

HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO DE RIBEIRÃO PRETO (S.P)

Osmar Sinelli*
André Davino*
Adônis de Souza*
Neide M. M. Gonçalves*
José A. Teixeira**

* Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto — USP

** Instituto de Geociências e Ciências Exatas — Rio Claro — UNESP

ABSTRACT

This paper starts with a brief account of the geological and hydrogeological characteristics of the Ribeirão Preto region. The feeding, circulation and behaviour of the groundwater are studied by means of drill logs, surface geophysics and geochemistry.

INTRODUÇÃO

Este trabalho sintetiza os resultados obtidos durante investigação hidrogeológica realizada no período 1978/79, na região de Ribeirão Preto-Estado de São Paulo (Fig. 1).

O Município de Ribeirão Preto é totalmente abastecido por água subterrânea de excelente qualidade. A sua população atual é da ordem de 350.000 habitantes com um consumo anual de $36 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Previsões de demanda futura indicam uma necessidade da ordem de $72,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o ano 2.000. Nestas condições e tendo em vista a alta importância da água subterrânea nesta região estabeleceu-se uma pesquisa hidrogeológica com a finalidade de melhor definir o comportamento da água subterrânea no Município de Ribeirão Preto.

Os objetivos desta investigação foram, através de estudos geológicos, geofísicos e geoquímicos definir a geometria do aquífero Botucatu-Pirambóia, bem como, avaliar os principais parâmetros que governam o comportamento da água subterrânea com a finalidade de implantar uma política racional de aproveitamento e proteção às águas subterrâneas da região.

I - ASPECTOS DO MEIO NATURAL

Trata-se de uma região situada na parte NNE do Estado de São Paulo, cobrindo uma superfície de aproximadamente 3674 Km^2 , entre os paralelos $21^{\circ}00'$ e $21^{\circ}45'$ de latitude S e os meridianos $47^{\circ}30'$ e $48^{\circ}00'$ de longitude W.G.

A apresentação dos principais aspectos geológicos e morfológicos, climáticos, pedológicos e fitológicos da região, esboça o quadro do meio natural dessa região fisiograficamente homogênea.

Elementos do Clima

Considerando essa homogeneidade, adotou-se como representativos para toda a região, os dados históricos registrados na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Estado, em Ribeirão Preto, no período de 1943 a 1976.

Esses dados, referentes aos elementos climáticos (pluviometria, termometria, insolação, umidade relativa e vento), estão representados numérica e graficamente nas figuras 2, 3, 4, 5 e 6.

Particularmente, a avaliação da evapotranspiração potencial mensal da região foi efetuada pelo método semi-empírico de Penman (in

Villela et al - 1975). O cálculo da evapotranspiração potencial ETP, por este método, para a região de Ribeirão Preto, pode ser visualizada na figura 7. Essa mesma figura apresenta os resultados da evapotranspiração real, ETr, calculados por meio do balanço hídrico, segundo Thornthwaite e Mather (1955).

Relevo

Examinando-se as folhas topográficas do I.G.G. e acompanhando o mapeamento geológico estrutural (1:50.000) verifica-se que a cidade de Ribeirão Preto e parte de seu município se localizam numa "Depressão" onde as altitudes variam de 500 a 650m. No lado sudeste, abrangendo inclusive o distrito de Bonfim Paulista, e dirigindo-se para o município de Cravinhos, as altitudes aumentam rapidamente atingindo um máximo em torno de 900m nos arredores da cidade de Cravinhos, refletindo problemas de ordem tectônica.

Além disso, quando se detem na observação do mapa da rede de drenagem dessa região organizado por Sinelli (1970), chama realmente a atenção o paralelismo exibido pelos seus principais cursos d'água: rios Mogi, Pardo e Sapucaí e bem ao norte o do Carmo, e a retinidade exibida por longos segmentos de seus percursos, revelando a existência de marcante controle estrutural na fixação da rede de drenagem.

Desse modo, por estar situada entre as redes hidrográficas formadas do médio rio Pardo, pelo lado setentrional, e do Ribeirão da Onça e rio Mogi-Guaçu, pelo meridional, o relevo da região de Ribeirão Preto está condicionado ao entalhamento realizado por esses três cursos principais consequentes para os quais correm, quase perpendicularmente, seus afluentes. A semelhança do que ocorre em toda região, a feição dominante desse relevo é a existência de grandes testemunhos tabuliformes sobressaindo em meio a uma superfície ondulada suave. Esses testemunhos se distribuem em forma de elevações isoladas ou em forma de plataformas interfluviais, amplas e contínuas.

Vegetação

A vegetação original que recobria o Alto Planalto Paulista já se acha inteiramente devastada. Por isso a paisagem que hoje oferece sua cobertura vegetal é bem diversa daquela que deveria ter proporcionado sua vegetação nativa. A derrubada, praticada no intuito de aumentar as áreas cultivadas ou de pastagem, assim como o desmatamento parcial condicionando o aparecimento de uma vegetação secundária com a retirada das essências mais preciosas levaram, em consequência, a mudança do panorama da região outrora coberta pela mata exuberante da floresta latifoliada tropical.

Um outro tipo de vegetação original, restritamente localizado, é o do campo cerrado, representado pelos sub-tipos cerrado e cerradão.

Entretanto, a maior extensão da região já foi transformada, pela atividade agro-pastoril intensiva, em campos cultivados ou de pastagem. Os primeiros tiveram na expansão cafeeira, até meados do fim do século passado, o motivo do rápido crescimento populacional e econômico de toda a região.

De maior importância, pelo impulso tomado nos últimos 25 anos, deve-se salientar a cultura da cana-de-açúcar além da cultura da soja que, na década atual, tem sido bastante incrementada.

As formações pastoris são áreas com cobertura essencialmente gramínoide (capins gordura, jaraguá, colônia, grama-batatais) e esporádicas plantas arbustivas e arbóreas, remanescentes ou espontâneas.

Solos

Completando o quadro do meio natural, a região de Ribeirão Preto se caracteriza por uma cobertura de solos derivados, em grande parte, do intemperismo atuante sobre rochas básicas (basaltos e diabásios).

Esses solos compreendem duas unidades principais: solos com horizonte B "latossólico" (Terra Roxa Legítima) e solos com horizonte B "textural" (Terra Roxa Estruturada) - segundo a classificação técnica apresentada pela Comissão Nacional de Solos (1960). Além dessas unidades, a região apresenta outras categorias de solos, porém, de distribuição mais restrita. Compreendem os solos aluviais e hidromórficos e os solos pouco desenvolvidos (Litossolos).

Geologia

A coluna estratigráfica representativa da área onde está situada a cidade de Ribeirão Preto, está adiante esquematizada.

Esta coluna foi obtida com base nos levantamentos geológico-estruturais efetuados até o presente, envolvendo ampla área da região Norte e Nordeste do Estado de São Paulo.

Grupos e Formações

Neste trabalho adotou-se a mesma terminologia proposta por Soares e Landim (1975). Desta forma, as unidades estratigráficas estão distribuídas em quatro Grupos distintos, a saber:

- Embasamento cristalino
- Grupo Paranã
- Grupo Tubarão Formação Aquidauana
 Formação Tatuí
- Grupo Passa Dois Formação Irati
 Formação Estrada Nova
- Grupo São Bento Formação Pirambóia
 Formação Botucatu
 Formação Serra Geral

Com exceção das rochas constituintes do Grupo Paranã, as demais unidades estratigráficas estão representadas na região de Ribeirão Preto.

Embasamento cristalino

As rochas do embasamento cristalino servem de arcabouço básico sobre o qual se assenta, discordantemente, o espesso pacote de rochas sedimentares distribuídas pelas unidades estratigráficas dos grupos Tubarão, Passa Dois e São Bento.

Grupo Tubarão

Representado pelas Formações Aquidauana e Tatuí.

Formação Aquidauana

Formação Aquidauana é constituída predominantemente por arenitos e diamictitos.

Os arenitos são as rochas mais comuns. Apresentam-se em corpos lenticulares e tabulares de grande extensão. Dominam arenitos de composição grosseira a muito fina com abundante matriz argilosa, cor vermelho tijolo ou marrom avermelhada. Estratificação cruzada de pequeno a médio porte, sendo porém comum o acamamento plano paralelo. Próximo a base da unidade encontra-se arenitos conglomeráticos.

Os diamictitos contêm seixos e matações em pequena proporção (5 a 15%), dominando a fração seixos. A espessura destes corpos atingem 30 metros, embora, frequentemente não ultrapassem 5 metros. Em direção ao topo do corpo o diamictito perde os seixos passando para lamito arenoso. Este lamito arenoso grada para silto-argiloso, as vezes intercalando camadas de argila com espessuras de 5 a 10 metros. Frequentemente o ciclo se repete.

Na região de Ribeirão Preto a Formação Aquidauana deve apresentar espessuras em torno de 300 a 400 metros.

Formação Tatuí

A Formação Tatuí é caracterizada por monótona sucessão de siltitos arenosos, de cor marrom, vermelho-tijolo, arroxeados, predominantemente maciços. Raramente apresentam laminação fina. Localmente ocorrem arenitos muito finos amarelo-esverdeado e brancos, numa espessura total inferior a 5 metros. Na região essa espessura chega a atingir 20 metros.

Grupo Passa Dois

Formação Irati

A Formação Irati consiste de folhelhos e argilitos cinza-escuros, folhelhos pirobetuminosos e calcários associados. Embora seja incerta a sua presença na região de Ribeirão Preto é provável que ocorra o calcário basal, com poucos metros de espessura, tal como em Olímpia no poço 01-1-SP perfurado pela Petrobrás.

Formação Estrada Nova

A Formação Estrada Nova é constituída por um pacote de arenitos, siltitos, folhelhos róseos, roxos interacamados, além de raros e delgados leitos calcáreos.

Na parte inferior há um intercamamento de lamitos e arenitos. Os arenitos tem granulação predominantemente fina a média, coloração dominante esbranquiçada e estratificação plana paralela. Intercalam-se finas camadas de arenito oolítico e sílex. A espessura desse pacote a renoso não ultrapassa 20 metros.

O pacote superior é essencialmente siltico com intercalações de folhelho. A coloração é violeta. Os siltitos são maciços e localmente laminados. Apresentam partição conchoidal ou em blocos irregulares e placas.

A espessura dessa Formação, na região, não deve exceder a 100 metros.

Grupo São Bento

Formação Pirambóia

Conforme redefinida por Soares (1973) a Formação Pirambóia é uma unidade mapeável independente, caracterizada por arenitos argilosos com intercalação de camadas de siltito e folhelho, de origem fluvial.

Seus arenitos apresentam granulação média a muito fina, raramente grosseira a muito grosseira, com muita matriz silto-argilosa (em média 20%); os grãos são subarredondados a angulosos e a esfericidade e regular a boa, geralmente mal selecionados. Apresentam acamamento plano paralelo e estratificação cruzada de pequeno a médio porte. Suas cores são amarela esbranquiçada e avermelhada. Camadas de siltito e argilito ou folhelho são raras, desde milimétricas até 1 metro.

A espessura desta unidade, na região, não deve ultrapassar 140 metros.

Formação Botucatu

A Formação Botucatu constitui uma unidade genética de ambiente desértico, segundo Soares (1973).

É constituído por arenitos de granulação fina a média, subsidiariamente com frações muito finas e grosseiras: o teor de lama (silte mais argila) é inferior a 10%, geralmente inferior a 5%. Os grãos tem bom arredondamento e boa esfericidade nas frações média e fina. Normalmente são foscos. Os grãos grosseiros ocorrem em níveis descontínuos, salientando a laminação.

Apresenta estratificação cruzada de grande porte. Na parte basal, localmente, ocorrem arenitos conglomeráticos. Em grande parte da área a Formação Botucatu apresenta cimento silicoso na parte superior. Segundo Paraguassu (1972) o processo é recente e a cimentação é efetiva da por precipitação de sílica em solução de água subterrânea. A silificação ocorre mais comumente em camadas de arenitos com pouca espessura, intercalados entre corpos magmáticos (derrames e sills).

Sua espessura não deve ultrapassar 80 metros na região de Ribeirão Preto.

Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é representada por rochas de composição basáltica originadas pela atividade magmática fissural concomitante a processos magmáticos subterrâneos que deram origem aos sills e diques de diabásios. Intercalados nessas rochas ou mesmo recobrimdo-as podem ocorrer camadas sedimentares arenosas, pertencentes à Formação Botucatu.

Petrograficamente, as rochas básicas da Formação Serra Geral, constituem-se essencialmente por plagioclásios cálcicos (andesina e la

bradorita) e clinopiroxênios (augita e pigeonita), associados a quantidades apreciáveis de minerais opacos (magnetita, ilmenita e titanomagnetita) além de ocasional olivina, hornblenda, apatita etc., como acessórios. Preenchendo vesículas e amígdalas encontram-se minerais secundários como os do grupo das zeólitas, quartzo, calcedônia, celadonita e calcita. Sinelli et al (1980) apresentam novos dados petrográficos e químicos destas rochas.

Estruturas

Falhas são as únicas estruturas observáveis na área de Ribeirão Preto. Elas parecem ter-se originado como consequência de um baixo estrutural ocorrido no embasamento cristalino e que repercutiu em toda sequência sedimentar a ele sobreposta, (Fig.8).

Tais falhas, em conjunto, parecem apresentar disposições em mosaico, com leve predominância para uma orientação circular e radial, como pôde ser delineado durante a elaboração do mapeamento geológico da região.

Discordâncias

Os contatos entre as Formações Aquidauana e Tatui, Tatui e Irati e, finalmente, Estrada Nova e Pirambóia representam superfícies de discordância.

Diques e sills de diabásio são encontrados em toda sequência sedimentar da Bacia do Paraná.

Os sills se alojaram preferencialmente ao longo de superfícies de descontinuidade físicas representadas pelos contatos entre Formações diferentes, no caso, entre as Formações Estrada Nova e Pirambóia e Pirambóia e Botucatu, conforme pode ser observado na coluna estratigráfica e, esquematicamente, na Fig.8.

Outros corpos intrusivos com geometria mais complexa e de amplitude variáveis podem ser localmente encontrados, não somente nos contatos entre Formações mas, também, inseridos nelas. Tal ocorre na Formação Botucatu dentro do Município de Ribeirão Preto, tornando bastante complexa a geometria do aquífero nesta área.

II - GEOFÍSICA

O problema fundamental para a hidrogeologia da área de Ribeirão Preto é o de se estabelecer a geometria e as características hidráulicas do aquífero da Formação Botucatu. A aplicação dos métodos geofísicos foi orientada no sentido de fornecer esses dados.

Felizmente, a Formação Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral que a recobre, apresentam parâmetros físicos como densidade, resistividade elétrica, suscetibilidade magnética, bem distintos, o que permite a aplicação dos métodos gravimétrico, elétrico e magnético no levantamento hidrogeológico. A experiência, no entanto, indica que os dois primeiros são os mais convenientes, por fornecerem resposta mais apropriada e também pelo baixo custo operacional.

Gravimetria

Um levantamento detalhado da área urbana de Ribeirão Preto, no interior do anel viário, permitiu traçar o mapa Bouguer e, pelo método de Griffin, o mapa residual (Fig.9) no qual deve repousar a interpretação.

Os mapas Bouguer original e o residual permitiram o traçado de certas zonas de falhamentos previstas na foto-interpretação. O mais importante desse mapa é que reflete a distribuição espacial dos basaltos/diabásios. Em princípio, onde essas rochas se espessam, a anomalia deve ser mais alta do que onde as mesmas se adelgaçam. Essa hipótese só é verdadeira se o embasamento cristalino se apresentar relativamente plano, litologicamente uniforme e profundo. Essa hipótese parece verdadeira quando se considera os mapas de superfície de tendência Bouguer.

Métodos elétricos

Utilizou-se a sondagem elétrica, com dispositivo "Schlumberger"

com AB=400, 800 e até 4.000m. Grande parte das sondagens elétricas, foi aplicada sobre basaltos/diabásios e apenas algumas sobre os arenitos da Formação Botucatu.

Na interpretação das curvas de resistividade obtidas com as sondagens elétricas foi possível distinguir: a) solo, b) basalto/diabásio alterado, c) basalto/diabásio inalterado, d) arenito Botucatu e Formação pré-Botucatu, e) embasamento cristalino.

Não se procurou fixar a posição do embasamento cristalino na maioria das sondagens elétricas.

III - INTERPRETAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A temperatura das águas em torno de 25°C, é praticamente homogênea para todas as amostras enquanto o pH varia de 5.6 a 8.3. A maioria dos valores de pH se situam entre 6 e 6.5 ou seja, são valores considerados normais para águas que percolam arenitos, basaltos e diabásios. Os poços situados a Oeste da cidade de Ribeirão Preto (Sertãozinho e Barrinha) apresentam pH superior a 7. Estudo dos equilíbrios químicos mostram que esses valores estão relacionados como sentido de circulação da água subterrânea, de Leste para Oeste.

Todas as amostras são pouco mineralizadas apresentando valores que vão de 25mg/l a 170mg/l, refletindo um enriquecimento também no sentido Leste-Oeste. A condutividade elétrica apresenta o mesmo comportamento ou seja, há um aumento dos valores no sentido Leste-Oeste que vão de 20umho/cm a 165umho/cm.

Em todas as amostras os teores de alcalinos terrosos são superiores a dos alcalinos ou seja: $Ca^{2+} + Mg^{2+} > Na^{+} + K^{+}$.

Dos anions analisados o HCO_3^{-} é dominante. Apresenta uma variação de 10 a 100mg/l e, como o Ca^{2+} , seu teor é crescente no sentido Leste-Oeste.

Com relação aos anions NO_3^{-} e Cl^{-} , seus valores são muito baixos. Ambos apresentam concentrações variando de 0,02 a no máximo 10,20mg/l. A análise dos anions NO_3^{-} e Cl^{-} torna-se muito importante no momento por evidenciar áreas de contaminação do aquífero.

Quanto a sílica verifica-se que, nos poços que apresentam como litologia o arenito Botucatu, os valores são da ordem de 8,5mg/l, enquanto que nas águas que percolam os basaltos os valores se apresentam elevados (30 a 31mg/l).

As figuras 10 e 11 apresentam as variações sazonais da composição química das águas subterrâneas nas diferentes baterias de poços. De uma maneira geral essas variações são pequenas. Entretanto, nota-se que no mês de julho as diferenças são sensíveis. Os teores em sílica e CO_2 livre diminuem enquanto os de alcalino-terrosos se elevam. Essas diferenças provavelmente estão ligadas à variações no equilíbrio químico relacionadas ao tempo de percolação das águas subterrâneas.

A figura 12 apresenta os valores químicos sazonais obtidos das águas de chuvas na região de Ribeirão Preto de dezembro/77 a dezembro/78. É interessante notar que os valores baixos são relativos às estações secas. Os valores mais elevados, nas estações da primavera e verão, coincidem com a época da preparação dos terrenos (aração) para o plantio. Em consequência a atmosfera torna-se carregada de partículas (poeira) argilosas que são ricas em alcalino-terrosos.

Do ponto de vista de qualidade da água subterrânea verifica-se que são águas bicarbonatadas com baixos teores em alcalinos e alcalino-terrosos. São de qualidade muito boa ao consumo humano, uma vez que todos os cátions e anions analisados apresentam valores abaixo dos limites fixados pela A.W.W.A.

Entretanto alguns índices, revelados nas análises de nitratos e cloretos, merecem maior reflexão no tocante à conservação da qualidade destas águas.

Um exame acurado com relação aos teores de nitrato (NO_3^{-}) e cloreto (Cl^{-}) mostra que, num período de 10 anos, houve um aumento considerável destes anions. Esses mesmos elementos não haviam sido detectados em 1968; em 1974 houve um aumento relativo em alguns poços e, em 1978, o aumento foi contínuo nos mesmos poços.

As altas concentrações de nitrato em águas de poços podem estar relacionadas a contaminação por águas superficiais (fluviais) e pode

ser indicativo da necessidade de análises contínuas para bactérias patogênicas nas águas de consumo humano. As concentrações maiores que 45mg/l (que ainda não é o caso de Ribeirão Preto pois os valores mais elevados foram da ordem de 10,0mg/l) são indesejáveis face ao perigo letal que expõe os recém-nascidos, por seu efeito tóxico e provocador da doença denominada Cianose. Crianças e adultos não sofrem o perigo.

A presença de nitrato em águas subterrâneas é ainda considerada como indicativo de contaminação por esgotos públicos. Paralelamente esta indicação é proporcional aos aumentos verificados nos teores de cloratos e desse modo, a existência desses anions tornam-se indícios seguros da contaminação das águas subterrâneas por esgotos públicos.

As análises químicas demonstraram que houve um aumento relativo dos anions cloreto e nitrato em alguns poços. Suas localizações praticamente junto aos principais córregos da cidade, revelam a fonte de suas contaminações.

Do ponto de vista estrutural, Sinelli (1971), comprovou que toda drenagem na região N-NE do Estado de São Paulo está condicionada às rupturas existentes nas rochas ígneas (basaltos e diabásios). Os esforços que provocaram o aparecimento dessas rupturas foi predominantemente de tensão e como consequência são fraturas abertas o que permite uma boa inter-comunicação entre elas.

Os estudos isotópicos realizados por Gallo e Sinelli (inédito) comprovaram que, na região de Ribeirão Preto, o aquífero se comporta como não confinado, indicando uma velocidade de recarga maior que nas regiões de aquífero confinado.

Nessas condições verifica-se estar realmente ocorrendo um início de contaminação, junto aos poços localizados nas proximidades dos córregos municipais.

IV - REGIME FLUVIOMÉTRICO

A região estudada compreende às sub-bacias referidas pelo DAEE-DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA do Estado, como 3B-4 e 3B-5, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Pardo. Esta região, aqui constantemente referida como a bacia hidrográfica do Rio Pardo, é a considerada como a área de controle (3674 km²), na qual este estudo está baseado.

Os dados fluviométricos da região correspondem às diferenças entre os dados anuais observados no Posto Desengano e no Posto Fazenda Corredeira.

Assim, para aquela área de controle, o escoamento total anual médio Q e seus componentes R e I, avaliados por diferença, são:

- escoamento total, Q = 338,6mm
- escoamento superficial, R = 99,8mm
- escoamento subterrâneo, I = 239,8mm

Como se observa dos dados acima, o escoamento subterrâneo da região de Ribeirão Preto representa 70,8% do escoamento total Q, e 16,6% da precipitação pluviométrica P, indicando, portanto, tratar-se de uma região de porosidade e permeabilidade consideráveis.

V - AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Na região de Ribeirão Preto, a partir do embasamento pré-Cambriano, as possibilidades aquíferas são procedentes das Formações Aquidauana, Irati, Estrada Nova, Pirambóia, Botucatu, Serra Geral e Sedimentos Cenozóicos.

A Formação Aquidauana, representada por seus sedimentos arenos-argilosos, deve constituir um excelente aquífero. Todavia, ainda não foi definitivamente confirmada sua existência na região. Sabe-se, pelos mapeamentos efetuados que sua área de recarga está situada a leste de Ribeirão Preto (região de São Sebastião do Paraíso - MG.).

Sobre as Formações Irati e Estrada Nova assentam-se, discordantemente, os arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia que constituem, na realidade, o sistema aquífero mais importante de toda Bacia Sedimentar do Paraná. A espessura destas formações, na região de Ribeirão Preto, se situa em torno de 220 metros, havendo amplas variações locais ocasionadas por perturbações de rochas básicas intrusivas.

A área de recarga do Aquífero Botucatu-Pirambóia, na região, é de aproximadamente 1440 km².

Acima destas unidades litológicas que constituem o sistema Aquífero Botucatu-Pirambóia, assentam-se, concordante e discordantemente, as rochas básicas da Formação Serra Geral (basaltos e diabásios) que se caracterizam como aquíferos pela presença de porosidade fissural motivada pelo alto grau de diaclasamento apresentado por elas, formando, assim, uma complexa estrutura em mosaicos com fraturas e falhas preenchidas ou não por diques de diabásio. Devido a tal complexidade, o comportamento das Formações Pirambóia e Botucatu, como um sistema aquífero, varia bastante, de ponto para ponto, na região de Ribeirão Preto.

Posteriormente à Formação Serra Geral encontram-se, localizados, depósitos conglomeráticos, areno-argilosos, aluvionares de idade cenozoica. Estes depósitos dão origem a aquíferos não confinados, bons produtores embora com distribuição localizada, que deverão ser colocados como reservas a serem estudadas futuramente.

Sistema Aquífero Botucatu-Pirambóia

Na área correspondente à folha de Ribeirão Preto (180 km²), este sistema aquífero apresenta comportamento confinado, em sua maior extensão. Isto é caracterizado, principalmente, onde ocorrem espessuras mais elevadas de rochas básicas (acima de 70 metros) bastante densas, as quais impõem ao aquífero uma alta pressão litostática. Este fato é evidenciado nos bairros de Ribeirânia, Jardim América, City e Jardim Recreio, onde se situam as áreas mais complexas, do ponto de vista hidrogeológico. Desse modo o Aquífero Botucatu-Pirambóia não apresenta comportamento homogêneo, variando, sobremaneira, seus parâmetros hidrodinâmicos, de ponto para ponto. Assim, o método que se revelou mais adequado para interpretar a estrutura geológica responsável pela complexidade do aquífero, foi o geofísico-gravimétrico.

Alimentação

A alimentação (recarga natural) do aquífero Botucatu-Pirambóia, nos 180 km² considerados, processa-se através da infiltração direta, a partir das precipitações, nas áreas onde o mesmo aflora (36 km²). Nessas áreas, de solo arenoso e relevo suave, a porosidade e a permeabilidade são bastante altas. Portanto, tendo em vista estes fatos e, ainda, o caráter regular e sazonal das precipitações, com máximas no verão (outubro a março) e mínimas no inverno (abril a setembro), pode-se assegurar que o aquífero em questão é bem recarregado em toda época chuvosa do ano.

Para o cálculo relativo à alimentação, admite-se que o aquífero esteja em aproximado equilíbrio dinâmico, isto é, considera-se que o volume de água que se infiltra anualmente seja equivalente ao volume anual do escoamento subterrâneo natural. Este escoamento se verifica, de um modo geral, de leste para o oeste, com uma frente de escoamento L, na direção geral norte-sul, de aproximadamente 13,4 km de largura e com um gradiente hidráulico médio, $i = 6\text{m/km}$, obtido através do mapa piezométrico e, ainda, com um valor médio da transmissividade, $T = 26,5\text{ m}^2/\text{h}$, obtido através de testes de aquífero (método de JACOB) e método isotópico.

Assim, foi possível a determinação da média do escoamento natural Q_{en} , do aquífero, pela aplicação da lei de Darcy ($Q_{en} = TiL$):

$$Q_{en} = 26,5 \times 365 \times 24 \times 6 \times 10^{-3} \times 13,4 \times 10^3 = 18,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Portanto, o volume médio de escoamento natural V_{en} , do aquífero, o qual corresponde à quantidade de água que se infiltra anualmente, será, pois, de 18,7 milhões de metros cúbicos, no âmbito dos 180 km² da folha de Ribeirão Preto.

Considerando-se a distribuição da precipitação pluviométrica média anual de 1447,9 mm, tem-se que o volume médio V_{pr} , precipitado anualmente sobre a área de recarga corresponde à folha de Ribeirão Preto, é aproximadamente:

$$V_{pr} = 36 \times 10^6 \times 1,4479 = 52 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Deste modo, pode-se calcular a taxa média de infiltração T_i , em relação à precipitação sobre a área de recarga, no domínio da folha de Ribeirão Preto, através da expressão:

$$T_i = \frac{V_{en}}{V_{pr}} \times 100 = \frac{18,7 \times 10^6}{52 \times 10^6} \times 100 = 36\%$$

Trata-se, portanto, de uma taxa de infiltração muito elevada, indicando uma alta potencialidade do aquífero. Com efeito, considerando que o escoamento subterrâneo específico seja definido como Q_{en}/A , tem-se, para cada km^2 de área aflorante do aquífero, uma infiltração anual de aproximadamente 500mm, no domínio da folha de Ribeirão Preto.

Características dimensionais e hidrodinâmicas

Sab-se que a área de afloramento do sistema anterior estudado é de $36 km^2$ ocupando, portanto, 20% da área total da folha de Ribeirão Preto, o outro sistema de aquífero acumulado sob pressão de rochas básicas sobrepostas abrange a área restante de $144 km^2$, representando pois, 80% da área em estudo.

Embora não tenha sido possível a confecção de um mapa de iso-espessura do Aquífero Botucatu-Pirambóia, nos $180 km^2$ considerados, isto devido a quase inexistência de poços totalmente penetrantes no aquífero, foi possível estimá-la, com relativa aproximação, através dos estudos geofísicos (sondagens elétricas) e do mapeamento geológico. Assim, tem-se uma espessura de ordem de 180 metros para o aquífero, na área onde o mesmo apresenta-se livre, e de cerca de 220 metros, na área de confinamento.

Os valores relativos à transmissividade T , do aquífero, foram determinados através de testes de aquífero e através de estudos isotópicos, obtendo-se os seguintes resultados:

$T = 11,79 m^2/h$	(Jardim Recreio)
$T = 37,59 m^2/h$	(Rua Parã)
$T = 44,27 m^2/h$	(Usina São Martinho)
$T = 12,60 m^2/h$	(método isotópico)

Assim, tem-se, nos $180 km^2$ considerados, um valor médio para a transmissividade, $T = 26,5 m^2/h$.

Este pequeno número de dados reflete que o Aquífero Botucatu-Pirambóia apresenta um aumento da transmissividade no sentido geral oeste, na região estudada.

Embora tenha-se calculado um valor global médio para a transmissividade da região, torna-se de fundamental importância que em todos os novos poços construídos, esse cálculo seja efetuado com dados de testes de aquífero bem conduzidos, de modo que se possa traçar um mapa de transmissividade para os $180 km^2$ de interesse imediato.

Quanto ao coeficiente de armazenamento S , não houve condições de determiná-lo, pois, nenhum teste de aquífero fora efetuado, durante os trabalhos de levantamento de dados de campo, com auxílio de poços piezométricos, devido ao funcionamento ininterrupto dos atuais dispositivos de captação que suprem a demanda de água da cidade de Ribeirão Preto.

Portanto, em que pese a heterogeneidade do aquífero, achou-se por bem adotar como valor médio, a média dos valores do coeficiente de armazenamento estimados para Ribeirão Preto e Sertãozinho (DAEE; 1976), isto é, $S = 1,2 \times 10^{-4}$.

Os valores da porosidade eficaz ou coeficiente de restituição u , dos arenitos das Formações Botucatu-Pirambóia, foram determinados em laboratório em amostras coletadas nas áreas de afloramento. Os valores obtidos variaram de 13 a 15%, ou seja, $1,3 \times 10^{-1}$ a $1,5 \times 10^{-1}$.

Reservas permanentes

As reservas permanentes ou passivas W_{rp} , correspondem aos volumes de água de saturação W_{as} , armazenados no sistema aquífero e, portanto, suscetíveis de serem restituídos por gravidade, mais o volume

de água acumulada W_{ap} , sob pressão, ou seja $W_{rp} = W_{as} + W_{ap}$.

O volume de água de saturação W_{as} , é igual ao produto do volume da camada saturada W_{cs} , pelo coeficiente de restituição u , isto é:

$$W_{as} = W_{cs} \times u$$

O volume de água acumulada sob pressão W_{ap} , é igual ao produto da área com água sob pressão A , pela altura correspondente à carga hidráulica h , e pelo coeficiente de armazenamento S , ou seja $W_{ap} = AhS$.

Então, as reservas permanentes ou passivas W_{rp} , serão calculadas para os 180 quilômetros quadrados considerados, como segue:

$$\begin{aligned} W_{rp} &= W_{as} + W_{ap} = (W_{cs} \times u) + AhS = \\ &= 1,3 \times 10^{-1} (36 \times 10^6 \times 180) + (144 \times 10^6 \times 220) + \\ &+ 1,2 \times 10^{-4} (144 \times 10^6 \times 270) = 4,97 \times 10^9 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Portanto, tem-se para o aquífero Botucatu-Pirambóia, na área de 180 km² correspondente à folha de Ribeirão Preto, uma reserva permanente de, praticamente, 5 bilhões de metros cúbicos.

Reservas explotáveis

A quantidade de água capaz de ser explotada sem o perigo de haver desequilíbrio hidrodinâmico, nos 180 quilômetros quadrados considerados, corresponde à quantidade de água que representa a infiltração anual, isto é, 18,7 milhões de metros cúbicos.

De acordo com os dados demográficos fornecidos pelo DAERP, a demanda de água para o Município de Ribeirão Preto, está assim prevista:

ANO	POPULAÇÃO (hab.)	DEMANDA (m ³ /ano)
1979	300 000	36,0 x 10 ⁶
1980	350 000	41,6 x 10 ⁶
1990	450 000	53,4 x 10 ⁶
2000	600 000	71,2 x 10 ⁶

Percebe-se que a demanda atual, mantendo-se o sistema equilibrado, já é bem superior à quantidade de água capaz de ser explotada.

Todavia, considerando o progressivo aumento da demanda, costuma-se dispor de até 1/3 das reservas permanentes, desde que seja programada uma explotação racional dessas reservas, de modo que não se provoquem acentuados rebaixamentos na superfície piezométrica do aquífero.

Admitindo que a explotação seja efetuada nos 144 km², onde o aquífero está encoberto pelas rochas básicas aflorantes, e que a demanda seja atendida até o ano 2000, tem-se um rebaixamento generalizado na superfície piezométrica, da ordem de 53,6 metros, o que representa a penetração de 3,6 metros abaixo do teto da formação aquífera sob confinamento.

Nestas condições, pode-se adotar como reservas explotáveis, na área correspondente à folha de Ribeirão Preto, toda água acumulada sob pressão ($144 \times 10^6 \times 270 \times 1,2 \times 10^{-4}$) mais um certo volume de água de saturação ($144 \times 10^6 \times 3,6 \times 1,3 \times 10^{-1}$), isto é, 72 milhões de metros cúbicos ou 1% das reservas permanentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O aquífero estudado, Botucatu-Pirambóia, apresenta um comportamento não homogêneo na folha de Ribeirão Preto, face principalmente às condições tectônicas, falhas e fraturas bem como a grande incidência das intrusivas básicas.

Nessas condições o aquífero se apresenta não confinado na parte leste (36 km²) e confinado no restante (144 km²) da folha de Ribeirão Preto-SE-

- A geometria do aquífero em vista das feições geológicas e tectônicas dominantes é bastante complexa apresentando um grande número de blocos altos e baixos dando uma impressão de tectônica em mosaico.

A espessura do aquífero é muito variável. A superfície do topo e da base da Formação Botucatu-Pirambônia é bastante irregular em virtude, principalmente, da grande ocorrência de diabásios.

A estrutura geral do aquífero na folha de Ribeirão Preto é de uma grande depressão, o que pode ser verificado pelos mapas de piezometria e gravimetria.

- Os parâmetros hidrodinâmicos apresentam também variações locais. Os valores de transmissividade (T) crescem no sentido Leste-Oeste apresentado na folha de Ribeirão Preto valores que vão desde 11,79 m²/h a 44,27 m²/h. O valor médio encontrado, por meio isotópico, foi de 12,60 m²/h que serve como parâmetro médio para a bacia hidrográfica do rio Pardo.

A alimentação do aquífero processa-se através de infiltração direta a partir das precipitações sendo de 18,7 milhões de metros cúbicos a água que se infiltra anualmente nos 180 km² da folha de Ribeirão Preto - SE.

O escoamento subterrâneo natural se verifica no sentido Leste-Oeste com uma frente de 13,4 km e um gradiente hidráulico i, de 6m/km.

Apresenta uma alta taxa de infiltração 500mm/km² o que indica a alta potencialidade do aquífero.

- Quanto às reservas os valores obtidos indicaram no âmbito da folha de Ribeirão Preto:

a) Reservas Permanentes = $4,97 \times 10^9 \text{ m}^3$

b) Reservas Temporárias = $18,7 \times 10^6 \text{ m}^3$

c) Reservas exploráveis:

c_1 - ideal = $18,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$

c_2 - total = $72,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$

Verificamos pelos dados demográficos fornecidos pelo DAERP para os anos 1979, 1980, 1990 e 2000 que já estamos consumindo mais água ($36 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$) em relação à recarga anual na folha. Entretanto como se admite um aproveitamento de até 1/3 das reservas permanentes nota-se que a demanda projetada para o ano 2000 ($71,6 \times 10^6 \text{ m}^3$) poderá ser atendida.

- A qualidade da água é muito boa, apresenta entretanto um pH ácido que varia de 5,0 a 5,5 no aquífero não confinado a 5,5 - 6,5 no aquífero confinado. Apresenta também, de maneira geral, um elevado valor de anidrido carbônico livre (agressivo). Estes valores determinam a não utilização de filtros de chapa de ferro ou de qualquer outro material facilmente corrosível.

No tocante à poluição dos aquíferos, especial cuidado deve ser tomado em relação ao aquífero não confinado devendo ser objeto de estudo a localização de novas indústrias bem como, realizar um acompanhamento sistemático dos produtos residuais das indústrias já existentes.

Com relação aos poços produtores junto às redes de drenagem um cuidado todo especial deve ser dado. Verificou-se em todos esses poços um aumento considerável da presença de nitratos e cloretos o que indica contaminação por esgotos. Os valores encontrados ainda não são alarmantes entretanto, como medida preventiva, o ideal seria a desativação desses poços bem como evitar a construção de novos poços junto às drenagens.

Em virtude de estar a zona de alimentação do aquífero situada em região de intensa atividade agrícola (cana-de-açúcar) e que apresenta uma taxa anual de inseticidas da ordem de 2 kg/hectare, é conveniente efetuar semestralmente, como prevenção, a análise química das águas subterrâneas visando detectar a presença de inseticidas clorados.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (auxílio 78/1635) e ao Departamento de

Águas e Esgotos de Ribeirão Preto que tornaram possível este trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- Castany, G. - 1968 - *Prospection et exploitation des eaux souterraines*. S.A. DUNOD, Paris, 660 p. .
- Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) - 1974 - *Estudo de Águas Subterrâneas - V. I e V. II*.
- Gallo, G. & Sinelli, O. - (no prelo) - *Estudo hidroquímico e isotópico das Águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto (S.P.)*.
- Gonçalves, N.M.M. - 1978 - *Estudo dos materiais superficiais da Região de Ribeirão Preto - S.P., e suas relações com elementos morfológicos da paisagem - Tese de Mestrado - USP. - 177p. .*
- Paraguassu, A.B. - 1972 - *Experimental Silicification of Sandstone* Geol. Soc. Am. Bull. 83: 2853-2858.
- Sinelli, O. - 1970 - *Geologia e Água Subterrânea no Município de Ribeirão Preto e adjacências - Tese de doutoramento - FFCLRP. - 116p. .*
- Sinelli, O. - 1971 - *Considerações gerais sobre a tectônica no Município de Ribeirão Preto. Anais do XXV Congr. Bras. Geol. 2: 145-152p. - São Paulo.*
- Sinelli, O. - 1980 - (no prelo) - *Rochas básicas da Formação Serra Geral na região NNE do Estado de São Paulo.*
- Soares, P.C.; Sinelli, O.; Penalva, F.; Wernick, E.; Souza, A. & Castro, P.R.M. - 1973 - *Geologia do Nordeste do Estado de São Paulo. Anais do XXVII Congresso Bras. Geol., 1: 209-236, Aracajú - Se.*
- Soares, P.C. & Landim, P.M.B. - 1975 - *Comparison between the tectonic evolution of the intracratonic and marginal basins in South Brazil. An. Acad. Bras. Ciênc., vol. 48 (supl.): 313-324.*
- Thorwthwaite, C.W. & Mather, J.R. - 1955 - *The water balance. Publication in climatology. Drexel Institute of Technology, Centerton, N. Jersey, 8 (1): 104. .*
- Villela, S.M. & Mattos, A. - 1975 - *Hidrologia Aplicada. São Paulo, Mc Graw-Hill Book Company, 664p. .*

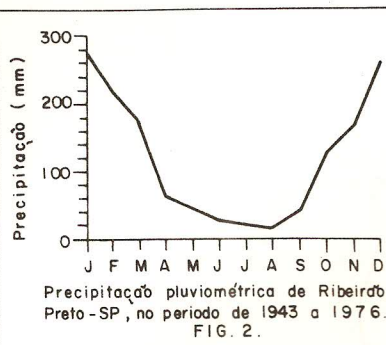


FIG. 2.

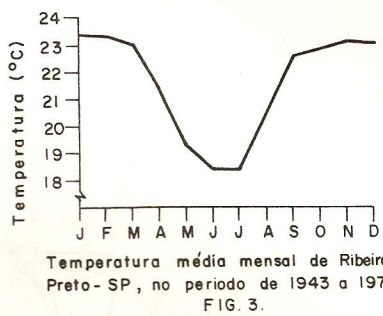


FIG. 3.

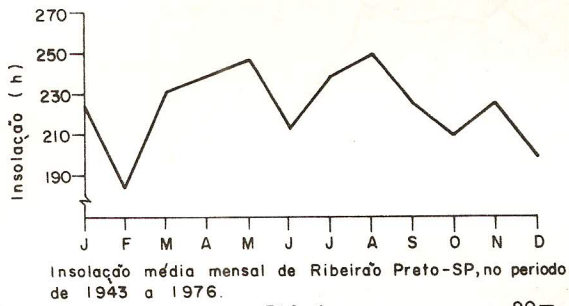


FIG. 4.

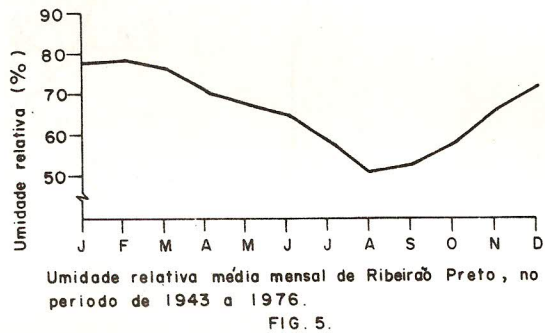


FIG. 5.

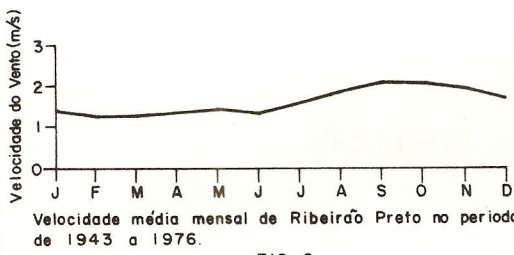


FIG. 6.

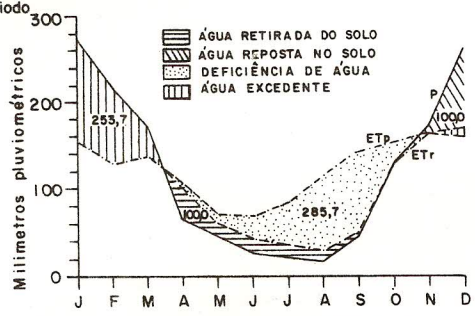


FIG. 7. Cursos anuais da precipitação pluviométrica, P, da Evapotranspiração Potencial, ETp, (método de PENMAN) da Evapotranspiração Real, ETr, (método de THORNTHWAITE & MATHER) e da disponibilidade de água no solo de Ribeirão Preto no Período de 1943 a 1976.

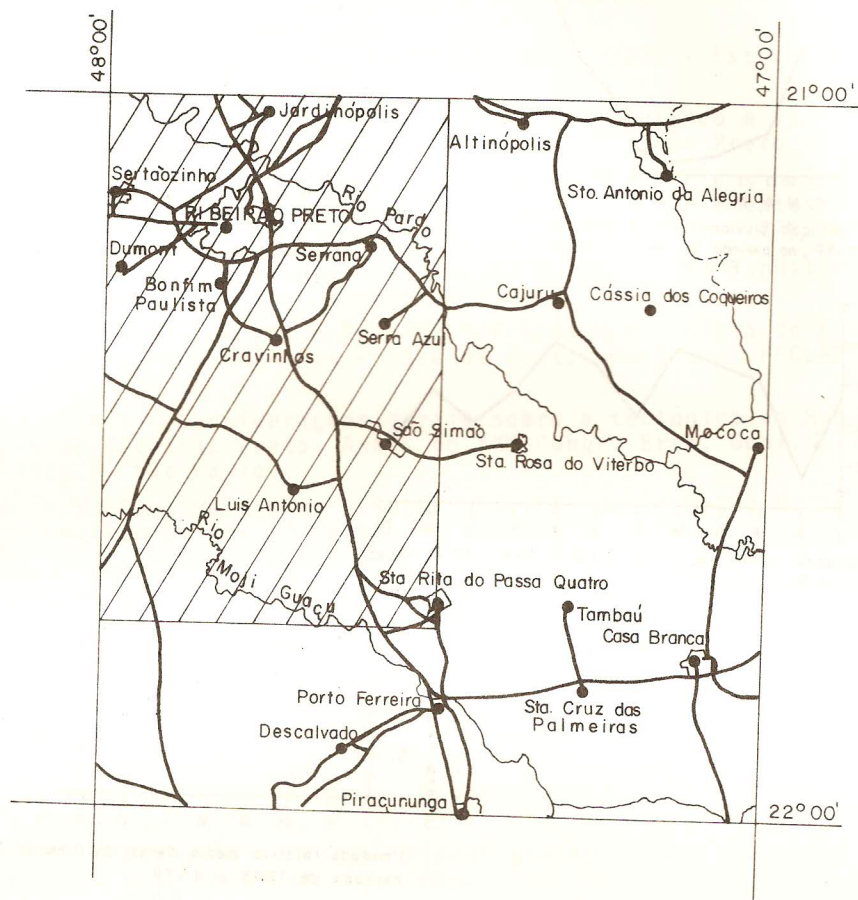






FIG. 1 — PLANTA DE SITUAÇÃO

LEGENDA

-  RIOS
-  ESTRADAS
-  CIDADES
-  AREA APROXIMADA DAS PESQUISAS

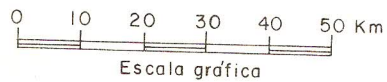
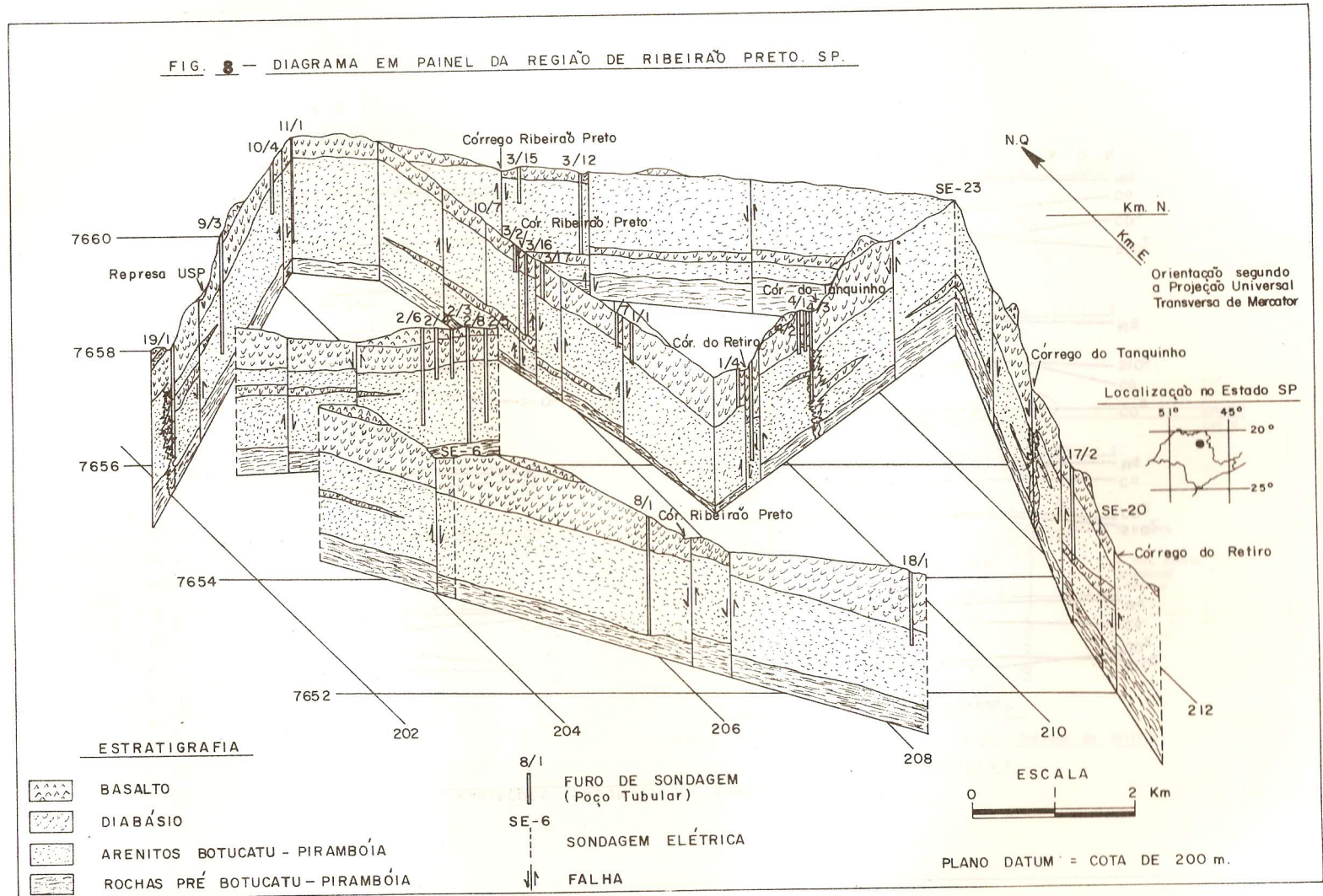


FIG. 8 — DIAGRAMA EM PAINEL DA REGIÃO DE RIBEIRÃO PRETO, SP.



VARIAÇÕES SAZONAIS NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

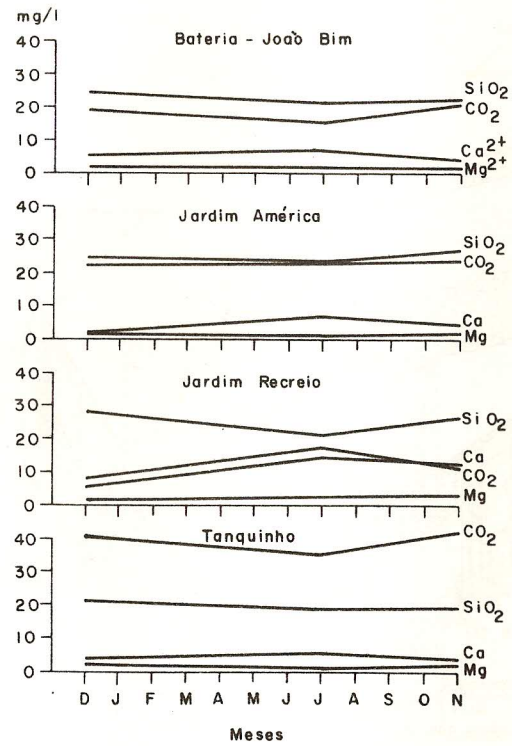


FIG. 10.

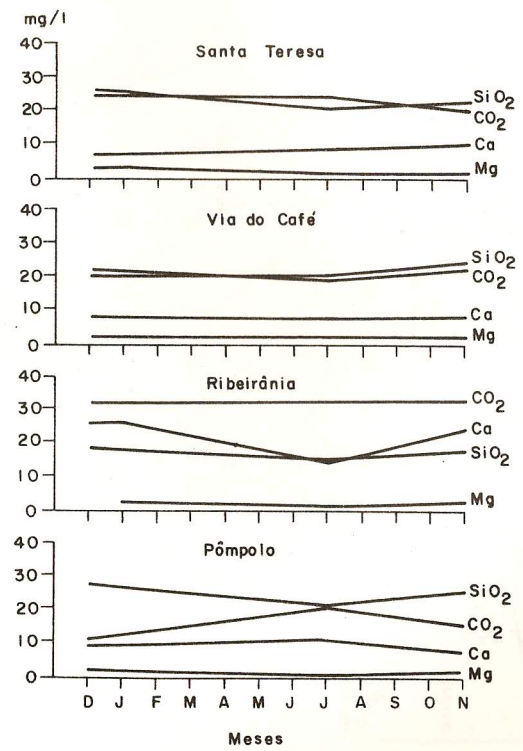


FIG. 11.

VARIAÇÃO SAZONAL COMPOSIÇÃO QUÍMICA
ÁGUA DE CHUVA

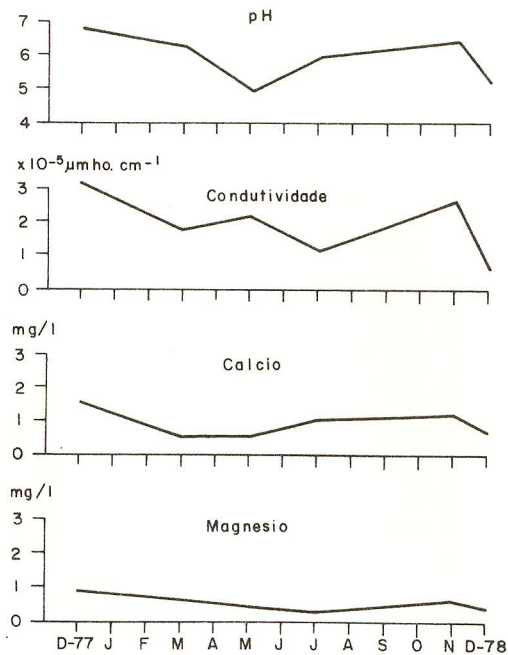


FIG. 12.

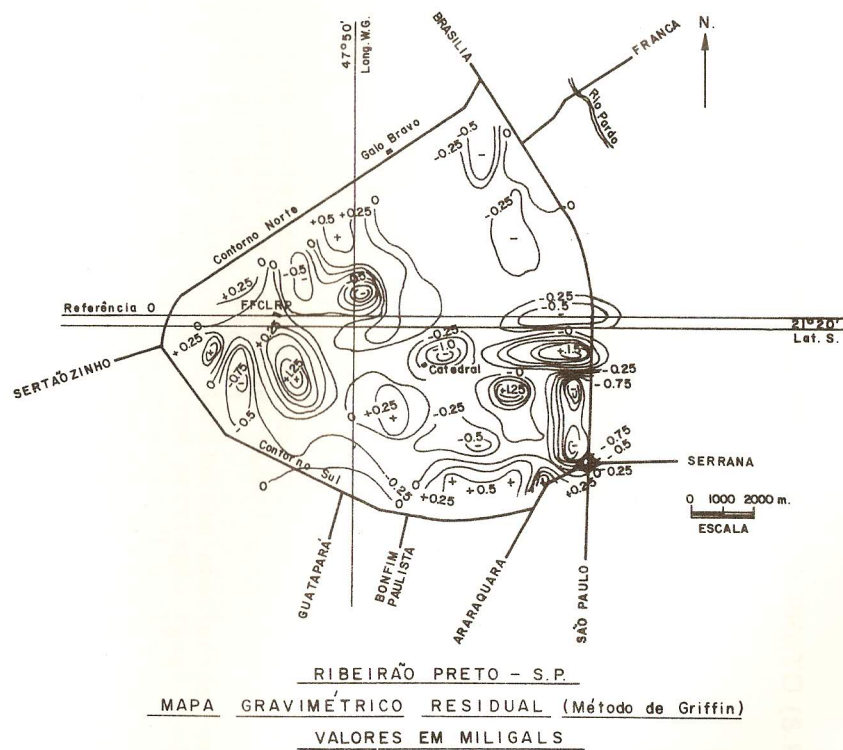


FIG. 9.