquífero (I), as reservas renováveis (R_r) avaliadas anualmente nos domínios Mogi Mirim e Mogi Guaçu atingem 17 milhões de m^3 .

As águas subterrâneas destes domínios, além de fazerem parte de um meio aquífero muito heterogêneo e anisotrópico, apresentam-se, geralmente, livres, muito embora sejam freqüentes a ocorrência de certos níveis de confinamento, tornando-se, desse modo, dificultosa uma avaliação precisa das reservas permanentes da área. Mesmo assim, tentar-se-á indicá-las, como ordens de grandeza úteis para fins de planejamento.

Nesse sentido, as reservas permanentes deste domínio podem ser estimadas, levando-se em conta a área (A) adotada, a espessura média saturada (b), a porosidade efetiva (m) da zona livre e o coeficiente de armazenamento (S) da zona confinada do aquífero, pelas expressões:

$$R_p = A.b.\mu \quad (\text{zona livre do aquífero}),$$

$$R_p = A.b.S \quad (\text{zona confinada do aquífero}),$$

onde $A = 100 \times 10^6 \text{ m}^2$, $b = 50 \text{ m}$, $m = 0,01$, $S = 10^{-5}$.

Assim, as reservas permanentes ou os volumes anuais armazenados na zona livre do aquífero, são, aproximadamente, 50 milhões de m^3 . Já os armazenados anualmente na zona saturada, correspondem a 0,05 milhões de m^3 .

Destas cifras, percebe-se que os volumes armazenados sob pressão representam apenas 0,1% dos armazenados na zona livre; portanto, tais volumes podem ser considerados desprezíveis.

Assim, as reservas hídricas subterrâneas permanentes do Aquífero Itararé representam um potencial de 50 milhões de m^3 .

RESERVAS EXPLOTÁVEIS

Os valores obtidos pelos cálculos das reservas renováveis demonstram que em um dispositivo ideal em forma de malha quadrangular de 100 km² seriam necessários 100 poços (distribuídos, cada um deles, no centro de um quadrado de 1 km² de área) produzindo 21 m³/h, por poço, em cada um dos domínios. Com tais vazões, os recursos hídricos subterrâneos renováveis seriam explorados racionalmente em 1 ano, ou seja, sem comprometer a capacidade de produção dos aquíferos da área.

Todavia, admitindo-se a incerteza quanto à adoção de padrões tecnológicos de bom nível no que se refere aos estudos que deveriam anteceder e suceder às obras e captação de água subterrânea, não se pode ter por certo o bom aproveitamento das reservas renováveis,

reservas estas teoricamente disponíveis nos aquíferos que ocorrem nos domínios de Itapira, Mogi Mirim e Mogi Guaçu.

Por isso, costuma-se considerar que as reservas explotáveis (volumes anuais que podem ser extraídos dos aquíferos, sem comprometimento do equilíbrio hidrodinâmico destes) devam ser representadas por 1/3 das reservas renováveis.

Nesse sentido, as reservas explotáveis em cada 100 km² de área considerada para cada um dos referidos domínios serão de aproximadamente 6 milhões de m³.

Isto equivale a dizer que, em cada área de 1 km² dos domínios de Itapira, Mogi Mirim e Mogi Guaçu, se poderá captar, com grau de segurança elevado, água subterrânea com uma vazão média de 7 m³/h por poço (em regime de 24 h/dia) ou 21 m³/h (em regime de 8 h/dia).

HIDROQUÍMICA

O estudo hidroquímico teve como objetivo investigar as características físico-químicas das águas subterrâneas presentes nas principais unidades geológicas, com vistas à classificação e diferenciação química entre os aquíferos. O caráter de potabilidade e o estudo detalhado dos elementos poluentes não foram objeto de pesquisa deste trabalho. As análises físico-químicas utilizadas para a análise hidroquímica, contendo os principais elementos, estão apresentadas na Tabela 3.

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DOS AQUIFEROS MANTO INTEMPERIZADO E FRATURADO (PRÉ-CAMBRIANO)

Do mesmo modo como não foi possível diferenciar as características hidrodinâmicas do Aquífero Manto Intemperizado e do Aquífero Fraturado, esta diferenciação, do ponto de vista hidroquímico, também não pôde ser realizada. A maioria das águas foi amostrada em poços profundos e para um estudo detalhado destes aquíferos seria necessária a coleta em poços rasos e nascentes inseridas no Manto Intemperizado.

As águas associadas a estes aquíferos foram coletadas no município de Itapira, onde 20 análises físico-químicas foram realizadas. Através dos valores médios dos elementos analisados (Tabela 4), pode-se observar que estas águas apresentam baixa concentração para a maioria dos íons. Os valores de condutividade das amostras, medidos na ocasião da coleta, corroboram esta baixa salinidade. Os valores de condutividade não ultrapassam 350 μS/cm, com um valor médio de 190 μS/cm. O pH apresenta valor médio de 6,98, com valor máximo de 9,55, mínimo de 5,71 e desvio padrão de 0,87.

As baixas concentrações iônicas são indicativas da influência das águas superficiais (Aquífero Manto Intemperizado) na composição hidroquímica, o que confirma a influência direta do Aquífero Manto Intemperizado sobre o Aquífero Fraturado.

O cátion predominante nestas águas é o cálcio e, secundariamente, o sódio. O ânion predominante é o bicarbonato, em muitos casos, com concentração dez vezes maior que a do cloreto e sulfato. Em função do predomínio do cálcio entre os cátions e do bicarbonato entre os ânions, 85% destas águas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, conforme pode ser visualizado no diagrama de Piper (Figura 2).

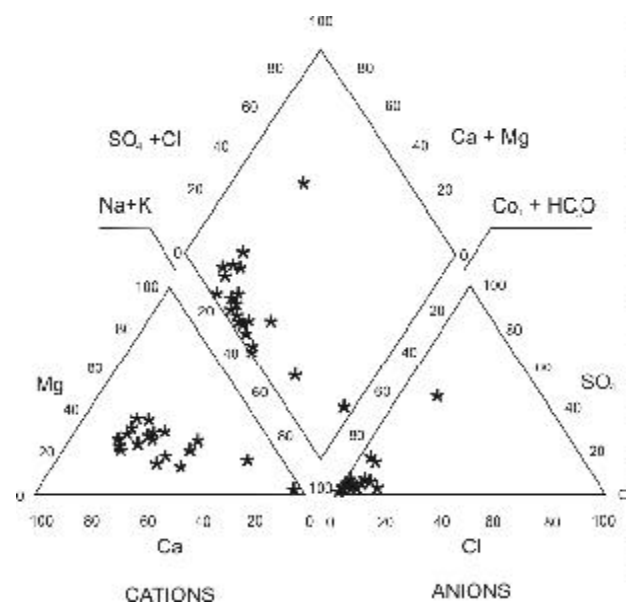


FIGURA 2. Diagrama de Piper para as águas subterrâneas da região de Itapira (aquíferos Fraturado/Manto Intemperizado).

TABELA 3. Análises químicas das águas subterrâneas coletadas na área de estudo. MM (Mogi Mirim); MG (Mogi Guaçu); IT (Itapira). Concentrações estão representadas em mg/L.

Munic	Temp °C	pH	Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na	K	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	SiO ₂	STD
MG	26,6	9,31	380	44,9	0,3	1,96	0,022	10,58	3,94	1,29	0,42	16,69	80,12
MG	24	8,42	290	28,8	1,7	10,49	5	141,8	0,67	0,04	0,31	23,33	212,14
MG	20,1	5,96	130	5,5	5,1	5,97	1,37	32,92	0,35	1,46	15,87	33,81	102,35
MG	25,7	9,15	280	45,9	0,7	5,11	0,28	11,3	0,79	1,91	0,02	23,37	191,20
MM	23,5	7,76	150	5	3,3	13,9	0,58	68,37	0,79	0,04	0,48	42,37	133,33
MM	26,4	7,72	420	64,6	0,9	18,55	1	96,69	68,31	5,55	0,16	29,66	285,42
MM	22,8	6,55	90	3,7	2,9	4,39	0,26	32,35	0,19	0,45	0,22	38,52	83,10
MM	23,8	5,46	50	0,6	1	0,5	0,2	6,208	0,34	0,04	0,23	12,63	21,94
MM	23,7	7,39	180	14,1	2	9,5	2,4	88,38	1,61	0,04	0,1	47,29	165,42
MM	24,5	6,63	390	20,4	3,7	17,1	8,2	38,64	1,05	29,12	86,8	42,59	247,60
MM	24,2	7,66	350	23,1	2,1	37,42	7,8	180	6,89	13,57	26,73	31,03	328,64
MM	24,6	6,14	620	27,8	4,2	9,98	1,56	42,73	0,75	16,89	54,33	19,32	173,36
MM	23,4	6,84	150	3,2	2,3	10,73	1,14	62,38	0,62	0,46	0,12	47,51	133,48
MM	24,3	8,4	310	48,5	0,3	2,78	0,026	120,9	6,69	0,27	0,7	10,72	190,89
MM	23	6,95	150	5,9	3,2	7,72	2	41,3	0,05	3,99	12,34	44,08	120,58
T	24,2	9,55	350	55,3	0,3	1,74	0,048	20,11	15,16	3,89	5,37	27,69	129,61
T	22,9	7,12	130	3,1	1,6	7,31	2,6	36,75	0,04	0,04	0,07	39,23	112,96
T	22,7	7,29	80	3,3	2,8	2,38	1,2	24,74	0,91	1,71	0,43	49,46	86,93
T	23	6,76	120	7,4	1,1	8,75	1,3	57,62	0,33	0,66	7,09	48,98	133,65
T	22,4	7,2	210	6	1,3	18,2	4,9	97,25	3,14	3,5	3,56	38,09	175,94
T	23	6,96	190	7,9	2,3	10,7	4,2	80,13	1,03	2,28	3,85	38,31	150,70
MM	22,3	8,32	270	28,4	0,3	9,6	0,07	136,6	3,88	0,34	0,2	17,76	207,15
MM	23,2	7,17	510	45,1	1,7	30,31	5,1	193,4	2,39	27,09	2,92	22,71	330,74
MG	23,7	8,99	400	59,9	0,3	6,9	0,02	4,228	41,61	21,17	0,35	13,70	148,17
T	22,1	6,97	100	6,9	1,8	4,77	1,848	44,29	0,62	0,04	0,07	30,33	110,69
T	22,9	6,51	150	9,5	1,1	7,38	1,5	62,15	0,27	0,41	2,4	52,11	137,02
MG	23,7	7,04	460	44,5	2,3	17,35	7,6	101,2	22,74	42,05	7,53	23,01	268,28
MM	24,1	7,43	200	20,2	1,6	6,71	0,77	102,1	3,66	1,9	5,98	16,91	169,83
MM	22,4	6,86	100	4,8	0,8	5,85	1,548	40,52	0,26	0,39	1,83	47,17	105,36
MG	23,5	7,28	340	44,6	2,5	11,84	2,9	119,6	14,06	13,25	0,88	25,49	236,12
MG	21	7,24	140	6,8	3,6	6,77	1,8	37,69	0,28	2,11	12,58	41,88	113,71
MM	22,8	5,82	60	0,5	0,5	4,24	0,123	15	4,87	0,92	4,35	7,43	37,93
MG	23,5	6,84	120	6,4	1,7	3,81	1,85	42,92	0,37	1,41	1,51	52,94	112,91
T	23,3	6,48	190	5,2	2,2	9,8	5,1	51,83	1,09	5,43	22,74	31,67	135,06
T	22	7,39	130	4,8	1	6,77	2,7	55,8	1,19	0,04	3,33	39,44	115,07
MG	23,3	7,36	80	0,6	0,5	8,4	0,12	27,79	0,34	0,11	1,6	11,13	50,59
MM	23	5,77	180	1,1	1,5	1,05	0,55	7,241	0,75	16,86	54,33	7,78	85,86
T	21,7	5,71	60	3,6	1,7	0,88	0,45	14,9	0,2	0,58	1,32	15,62	39,47
MG	22,1	6,19	200	6,8	2,5	7,6	3,3	43,35	0,21	5,32	21,63	31,89	122,80
MG	25	5,64	50	1,2	0,5	0,39	0,124	6,842	0,3	0,04	0,2	16,16	25,75
MM	24,5	5,82	40	1	2,2	0,92	0,104	12,42	0,21	0,04	0,07	9,82	26,79
T	22,2	6,7	370	5,2	1,6	11,1	5,3	82,7	0,32	0,62	2,77	41,30	150,91
T	23,5	6,72	100	3,3	1,2	3,91	1,84	35,33	0,29	0,35	0,72	34,82	82,16
MG	23,5	5,55	50	0,3	0,1	0,51	0,325	8,273	0,15	0,04	0,62	6,10	16,62
MM	23,4	5,76	50	0,6	0,7	0,4	0,11	3,731	0,79	0,04	1,07	10,06	16,94

TABELA 4. Estatística básica dos íons maiores dos aquíferos Fraturado/Manto Intemperizado situados na região de Itapira. Concentrações em mg/L.

Espécie	Amostras	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Na	20	8,69	3,30	55,30	11,14
K	20	1,70	0,30	3,40	0,77
Ca	20	9,63	0,88	25,30	6,16
Mg	20	3,19	0,05	9,40	2,19
HCO ₃	20	59,29	4,66	156,10	34,33
SO ₄	20	2,78	0,04	15,16	4,08
Cl	20	2,06	0,04	8,88	2,22
NO ₃	20	4,30	0,07	22,74	5,56
F	17	0,14	0,03	0,51	0,10
SiO ₂	20	40,23	15,64	53,81	9,06
Ec	20	190,0	60,0	350,0	96,10
STD	20	120,0	39,47	175,94	35,35

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DO AQUÍFERO ITARARÉ (PALEOZÓICO)

Este aquífero está representado pelos poços situados nos municípios de Mogi Mirim e Mogi Guaçu, onde foram analisados 45 poços dos 77 catalogados.

Embora possuam valores médios semelhantes aos do Aquífero Fraturado, as águas apresentam uma composição mais heterogênea. O valor médio de pH de 6,72 indica também um estado próximo da neutralidade, para a maior parte das águas; no entanto, os valores variam de 5 a 9. A concentração de sólidos totais dissolvidos indica a baixa salinidade destas águas, com valor médio de 142 mg/L, mínimo de 16,6 mg/L e máximo de 330,7 mg/L (Tabela 5).

TABELA 5. Estatística básica dos íons maiores do Aquífero Itararé situado nas regiões de Mogi Mirim (MM) e Mogi Guaçu (MG). Concentrações em mg/L. Condutividade elétrica (Ec) em $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Espécie	Munic.	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Na	MG	21	17,24	0,50	64,60	18,72
	MM	24	18,34	0,30	127,00	29,02
K	MG	21	6,28	0,10	10,00	21,50
	MM	24	1,51	0,10	5,10	1,47
Ca	MG	21	10,19	0,40	37,42	9,81
	MM	24	5,98	0,07	21,37	5,45
Mg	MG	21	1,77	0,03	8,20	2,41
	MM	24	1,63	0,01	8,90	2,17
HCO_3^-	MG	21	68,54	2,91	195,00	56,80
	MM	24	38,46	0,57	141,80	42,65
SO_4	MG	21	1,98	0,05	68,31	14,67
	MM	24	11,47	0,04	205,15	42,16
Cl	MG	21	5,68	0,09	29,12	9,25
	MM	24	4,10	0,04	22,75	6,63
NO_3^-	MG	21	12,22	0,07	86,80	23,72
	MM	24	6,26	0,07	28,30	8,71
F	MG	16	0,12	0,02	0,51	0,14
	MM	18	1,36	0,01	9,46	3,13
SiO_2	MG	21	27,28	7,28	47,50	14,87
	MM	24	24,75	6,10	52,91	13,92
Ec	MG	21	224,61	50	620	141,57
	MM	24	224,73	50	620	167,57
STD	MG	21	129,29	16,61	268,27	79,10
	MM	24	150,71	16,93	330,73	97,87

Os diagramas hidroquímicos apontam características químicas variadas para as águas desta região, sendo 78% das amostras classificadas como bicarbonatada cálcica e sódica (Figura 3).

O comportamento dos dois conjuntos de dados (Mogi Guaçu e Mogi Mirim) confirma a natureza única deste aquífero paleozóico na região do estudo. A variação da composição química reflete a influência das águas de recarga na maioria dos poços. Com isso, as águas, em grande parte, apresentam pH neutro e baixa concentração de sólidos totais dissolvidos.

Grosso modo, a concentração de alguns íons pode ser indicativa para a distinção entre os aquíferos do Paleozóico e do Pré-Cambriano, principalmente com

relação aos íons sódio e cloreto, que apresentam valores superiores a 10 mg/L e 5 mg/L, respectivamente, no Aquífero Itararé.

As menores concentrações de sódio e cloreto nas águas dos Aquíferos pré-cambrianos podem ser atribuídas provavelmente ao menor tempo de residência das águas nas rochas e no Manto Intemperizado do embasamento cristalino, em relação àquelas inseridas nos sedimentos paleozóicos.

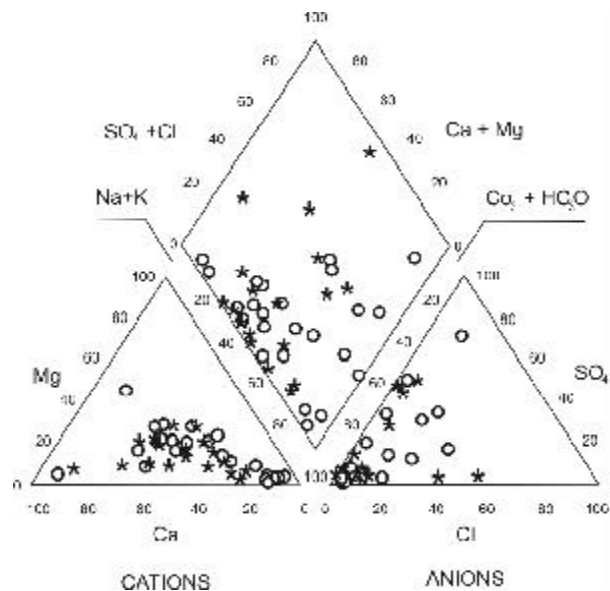
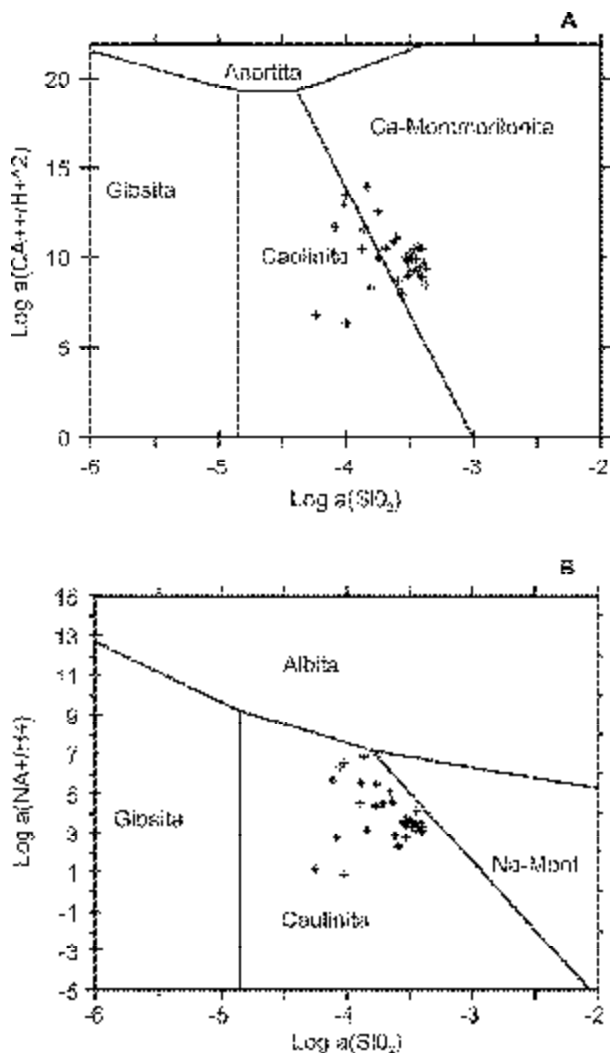


FIGURA 3. Diagrama de Piper para as águas do Aquífero Itararé. Os pontos em círculo correspondem às águas de Mogi Mirim, enquanto os pontos em cruz se referem às águas de Mogi Guaçu.

O diagrama de estabilidade, definido pelos logaritmos entre a razão de atividade $a_{\text{Na}^+}/a_{\text{H}^+}$ e a atividade da sílica aquosa, mostra que todas as amostras caem no campo de estabilidade da caulinita. Em relação aos campos de estabilidade definidos pelos logaritmos da razão de atividade $a_{\text{Ca}^{++}}/a_{\text{H}^{++}}$ versus $a_{\text{SiO}_{2(\text{aq})}}$, as amostras situam-se entre os campos da caulinita e esmectita (Figura 4).

O posicionamento das amostras nos campos de estabilidade da caulinita e da montmorillonita indica o favorecimento para a formação destas fases minerais. Esta situação é influenciada pelo clima e pela transmissividade do aquífero (Dutta, 1992).

A presença da baixa salinidade nas águas estudadas foi observada para a maioria dos poços, sendo reflexo do clima úmido e da alta percolação de água nos aquíferos, o que contribui para o baixo tempo de residência das águas a rápida renovação.



As principais reações que devem ocorrer nos aquíferos estudados são os feldspatos se alterando para montmorillonita e caulinita, bem como montmorillonita se alterando para a caulinita, conforme apresentadas a seguir. Estes minerais são os que apresentam as maiores participações volumétricas no arcabouço mineralógico dos aquíferos.

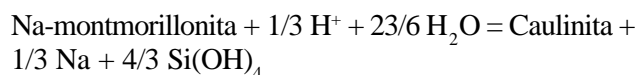
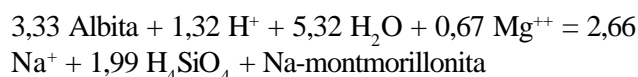
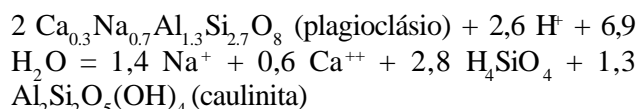
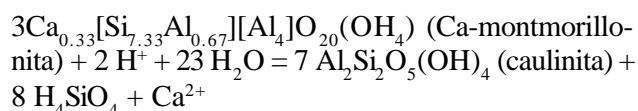
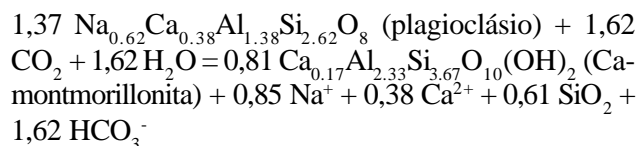


FIGURA 4. Diagramas de estabilidade para todas as amostras dos aquíferos pre-cambriano (Manto Intemperizado e Fraturado) e paleozóico (Itararé). (A) $\log [a\text{Ca}^{++}/(a\text{H}^+)^2]$ versus $\log a\text{SiO}_2$. (B) $\log [a\text{Na}^+/a\text{H}^+]$ versus $\log a\text{SiO}_2$.

CONCLUSÕES

Conforme já constatado em trabalhos anteriores, pode-se considerar para a região a existência de duas unidades aquíferas distintas, ambas relacionados a seus respectivos grupos geológicos. O aquífero instalado nas rochas do Pré-Cambriano, associadas ao Complexo Amparo, corresponde aos aquíferos Fraturado e Manto Intemperizado. O segundo aquífero está inserido nas rochas sedimentares do Subgrupo Itararé e, por isso, recebe a mesma denominação do Subgrupo homônimo, ou seja, Aquífero Itararé.

Em ambos os aquíferos as características hidrodinâmicas não são excelentes quando comparadas com outros aquíferos do Estado de São Paulo. O Aquífero Fraturado está influenciado pela disposição das zonas de fraturas e pela espessura da zona referente ao Manto Intemperizado. O Aquífero Itararé está inserido em terreno geológico muito heterogêneo, sem a presença de camadas reservatórios bem definidas espacialmente.

Com base no balanço hídrico efetuado, foram estimados reservas hídricas renováveis para a área sedimentar paleozóica (Aquífero Itararé) e para o embasamento pré-cambriano (Manto Intemperizado) de 17 milhões de m³ e 19 milhões de m³, respectivamente. Já as reservas permanentes respondem aproximadamente por 50 milhões de m³ para cada área. Como as reservas exploráveis correspondem a 1/3 das reservas renováveis, estas totalizam aproximadamente 6 milhões de m³ para cada área.

Com relação às características hidroquímicas, os dois aquíferos apresentam um comportamento semelhante em muitos casos. O pH na maioria deles é neutro, baixa salinidade e com predominância do ânion bicarbonato. O cálcio é o principal cátion no Aquífero Fraturado/Manto Intemperizado, enquanto que o Aquífero Itararé encontra-se mais enriquecido em sódio. Constata-se, ainda, tendência regional de aumento da salinidade em direção às águas do Aquífero Itararé.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAETANO-CHANG, M.R. **Análise ambiental e estratigráfica do Subgrupo Itararé (PC) no sudoeste do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1984. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
2. DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 5 (Campinas), SP**. São Paulo: DAEE, 1981, 2 v.
3. DUTTA, P.K. Climatic influence on diagenesis of fluvial sandstones. Diagenesis III, **Developments in Sedimentology**, v. 47, p. 191-253, 1992.
4. FERNANDEZ, A.J. & AMARAL, G. Cenozoic tectonic events at the border of the Paraná Basin, São Paulo, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 911-931, 2002.
5. ODA, G.H.; YOSHINAGA, S.; IRITANI, M.A.; HASSUDA, S.; CASTRO, S.A.P.; HIRATA, R.C.A. **Hidrogeologia da Folha de Salto de Pirapora (SP)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6, 1990, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Água Subterrânea, 1990, p. 164-173.
6. STEVAUX, J.C.; SOUZA FILHO, E.E.; TEIXEIRA, J.A.; LANDIM, P.M.B. Sistemas deposicionais do Subgrupo Itararé (P-C) na bacia hidrográfica do baixo Rio Capivari (SP): um modelo para prospecção de água subterrânea. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, 1987, Rio Claro. **Atas...** Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia e Núcleo São Paulo, 1987, v. 1, p. 355-374.
7. VIDAL, A.C. **Estudo hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de afloramento da porção central do Estado de São Paulo**. Rio Claro, 2002. 109 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
8. YOSHINAGA-PEREIRA, S. **Proposta de representação cartográfica na avaliação hidrogeológica para o estudo de planejamento e meio ambiente, exemplo da região metropolitana de Campinas - SP**. São Paulo, 1996. 190 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.