UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005446

RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DA BACIA DO PARANÁ

ANÁLISE DE PRÉ-VIABILIDADE

ALDO DA CUNHA REBOUÇAS

Tese apresentada ao concurso de Livre Docência nas disciplinas da área de Hidrogeologia do Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

SÃO PAULO - BRASIL
1 9 7 6

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
A - <u>A ÁREA DE ESTUDO, DEFINIÇÃO DE PROPÓSITOS. METODOLOGIA</u>	2
B - <u>AGRADECIMENTOS</u>	6

CAPÍTULO II

ELEMENTOS FISIOClimáticos	8
A - <u>QUADRO CLIMÁTICO</u>	9
1 - <u>PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL</u>	9
2 - <u>DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS DURANTE O ANO E VARIABILIDADE INTER-ANUAL</u>	12
3 - <u>FREQUÊNCIA E INTENSIDADE DAS PRECIPITAÇÕES</u>	13
4 - <u>OUTROS PARÂMETROS DO CLIMA</u>	15
B - <u>QUADRO FISIOGRAFICO</u>	16
C - <u>HIDROGRAFIA E REGIME DOS RIOS</u>	19
1 - <u>HIDROGRAMAS DOS RIOS</u>	21
2 - <u>CURVAS DE DEPLEÇÃO</u>	22

CAPÍTULO III

CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS	29
A - <u>QUADRO GEOLÓGICO</u>	30
1 - <u>FEIÇÕES LITOESTRATIGRÁFICAS</u>	30
2 - <u>FEIÇÕES TECTONO-ESTRUTURAIS</u>	38

B - <u>AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</u>	40
1 - <u>CONCEITOS FUNDAMENTAIS</u>	41
2 - <u>OS AQUÍFEROS PRINCIPAIS</u>	45
2.1 - <u>O SISTEMA BAURU - CAIUÁ</u>	47
2.2 - <u>AS ZONAS AQUÍFERAS DA</u> <u>FORMAÇÃO SERRA GERAL</u>	52
2.3 - <u>O SISTEMA AQUÍFERO BOTU-</u> <u>CATU</u>	61
C - <u>AVALIAÇÃO DAS RESERVAS</u>	68
1 - <u>ASPECTOS FUNDAMENTAIS</u>	68
2 - <u>RESERVAS REGULADORAS</u>	71
2.1 - <u>AQUÍFERO BOTUCATU</u>	72
2.2 - <u>AQUÍFERO BAURU</u>	74
3 - <u>RESERVAS PERMANENTES</u>	75
3.1 - <u>AQUÍFERO BOTUCATU</u>	76
3.2 - <u>AQUÍFERO BAURU</u>	77
4 - <u>RECURSOS EXPLORÁVEIS</u>	77

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DIMENSIO- NAIS E HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BO- TUCATU	83
A - <u>ASPECTOS METODOLÓGICOS</u>	84
B - <u>ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA</u>	88
1 - <u>SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA PROFUN-</u> <u>DIDADE DA BASE DO SISTEMA AQUÍFERO</u> <u>BOTUCATU</u>	88
2 - <u>SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA ESPESSU-</u> <u>RA AQUÍFERA</u>	90

3 - <u>SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA ESPESSURA DO BASALTO</u>	92
4 - <u>SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSIVIDADE ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)</u>	92
5 - <u>SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA VAZÃO ESPECÍFICA ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)</u>	94
6 - <u>SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DO m^3 DE ÁGUA SUBTERRÂNEA</u>	96

CAPÍTULO V

CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E CUSTOS DE LAVRA	100
A - <u>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS DAS CAPTAÇÕES</u>	101
1 - <u>FUNDAMENTOS PARA O PROJETO E CONSTRUÇÃO DOS POÇOS</u>	102
2 - <u>CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BOMBAS</u>	105
B - <u>AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DO m^3 DE ÁGUA</u>	109
1 - <u>ELEMENTOS DE BASE PARA OS CÁLCULOS</u>	109
1.1 - <u>CUSTO DE CONSTRUÇÃO DOS POÇOS</u>	109
1.2 - <u>CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS</u>	112
1.3 - <u>DESPESAS DE BOMBEAMENTO</u>	113
1.4 - <u>DESPESAS DIVERSAS</u>	116
2 - <u>CUSTOS DE PRODUÇÃO DO m^3 DE ÁGUA</u>	116
C - <u>ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PRÉ-VIABILIDADE</u>	117
D - <u>ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA EXPLORAÇÃO</u>	123

E - PERSPECTIVAS DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 126

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES 132

BIBLIOGRAFIA 138

FIGURAS

Figura 1	- Mapa de localização da Bacia do Paran�	3
Figura 2	- Isoietas e distribui�o da pluviometria anual (1931-1960)	11
Figura 3	- Traços gerais da hipsometria e hidrogr�fia - hidrogramas t�picos	18
Figura 4	- Curvas de deple�o características	25
Figura 5	- Feições litoestratigráficas e hidrogeológicas	32
Figura 6	- Principais elementos tectono-estruturais	35
Figura 7	- �rea de afloramento dos principais a���feros e distribui�o dos poços	anexo
Figura 8	- Diagrama painel das condições hidrogeológicas	anexo
Figura 9	- Evolu�o dos cones	80
Figura 10	- Superfície de tendência da profundidade da base do sistema a���fero Botucatu	89
Figura 11	- Superfície de tendência da espessura do a���fero Botucatu	91
Figura 12	- Superfície de tendência da espessura do basalto	93
Figura 13	- Superfície de tendência da transmissividade ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	95
Figura 14	- Superfície de tendência da vazão específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	97
Figura 15	- Superfície de tendência dos custos de produ�o do m^3 de água subterrânea	99
Figura 16	- Evolu�o dos custos de produ�o do m^3 de água - nível dinâmico 50 m.	120
Figura 17	- Evolu�o dos custos de produ�o do m^3 de água - nível dinâmico 100 m.	121

Figura 18 - Avaliação da distância ótima	125
Figura 19 - Concepção esquemática do sistema de abastecimento público	127
Figura 20 - Esquema de utilização da energia geotermal	130

QUADROS

Quadro 1 - Valores característicos da depleção	26
Quadro 2 - Características hidrogeológicas dos "trapps" da Formação Serra Geral segundo dados dos poços PETROBRÁS	37
Quadro 3 - Valores da permeabilidade dos basaltos de barragens (OLIVEIRA et alii, 1976)	56
Quadro 4 - Características hidrogeológicas fundamentais obtidas dos poços da PETROBRÁS referentes ao sistema Botucatu e inferiores	65
Quadro 5 - Características fundamentais dos principais aquíferos	69
Quadro 6 - Reservas dos principais aquíferos	82
Quadro 7 - Diâmetros adequados para captação das vazões potenciais do aquífero Botucatu	106
Quadro 8 - Características gerais das bombas	108
Quadro 9 - Custos de construção dos poços e valores da amortização anual	111
Quadro 10 - Custos dos equipamentos de bombeamento instalados e amortização anual	114
Quadro 11 - Despesas de bombeamento	115
Quadro 12 - Custos de produção do m ³ de água	118

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A - A ÁREA DE ESTUDO. DEFINIÇÃO DE PROPÓSITOS. METODOLOGIA.

A vasta Bacia Sedimentar do Paran, localizada no centro-leste da Amrica do Sul, abrange uma rea de 1 600 000 Km², distribuídos pelos territrios de quatro pases. A parte brasileira, objeto desta anlise, atinge cerca de 1 000 000 Km² e est compreendida entre os paralelos 16^o e 32^o de latitude sul e os meridianos 47^o e 56^o de longitude W; a rea restante encontra-se assim distribuída: Argentina - 400 000 Km², Paraguai - 100 000 Km² e Uruguai - 100 000 Km² (Figura 1).

O contingente populacional da poro brasileira atinge cerca de 40 milhes, isto , perto de 1/3 da populao nacional. A densidade varia de 50-100 habitantes/Km² no Estado de So Paulo, 20-50 habitantes/Km² nos Estados do Paran, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a menos de 10 habitantes/Km² nos domnios goiano, matogrossense e mineiro (IBGE, 1974).

A constituio litolgica, os caracteres tectono-estruturais e a disposio estratigrfica das formaes geolgicas, aliados configurao climtica altamente favorvel e privilegiada, fazem com que esta unidade hidrogeolgica reserve para o Brasil uma grande riqueza em recursos hdricos subterrneos, prximo s regies relativamente mais povoadas e economicamente mais desenvolvidas do Pas.

A explorao das guas subterrneas da rea to antiga quanto o prprio povoamento. Avalia-se em dez mil o nmero de poos j perfurados. Assinala-se uma profusa bibliografia tratando de diferentes aspectos da explorao das guas subterrneas da Bacia do Paran, destacando-se: HAUSMANN, 1956, 1966; LEINZ & SALLENTIEN, 1962; MEZZALIRA, 1967, 1974; ARID, 1970; PEREZ et al., 1970; MAACK, 1970; BRITO NEVES & TOMAZ DE ALBUQUERQUE, 1973 e DAEE, 1974, dentre outros. No obstante, os recursos hdricos da Bacia so conhecidos apenas a nvel preliminar. Esta situao decorre, fundamentalmente, do fato de que os milhares de poos no fornecem in

formações suficientemente consistentes para o discernimento de resultados práticos ou científicos.

Ressalte-se ainda que, até há pouco tempo, a importância e o grau de dependência das águas subterrâneas no Brasil estavam relacionados com o clima e aumentavam com a aridez. Face à abundância de mananciais de superfície na região, bem como ao desconhecimento sobre os aspectos hidrogeológicos e de alcance econômico dos recursos armazenados nos aquíferos, as águas subterrâneas não eram sequer cogitadas como importante fonte de abastecimento. Todos estes fatos muito têm concorrido para que ainda se faça uma idéia deveras pessimista sobre as possibilidades dos importantes aquíferos da Bacia do Paraná. Apenas recentemente é que o seu aproveitamento em grande escala vem adquirindo importância cada vez maior no esforço de desenvolvimento econômico e social das comunidades da área. Isto decorre, em parte, da aplicação sistemática, imposta pelos agentes financeiros, da análise econômica no estudo da viabilidade dos projetos de abastecimento. Esta forma de abordagem serviu para mostrar ser relativamente mais vantajoso captar as águas subterrâneas para satisfazer as demandas de complexos industriais, bem como as necessidades mais tradicionais do campo e até de comunidades urbanas importantes situadas dentro da Bacia. Por outro lado, os progressos realizados nos domínios das ciências hidrogeológicas e das técnicas de perfuração e bombeamento tornaram possível a obtenção de água dos aquíferos ricos e profundos que estavam fora do alcance dos conhecimentos e dos meios de exploração tradicionais.

O principal objetivo do presente estudo é oferecer uma abordagem metodológica capaz de preencher a grande lacuna de conhecimentos sobre as potencialidades dos principais sistemas aquíferos da região. Decidiu-se, assim, desenvolver a análise em duas fases: a primeira corresponde à análise dos traços característicos dos principais aquíferos e a outra à avaliação dos custos de produção do metro cúbico de água. Enfocou-se os aspectos hidrogeológicos da área de um ponto de vista essencialmente quantitativo, uma vez que não existe, em geral, limitação de

qualidade. Desse modo, os dados disponíveis em bibliografia relativamente profusa receberam um tratamento de homogeneização e foram complementados com aqueles por nós coligidos, visando, fundamentalmente, a caracterização dos parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais dos principais sistemas aquíferos, além dos aspectos de ordem técnica e econômica das explorações.

No presente trabalho, ênfase especial será dada ao sistema Botucatu. A extensão da análise a todos os demais aquíferos alongaria demasiadamente o tempo disponível e demandaria um acervo de dados que não dispomos no momento. Ressalte-se ainda que, pela sua extensão, caracteres faciológicos e condicionamento estrutural, apenas o sistema Botucatu muito se aproxima dos aquíferos ideais imaginados pelos formuladores da hidrodinâmica clássica, o que permite uma certa generalização.

Os métodos de estudo das condições de explorabilidade de aquíferos de grande extensão, como o Botucatu, tem um desenvolvimento muito recente. Dentre eles, os mais empregados consistem no estabelecimento de modelos numéricos ou analógicos de simulação das condições de manejo ótimo, de acordo com um critêrio adotado. Em virtude, porém, do baixo grau de exploração atual das águas subterrâneas da área, é prematuro desenvolver tais modelos. Por outro lado, as informações necessárias (parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos, além dos aspectos econômicos) são, em geral, pouco numerosas e mal distribuídas. Nessas condições, a aplicação de métodos de análise de tendências, possibilitando a identificação dos parâmetros de representatividade regional, tem um grande alcance prático e científico. De fato, ao proporcionar um conjunto ordenado de hipóteses sobre a distribuição de parâmetros diversificados, ao nível mesmo de reconhecimento, conduzirá a uma racionalização das tarefas de campo e evitará a acumulação de dados que pouco contribuem para o melhor conhecimento do problema.

A tendência e a prática atuais de utilização das águas subterrâneas na área indicam que, em futuro muito próximo, a elaboração de modelos de simulação do comportamento dos aquíferos terá se tornado uma necessidade. Urge, portanto, que os laboriou

os controles de campo e inventário de dados básicos sejam de desenvolvidos, desde já, de maneira racional.

Tendo em vista melhor evidenciar o grande alcance eco nômico dos recursos hídricos subterrâneos da região, tentou-se uma avaliação dos seus custos de lavra.

A definição das potencialidades, não apenas em termos de volumes armazenados ou disponíveis, mas em termos financeiros, é suscetível de ser melhor entendida por todos. Com efeito, as potencialidades sendo ligadas à noção do custo de produção do me tro cúbico de água, possibilita a realização de um balanço cus to/benefício e imediata caracterização da sua utilidade econômi ca, social ou estratégica. Assim, os setores onde os custos de produção são relativamente os mais baixos, na medida em que as boas condições de utilização forem reunidas, constituem as zonas prioritárias para a realização dos investimentos. Ao contrário, nos setores com custos elevados, a água do aquífero Botucatu po derá ter, em princípio, uma utilidade apenas social ou estraté gica. Ressalte-se ainda que será possível, também, uma compara ção, do ponto de vista puramente econômico, com outras possibi lidades de abastecimento.

Insiste-se sobre os aspectos metodológicos dos estudos aqui desenvolvidos e ressalta-se que as configurações delineadas representam, apenas, as tendências das potencialidades dos aquí feros no domínio brasileiro da Bacia do Paranã. Esses estudos constituem subsídios de caráter geral que deverão ser continua dos, na perspectiva de elaboração de modelos técnico-econômicos de simulação das condições ótimas de exploração integrada dos recursos hídricos da região.

B - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi grandemente facilitado pela

valiosa colaboração de pessoas e entidades interessadas nos re cursos hídricos da Bacia do Paranã. Ainda que seja impossível mencionar todos, queremos destacar a contribuição da PETROBRAS, que propiciou amplo acesso aos seus ricos arquivos.

Ao Professor Doutor Setembrino Petri, Diretor do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, e ao Professor Doutor Reinholt Ellert, Chefe do Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada do IG/USP, agradecemos todo o indispensável apoio.

O nosso reconhecimento ao Professor Doutor Viktor Leinz, pelo incentivo e críticas durante o desenvolvimento da análise, e ao Professor Doutor Gilberto Amaral, pela orientação necessária, para utilização do programa "Trend Surface Analysis" e críticas às análises dos resultados.

Ao colega Everaldo Zeferino Vieira de Mello, pela revisão do texto, muito obrigado.

Agradecimentos, também, são devidos: à Sra. Aparecida Nunes Comi, pela decifração dos manuscritos; à Sra. Itacy Kroehne, pela reprodução dos desenhos; à Sra. Nair de Campos Louzada e ao Sr. José Ponchirolli, pela datilografia final; e ao Sr. Jaime Alves da Silva e auxiliares pela excelente apresentação gráfica deste trabalho.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, conosco colaboraram, os nossos sinceros agradecimentos.

CAPÍTULO II

ELEMENTOS FISIOClimáticos

As condições hidrogeológicas de uma região são determinadas, principalmente, por fatores de ordem climática e geológica.

A geologia indica, na maioria dos casos, a importância e distribuição das estruturas armazenadoras de água subterrânea, enquanto que o clima dita a abundância e a variabilidade da sua realimentação no tempo e no espaço.

A combinação destes dois fatores na área propicia, de maneira global, condições hidrogeológicas altamente favoráveis e privilegiadas. As restrições locais decorrem de feições topográficas e outros fatores que serão devidamente abordados.

Os fenômenos de população - número, atividade e distribuição - constituem também dados básicos para a compreensão do panorama hidrológico de uma vasta área ou região como a Bacia do Paran. Existem relaes recprocas entre populao e condies de explorao das guas, populao e formas de uso da terra, populao e estrutura econmica, que afetam o comportamento natural do ciclo da gua. A alterao de um dos termos da equao geral do balano hidrolgico provoca modificaes nos demais e, em particular, nas taxas de infiltrao. Por conseguinte, a utilizao eficaz do potencial hdrico da regio est condicionada, no campo puramente tcnico, ao desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares, necessrias sua formalizao, bem como ao reconhecimento da necessidade de se realizar um esforo duradouro.

Limitar-nos-emos anlise dos aspectos fisioclimticos, com a finalidade de proporcionar uma viso adequada dos principais fatores que determinam as condies hidrogeolgicas da rea considerada.

A - QUADRO CLIMÁTICO

A Bacia Geológica do Paraná, pela sua grande extensão, apresenta diferentes tipos de clima, mercê das variações de latitudes que abrange (cerca de 20°), das condições de relevo (altitudes de 100 até aproximadamente 1.800 m) e de fatores meteorológicos diversos. Cerca de 70% de sua área em território brasileiro pertence ao cinturão tropical. O clima, portanto, é influenciado, notavelmente, por (a) centros b̄aricos de ação, (b) circulação planetária da atmosfera, (c) massas de ar de diversas origens e, finalmente, (d) frentes atmosféricas (SERRA & RATISBONNA, 1956). A formação e transformação desses elementos produzem o tempo "ativo" que se manifesta, principalmente, na produção da precipitação, nas mudanças bruscas de temperatura e no aparecimento de ventos fortes.

Chuva e granizo constituem as formas principais das precipitações. A importância da parcela que consegue se infiltrar no solo e subsolo depende, entre outros fatores, da abundância e intensidade das precipitações e da sua regularidade no espaço e no tempo.

1 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL

O mapa de isoietas (Figura 2) mostra que a pluviometria média anual (1931-1960) varia de 2.400 mm a 1.000 mm. O intervalo 1.200-1.400 mm abrange, virtualmente, todo o domínio intertropical da bacia sedimentar. Os valores superiores a 1.400 mm formam figuras concêntricas, atingindo o máximo de 2.400 mm no domínio das terras montanhosas do Paraná e norte de Santa Catarina.

Observa-se, no plano geral, aumento de pluviosidade com a altitude. Certo aumento de pluviosidade manifesta-se, também, na direção norte, isto é, na direção das regiões onde se origina a massa de ar equatorial. Observa-se, finalmente, um efeito de sotavento que se manifesta nos altos cursos dos rios Tietê e Paranapanema, onde os valores são inferiores a 1.200 mm/ano.

Pode-se dizer que a neve, praticamente, não desempenha papel importante na área. O granizo é observado com mais frequência, mas é de importância local. O granizo é um fenômeno raro que se verifica ocasionalmente em pequenas partes da frente de aguaceiros. Por isso, o granizo escapa facilmente à observação nas estações meteorológicas e pluviométricas.

2 - DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS DURANTE O ANO E VARIABILIDADE INTER ANUAL

O valor anual médio das alturas de chuva constitui, naturalmente, informação generalizada, porque não indica o tempo necessário para sua produção.

Ao se considerar os histogramas da Figura 2, ressaltam-se imediatamente dois padrões de distribuição. Na parte norte da área predomina o caráter tropical, com chuvas de aguaceiros no período de novembro a março (Primavera-Verão) e escassez pluvial durante o resto do ano. A produção pluvial dos três meses de verão é superior a 45% do total anual. Para o sul, esse tipo é paulatinamente substituído por uma notável persistência da pluviosidade durante todo o ano. Nesse domínio, não se pode falar realmente de períodos chuvosos e secos. Assim, enquanto ao norte do trópico o ano hidrológico dura de 1º de outubro a 30 de setembro, na área situada abaixo torna-se difícil falar de um ciclo hidrológico anual. Observa-se, no plano geral, escassez pluvial no inverno (junho-agosto).

Além da variação das alturas de precipitação num mesmo

ano, observa-se, sempre e em qualquer lugar, uma variação de ano para ano.

A variabilidade anual das precipitações é uma característica de grande importância para muitas atividades humanas e afeta, sobretudo, as condições de recarga natural dos aquíferos.

Os dados referentes à variabilidade relativa anual da precipitação (desvio simples da chuva média de um ano qualquer da série em relação ao valor normal, expresso em porcentagem) indicam valores de 15% sobre, virtualmente, toda a área (CORDEIRO et al., 1969). Isso quer dizer que a quantidade de chuva de um ano qualquer desvia-se de 225 mm do valor médio de 1.500 mm referente a uma série de 30 anos. As maiores variabilidades relativas manifestam-se na área compreendida entre o rio Paran e a linha que passa por Londrina, Bauru e So Jose do Rio Preto at o rio Grande. Outra regio de maior variabilidade relativa abarca as ramificaes ocidentais da Serra da Fartura, fazendo parte da bacia do rio Iguau. No plano nacional, essas variabilidades relativas so das mais baixas (REBOAS & MARINHO, 1970).

3 - FREQUNCIA E INTENSIDADE DAS PRECIPITAES

Nos pargrafos anteriores foram consideradas a quantidade de precipitao e sua distribuio dentro do ano hidrolgico e no decorrer dos anos. Mas, essas informaes so bastante generalizadas, porque a precipitao pode ser produzida de forma intensa dentro de reduzido intervalo de tempo ou atravs de chuvas mais fracas durante maior nmero de dias, com conseqncias muito diferentes para os aquferos. Com efeito, a capacidade de infiltrao do solo, isto , a velocidade mxima possvel da infiltrao de uma lâmina de gua que o recobre, depende, fundamentalmente, da sua permeabilidade. Se a intensidade da precipitao superior a esta capacidade, a gua da chuva no consegue infiltrar e, em conseqncia, escoar superficialmente, provocando

as enchentes violentas dos rios. Por outro lado, se a frequência das chuvas é baixa, boa parte da água que se infiltra vai ser gasta para completar a parcela de água do solo que é perdida durante o período de estiagem. A parcela que consegue se infiltrar até o aquífero é, por conseguinte, muito reduzida.

Os dados disponíveis (CORDEIRO et al., op. cit.) revelam que, virtualmente por sobre toda a área, o número de dias/ano com precipitação intensa, isto é, superior a 10 mm, situa-se entre 80 e 100. Por outro lado, os estudos realizados por PFAFSTETTER (1957) revelam que a frequência de chuvas intensas atinge 50 a 60% do número total anual de dias de chuva.

No que diz respeito às quantidades máximas de chuva produzidas durante 24 horas, a estatística é incompleta para a bacia. Considerando-se a maior intensidade das chuvas em diferentes períodos de tempo, desde 5 minutos até 6 dias, encontram-se as seguintes características: 10-15 mm/5 minutos, 130 mm/24 horas, 145 mm/2 dias, 205 mm/4 dias, e 240 mm/6 dias (produzidas as três últimas intensidades por vários aguaceiros).

No domínio das terras montanhosas dos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, observam-se intensos aguaceiros (15-20 mm/5 minutos e 190 mm/24 horas) e chuvas persistentes que produzem até 320 mm/2 dias.

O gradiente hidráulico num terreno que é recoberto por uma lâmina de água sendo igual a 1, o coeficiente de permeabilidade da fórmula de Darcy indica a quantidade de água que ele pode absorver por m^2 e por segundo. Nestes termos, considerando-se que a permeabilidade dos solos da área varia entre 10^{-5} m/s e 10^{-7} m/s, a capacidade de infiltração por hectare será de 1 a 100 l/s, isto é, uma lâmina de 3 a 300 mm.

4 - OUTROS PARÂMETROS DO CLIMA

Os demais aspectos climáticos são assim caracterizados:

As temperaturas médias anuais são superiores a 20°C na maior parte da área. As isoterms inferiores (até 14°C) estendem-se mais ou menos sobre a borda leste e domínios montanhosos cujas altitudes são superiores a 800 m. As variações diurnas absolutas de quase 40°C e, em termos de média, de 15°C , são surpreendentes. Em consequência, as classificações de clima que consideram unicamente a temperatura média anual ou uma derivação da mesma, sem considerar essas importantes variações térmicas, devem ser vistas com suma cautela.

Radiação Solar - O Sol é a principal fonte de energia para a máquina atmosférica que alimenta o gigantesco ciclo da água. Não foi possível obter dados para a duração média da luz solar na bacia e consequente radiação. Por isso, utilizou-se o mapa generalizado preparado por LANDSBERG (1965). De acordo com esse mapa, a duração anual média de luz solar na área atinge 2.000 horas/ano. Vale mencionar que no domínio do Polígono das Secas a duração anual média atinge mais de 3.000 horas/ano (REBOUÇAS & MARINHO op.cit.).

Grande parte da energia solar que é transformada em calor na superfície terrestre (18%) é usada para a evaporação da água e o processo de transpiração das plantas. Observe-se que para evaporar um grama de água são necessárias 600 calorias. Na faixa inter-tropical a radiação atinge $190.000\text{ cal/cm}^2/\text{ano}$ e $160.000\text{ cal/cm}^2/\text{ano}$ na zona sub-tropical.

Evaporação e Evapotranspiração - Estes fatores têm importância econômica fundamental. Segundo o ATLAS CLIMATOLÓGICO DO BRASIL (1970) a evaporação anual média (PICHE) varia de 650 a 1.100 mm. Os valores mais baixos ficam circunscritos às terras montanhosas dos Estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, possivelmente causados por temperaturas mais baixas, maior nebulosidade e umidade do ar mais alta. No que diz respeito a evapotranspiração, isto é, montante de evaporação física e transpiração das plantas, encontramos frente a um problema que não foi solucionado até agora, uma vez que, na realidade, a evapo

transpiração somente pode ser medida indiretamente. As fórmulas elaboradas para o cálculo da evapotranspiração (THORNTHWAITE & MATHER, 1954) admitem a evapotranspiração como sendo diretamente proporcional à temperatura do ar e outros parâmetros climáticos. Face a grande variabilidade dos elementos do clima da área e, em particular, das temperaturas, os valores assim obtidos devem ser considerados com suma circunspeção. Por outro lado, pelos dados do balanço de umidades hidrográficas, verifica-se que a evapotranspiração real oscila entre 882 e 1.071 mm/ano, ou seja, cerca de 60 a 70% das precipitações. Os processos hidrogeológicos e, por conseguinte, o potencial hídrico subterrâneo da área são influenciados notavelmente por todos esses elementos. A elaboração de planos de aproveitamento racional necessita que todos sejam identificados e melhor precisados.

B - QUADRO FISIAGRÁFICO

Uma discussão completa dos aspectos físicos está além das finalidades deste trabalho. Abordaremos, apenas, o comportamento geral dos seus elementos fundamentais.

A qualidade da cobertura vegetal é de suma importância na hidrogeologia e processos hidrológicos de superfície. Com efeito, solo e cobertura vegetal constituem os primeiros obstáculos encontrados pelas águas meteóricas no seu caminho até os aquíferos. No amplo domínio da Bacia Sedimentar do Paraná há uma grande variação da cobertura vegetal, que vai desde extensas áreas de campos, intensamente utilizados para agricultura e pecuária, a áreas cobertas por densas matas virgens, passando por zonas de cerrado. A influência da variedade dos fâcies encontradas na área sobre as condições de recarga, somente poderá ser elucidada mediante o desenvolvimento de estudos integrados de unidades hidrológicas homogêneas.

Os solos da bacia são, em grande parte, férteis, bem regados e drenados por sistema hidrológico favorável. Sob clima

predominantemente saudável, as atividades agrícolas e pastoris atingem considerável extensão e intensidade. Com relação aos solos, a uniformidade é marcante. Predominam, na quase totalidade da bacia, solos lateríticos.

A análise do quadro morfológico, representado na escala 1:2.500.000, mostra que o traço característico é seu delineamento em altiplanos escalonados. Partindo-se da costa, transpõem-se sucessivas linhas de escarpas que representam os degraus. No Estado do Paraná esse aspecto é muito nítido. Assim, tem-se, de leste para oeste, os seguintes altiplanos. a Serra do Mar, o Planalto Central e o Planalto Ocidental da Serra Geral.

Em termos de hipsometria, podemos identificar quatro superfícies principais: 0-200 m, 200-500 m, 500-800 m e 800-1.200m (Figura 3). Esculpidas em terrenos sedimentares sub-horizontais e de diversificada litologia, estas superfícies apresentam feições típicas de seus substratos: plataformas estruturais, perfis escalonados, testemunhos tabulares, mesas e formas afins, permanecendo a característica de planaltos dissecados, terminando em "cuestas" marcantes ou suavizadas.

O domínio hipsométrico de 500 a 800 m, na sua forma tabular elevada, condicionando a formação de uma festonada e expressiva "cuesta", a chamada Serra Geral, corresponde à expressão dos extensos derrames basálticos. Pertence, também, a esta superfície, a "depressão periférica" (ALMEIDA, 1964), cujo relevo comporta muitas variações de altitudes, mercê da diversificada litologia, correspondendo à zona de afloramento das diversas formações sedimentares que constituem os sistemas aquíferos confinados da bacia. No extremos norte da área, destaca-se ainda o planalto arenítico (Formação Bauru), dissecado pela erosão regressiva dos rios.

A influência do relevo é muito importante na caracterização das condições de exploração dos aquíferos através de poços. Efetivamente, os níveis d'água dos aquíferos livres tor

BACIA DO PARANÁ

TRAÇOS GERAIS DA HIPSOMETRIA E HIDROGRAFIA - HIDROGRAMAS TÍPICOS

nam-se profundos a muito profundos no domínio dos altiplanos e serras, enquanto podem chegar a ser sub-aflorantes nas zonas deprimidas do relevo. Os aquíferos confinados, mormente o sistema Botucatu, apresentam condições de artesianismo nos domínios hipsométricos situados abaixo de 500 m, em média.

C - HIDROGRAFIA E REGIME DOS RIOS

A rede hidrográfica da Bacia do Paran faz parte do sistema fluvial do Rio da Prata, um dos maiores do mundo, cuja superfcie compreende cerca de 3.100.000 Km². O maior desenvolvimento dessa grande rea de drenagem verifica-se no Brasil, onde atinge 1.415.000 Km². A rea restante est dividida entre Argentina (920.000 Km²), Paraguai (410.000 Km²), Bolvia (205.000 Km²) e Uruguai (150.000 Km²).

No domnio brasileiro, cumpre diferenciar duas unidades hidrogrficas principais: Bacia do Rio Paran (890.000 Km²) e Bacia do Rio Uruguai (365.000 Km²).

Os rios entalham a superfcie do planalto arentico ou basltico em profundos vales. Esse entalhamento obedece, em parte, a uma orientao imposta pela tectnica e pela direo das juntas dos basaltos. O aspecto em patamares, apresentado pela maioria dos vales, devido, principalmente, alternncia entre descontinuidades predominantemente horizontais e juntas verticais, que ocorrem nos derrames baslticos, e s variaes de fcies ou de teor de cimento calcfero dos arenitos Bauru-Caiu. As descontinuidades horizontais do origem aos terraos estruturais que se estendem por grandes trechos ao longo dos rios e que se alternam com linhas de paredes ou de encostas ngremes provenientes do tectonismo. Ressalte-se que as reas de interflvios so muito alongadas e estreitas, com drsticas influncias sobre as condies de armazenamento das guas subterrneas dos aquferos livres.

O Paran , sem dvida, o rio mais importante do siste

ma hidrográfico do Prata, devido à magnitude da sua descarga e pelos diversos aspectos dimensionais que caracterizam sua área tributária.

Todo o Paranã superior, isto é, acima das cataratas do Guaira, encontra-se no Brasil. Seu comprimento, incluindo seu afluente principal, o Paranaíba, atinge um total de 1.850 Km.

O Paranaíba e o Grande limitem a zona mesopotâmica conhecida como Triângulo Mineiro e são os rios mais importantes de toda a bacia superior do Paranã. Dentre os de importância secundária, merecem menção os rios Tietê e Paranapanema. No trecho em que serve de fronteira entre o Brasil e o Paraguai, o rio Paranã recebe o Iguazu, célebre por suas cataratas.

O leito do rio Paranã tem largura muito variável, isto é, 4.000 m no represamento que precede as cataratas do Guaira até somente algumas dezenas de metros na maior parte do seu curso. Outra característica do curso superior do rio é o perfil escalonado do leito, que apresenta duas notáveis quebras da pendente nos saltos de Urubupungã e Guaíra. Outras quedas menores e a presença de rápidos caracterizam o perfil longitudinal do Alto Paranã, mercê da estrutura geológica e seus acidentes tectônicos (BARCHA & ARID, 1975).

O rio Uruguai é o segundo sub-sistema fluvial em importância no domínio brasileiro da Bacia do Prata. Como o sub-sistema anterior, o Uruguai nasce, também, em território brasileiro, na Serra Geral, com o nome de rio Pelotas. O curso principal do Uruguai apresenta algumas características dignas de destaque. Em primeiro lugar, a direção E-W, que domina o trecho superior até a saída do domínio brasileiro, converte-se decididamente em NE-SO, no trecho que serve de fronteira entre o Brasil e a Argentina, para tomar imediatamente a direção N-S até sua confluência com o Prata. Em segundo lugar, observando-se as grandes linhas de drenagem, verifica-se que os seus afluentes formam arcos concêntricos de raio crescente de leste para oeste, terminando com

o arco máximo formado pelo Uruguai.

A bacia superior desenvolve-se sobre rochas de origem vulcânica, onde escavou um profundo e estreito vale com desniveis que alcançam, local e ocasionalmente, mais de 600 m.

O perfil longitudinal é escalonado, dando origem a grande número de rápidos e uma notória quebra em Salto Grande de Misiones.

A forma dominante de drenagem, sobreposta às zonas de maior fraqueza da cobertura basáltica, favorece o desenvolvimento de profundos grotões, oferecendo uma infinidade de bons locais para implantação de barragens. A capacidade de acumulação destas atinge várias centenas de milhares de metros cúbicos de água por metro cúbico de barragem. Neste domínio de aproveitamento dos recursos hídricos, trabalha-se, contudo, ao nível do cotidiano, sem esforço de previsão das conseqüências dos usos. A análise de viabilidade dos projetos, hidrelétricos em sua maioria, tem-se orientado mais para a quantificação das possibilidades locais de água e exeqüibilidade físico-financeira, sem levar em conta, porém, as implicações futuras desse tipo de uso sobre os demais aproveitamentos.

1 - HIDROGRAMAS DOS RIOS

Os estudos relativos à fluviometria tem-se orientado, basicamente, para a obtenção de informações de interesse imediato na aplicação de projetos hidráulicos. Os dados mais comuns dizem respeito ao volume total de água escoada durante um intervalo de tempo definido, à variação de descarga e à vazão máxima dos rios. As medidas relativas aos fluxos de base são pouco numerosas e, geralmente, menos precisas. Em conseqüência, a forma de curva de recessão não pode ser definida adequadamente na maioria das estações.

Os hidrogramas apresentados na Figura 3 retratam as características do regime dos rios.

Pode-se verificar, mediante a comparação desses elementos, que a variabilidade do regime é mais acentuada nas bacias de drenagem situadas acima do trópico, em concomitância, portanto, com o regime tropical das chuvas. O período de altas águas estende-se de dezembro a abril, com um máximo em fevereiro. Ao sul do trópico, os hidrogramas revelam um regime diferente, praticamente inverso, com estiagem no verão e enchentes no inverno-primavera, devido a maior persistência da pluviosidade durante o ano.

Ao se comparar os dados de deflúvio médio mensal e precipitação média mensal, observa-se que existe correspondência entre as zonas de máxima precipitação e escoamento da bacia. Em valores relativos, os deflúvios médios nos domínios dos terrenos sedimentares, para os rios Grande, Tietê, Paranapanema e Paranã, entre a confluência deste último com o rio Grande até Salto do Guaira, são de 30% da precipitação. Ao sul do trópico, a persistência da precipitação e as condições geohidrológicas dão lugar a um aumento dos deflúvios relativos, ou seja, de 35 a 40% da precipitação.

É necessário mencionar que esses são valores médios obtidos para períodos longos e que podem variar muito de um ano para outro ou dentro do mesmo ano, em função do regime das chuvas, das condições de umidade dos solos, etc.

Veremos, em seguida, a utilização das curvas de reces são para cálculo dos volumes médios das contribuições subterrâneas que participam do escoamento dos rios.

2 - CURVAS DE DEPLEÇÃO

O fluxo de água dos rios é integrado por dois componentes principais: o escoamento superficial, oriundo da superfície

do solo e zonas imediatas, e o escoamento de base, que é alimen
tado pelas restituições provenientes dos aquíferos.

O escoamento de base dos rios representa, portanto, a quantidade de água que se infiltrou nos terrenos de suas bacias contribuintes durante o período de chuva imediatamente anterior.

De um modo geral, todos os rios da região possuem uma con
siderável descarga de base, mesmo durante os mais prolongados pe
ríodos de estiagem. Este fato indica, por um lado, a presença de importantes fontes de recarga aliadas às boas condições de armaze
namento subterrâneo nos terrenos em que foram esculpidas as vã
rias bacias contribuintes e, por outro lado, serve para indicar a existência de grandes reservas de água subterrânea situadas aci
ma do nível d'água dos rios. Com efeito, o nível d'água dos aquí
feros livres da região acompanha o relevo, geralmente a pequena profundidade, devido a sensível diferença entre a grande recarga que é proporcionada pela abundante pluviometria e pequena velo
cidade dos fluxos subterrâneos. Além disso, o movimento da água do subsolo sendo, em geral, relativamente lento, as variações da participação daquela água no fluxo dos rios são, usualmente, mui
to pequenas. Com efeito, os cursos d'água, por dependerem lar
gamente das restituições do subsolo para seu suprimento, têm re
gime relativamente estável.

Os modelos de balanço hidrológico desenvolvidos pelo DAEE (1974) revelam que, no âmbito da região nordeste do Estado de São Paulo, as restituições subterrâneas representam cerca de 2/3 da descarga total dos rios.

A análise do ramo terminal da hidrôgrafa de um rio per
mite calcular o volume de água que provém das restituições sub
terrâneas. Destarte, o nível da água subterrânea estando em sua altura máxima no fim de um período de escoamento superficial, se não ocorrer precipitação ulterior até que o escoamento do rio cesse completamente, a hidrôgrafa resultante, durante esse período, representará a curva de depleção da água do subsolo. Em região de precipitação moderada ou alta, raramente ou nunca ocor
re um período contínuo de estiagem suficientemente prolongado pa

ra que se possa obter o desenvolvimento de uma curva de depleção perfeita. Entretanto, essa curva pode ser, geralmente, reconstituída a partir de certo número de segmentos de hidrôgrafas, cada um dos quais realizando a conexão de períodos sucessivos de escoamento superficial, conforme apresentamos na Figura 4, onde analisamos a depleção de um ano úmido, médio e seco característicos. Conforme ressalta HALL (1968), a representação gráfica da curva de depleção sendo uma reta admite uma solução da forma:

$$q_t = q_0 \cdot e^{-\alpha t}.$$

onde q_0 = vazão do rio no início do desenvolvimento da curva de depleção (m^3/s).

q_t = vazão do rio ao cabo de um período de tempo t dado em dias.

e = base neperiana.

α = coeficiente característico de esgotamento do subsolo.

O coeficiente característico tem a dimensão do inverso do tempo T^{-1} . Tendo em vista a magnitude das vazões mínimas dos rios, os pequenos valores de (α) indicam a importância dos grandes volumes proporcionados pelos aquíferos drenados.

O volume total de água armazenado nos aquíferos no início da depleção ($t = 0$) pode ser calculado a partir da expressão:

$$V = \int_0^{\infty} q \, dt = \int_0^{\infty} q_0 \cdot e^{-\alpha t} \, dt$$

Como na construção gráfica adotada as vazões são dadas em metros cúbicos por segundo e t em dias, temos que:

$$V_0 = \frac{q_0 \times 86.400}{\alpha}$$

No Quadro 1, apresentamos os volumes infiltrados no domínio das bacias contribuintes durante os períodos de chuva ime-

QUADRO 1 - VALORES CARACTERÍSTICOS DA DEPLEÇÃO

BACIA	POSTO	ÁREA Km ²	ANO	q _o m ³ /s	α	V m ³ (10 ⁶)	h mm/ano
Paraná	Jupiã	472.000	1931(u)	5.800	0,008	63.000	133
			1952(m)	3.700	0,005	64.000	135
			1955(s)	2.500	0,006	36.000	76
Tiête	Lussanvira	69.800	1950(u)	580	0,005	10.000	143
			1955(s)	230	0,005	4.000	60
Rio Grande	J. Américo	118.500	1929(u)	2.750	0,008	30.000	250
			1948(m)	1.400	0,004	30.000	253
			1953(s)	940	0,008	10.000	85
V A L O R E S M É D I O S				2.237	0,006	30.875	142

u = úmido; m = médio; s = seco.

diatamente anteriores e a altura da lâmina correspondente.

Esses dados servirão de base à avaliação das reservas ativas dos principais sistemas aquíferos da Bacia. Vale salientar que os coeficientes aqui encontrados indicam, em média, condições de armazenamento subterrâneo dez vezes superiores às encontradas na região nordeste do Brasil (REBOUÇAS, 1973).

Ressalte-se, ainda, o fato de que aos anos médios pertencem os maiores valores relativos da lâmina, significando, portanto, a maior infiltração que é propiciada. Ao contrário, nos anos úmidos e secos, verifica-se menor recarga.

O valor da lâmina média atinge apenas 142 mm/ano, ou seja, cerca de 15% da pluviometria; compatível, portanto, com a capacidade de infiltrações dos solos.

Esses resultados indicam os volumes infiltrados nos aquíferos e que voltam aos rios no ciclo anual. Parcela do que escapa a esse mecanismo infiltra-se nos aquíferos confinados, tais como o Botucatu, e só reaparece ao cabo de períodos de tempo muito mais longos, mercê das baixas velocidades de percolação. Todavia, devido, sobretudo, à pequena velocidade destes fluxos subterrâneos profundos e à grande extensão dos aquíferos, estas restituições são relativamente constantes no tempo.

Os rios situados abaixo do trópico não apresentam períodos de depleção devido a persistência de chuvas durante, praticamente, todo o ano.

As atitudes estruturais do aquífero Botucatu sugerem a ocorrência de importantes volumes que devem emergir através da zona de afloramentos situada na borda sudoeste da bacia. Ao nível atual dos conhecimentos geohidrológicos, a avaliação de tais exudações é muito pouco precisa. Para sua quantificação, torna-se necessária a análise detalhada dos regimes hidrológicos dos rios que drenam a região, além da determinação de parâmetros geotérmicos e hidroquímicos, dentre outros.

Por outro lado, a filtração vertical ao longo das descontinuidades da capa basáltica, suscetível de existir no domínio de artesianismo do aquífero Botucatu, constitui, sem dúvida,

da, o principal exutório das infiltrações profundas. A elucida
ção de todos esses fatos requer, contudo, o desenvolvimento de
uma gama de pesquisas interdisciplinares: hidrológicas, hidrogeo
lógicas e hidroquímicas.

No decorrer desta análise tentaremos quantificar essas
diferentes parcelas que compõem os potenciais hidrogeológicos da
área de estudo.

CAPÍTULO III

CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

A - QUADRO GEOLÓGICO

Dentre os requisitos pr^évios necess^ários à utiliza^ção efetiva das águas subterr^âneas, um dos mais negligenciados, sem d^úvida, é o conhecimento da geologia. Em consequ^ência, os que se empenham em busca da resolu^ção desses problemas s^ão embaraçados por opini^ões desarrazoadas sobre o modo de ocorr^ência, circula^ção e explorabilidade das águas subterr^âneas.

Para bem situar o quadro do estudo, onde a geologia é t^ão somente uma fonte de informa^ção, assinale-se que uma exten^sa bibliografia tem tratado de diferentes aspectos geol^ógicos da Bacia do Paran^á.

A s^íntese aqui apresentada foi calcada na orienta^ção mais moderna e concent^ânea dos int^{ér}pretes da geologia regioⁿal: NORTHFLEET et al., 1969; RAMOS, 1970; FULFARO, 1971; HULMANN et alii., 1974; R^ÜEGG, 1975; e SOARES, 1975.

Vale salientar que o respaldo bibliogr^áfico, aqui de^uvidamente assinalado, tem demonstrado a necessidade de reformu^lar crit^érios de contatos e defini^ções de algumas das unidades litoestratigr^áficas apresentadas. Entretanto, por n^ão estarem ainda conclu^ídos, abstenho-nos de formalizar tais modifica^ções, uma vez que n^ão comprometem o escopo deste trabalho.

No texto precisar-se-^ão detalhes concernentes à pro^lem^ática hidrogeol^ógica, mormente os aspectos litol^ógicos e es^truturais, importantes no equacionamento das condi^ções de explo^rabilidade dos aqu^íferos.

1 - FEIÇÕES LITOESTRATIGRÁFICAS

A por^ção brasileira da Bacia Sedimentar do Paran^á (1.000.000 Km²) é o objeto principal deste estudo.

Globalmente, trata-se de uma bacia intracrat^ônica, de

forma elíptica, com eixo maior de direção NE-SW, coincidindo, a proximadamente, com o curso atual do rio Paranã. Os sedimentos acumulados nesta ampla e vasta sinéclise ($1.600.000 \text{ Km}^2$) alcançam um máximo de 7.825 metros de espessura total (Figura 5). São rochas de natureza litológica predominantemente clástica, que da tam desde o Siluriano atê o Cretáceo superior, conforme a coluna ainda mais freqüentemente adotada (NORTHFLEET et al., 1969).

A sedimentação do Siluriano (Formação Iapô) é constituída de conglomerados cinza arroxeados que repousam em discordância sobre as rochas do embasamento cristalino, de idade prê-cambriana. Essa formação é restrita às partes mais profundas da bacia. A idade da Formação Iapô é baseada na sua posição estratigráfica.

Apôs um curto período de erosão adveio a fase inicial de assoreamento propriamente dito. Esta é representada por um ciclo sedimentar (LANGE & PETRI, 1967) composta de uma seqüência predominantemente arenosa, de granulação média a grosseira, cores claras (Formação Furnas), que passa, gradativamente, a folhelhos e siltitos escuros e pretos (Formação Ponta Grossa). A correlação dos dados de poços exploratórios da PETROBRÁS revela uma interdigitação vertical e lateral entre as duas formações. O contêúdo litológico e fossilífero sugere uma sedimentação de origem inicialmente continental (Formação Furnas) e posteriormente marinha (Formação Ponta Grossa). O Grupo Paranã, de idade de devoniana, engloba as rochas sedimentares desta fase.

Apôs outro curto período de lacuna ou erosão, adveio a deposição do Grupo Tubarã, em condições geológicas bastante instáveis. Este é de origem inicialmente continental, com arenitos, siltitos vermelhos, folhelhos várvicos e "loess" intercalados (Formação Aquidauana), passando a sedimentos de origem marinha, com folhelhos finamente laminados (Formação Itararê), ora de ambiente parálico e deltáico, representados por arenitos pardos amarelados e localmente calcíferos (Formação Rio Bonito), ora marinho neríticos, constituídos de siltitos arenosos, cinza esverdeados (Formação Palermo). A idade do pacote estende-se do Carbonífero superior ao Permiano médio superior. Ressalte-se a extraordinária variedade

Fig. 5- FEIÇÕES LITOESTRATIGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS

CRONOESTRATIGRAFIA		LITOESTRATIGRAFIA			ESPESS. MAX. m.	DESCRIÇÃO SUMÁRIA	AMBIENTE PROVÁVEL	TRANSGRESSÃO E REGRESSÃO		QUALIDADE HIDROGEOLÓGICA RELATIVA
ERATEMA	SISTEMA	SÉRIE	GRUPO	FORMAÇÃO				MAR	Generalizada	CONT
CENOZOICO	D			S/DENOMINAÇÃO	80	Areias e Aluviões	Aluvião, coluvião e eluvião			
	T			S/DENOMINAÇÃO	70	Sedimentos areno-argilosos vermelhos				*
MESOZOICO	CRETÁCEO	SUP	SÃO BENTO	BAURU	200	Arenitos, Siltitos calcíferos no topo, margem avermelhada c/ fósseis de vertebrados na base	Continental, fluvial e lacustre			
				CAIUA	100	Arenito vermelho c/estratificação cruzada	Continental eólico			***
				SERRA GERAL	1550	Derrames de basalto foliático c/intercalações de argila eólico raso amarelado	Volcanismo de fissura em clima árido			
	JUR	INF	SÃO BENTO	BOTUCATU + PIRAMBOIA	1200	Arenito raso fino a médio bem arredondado c/estratificação cruzada, localmente conglomerático. Arenito e Siltito argiloso vermelho muito fino c/estratificação cruzada	Continental eólico, localmente fluvial. Continental eólico, lacustre fluvial			**
	TRIÁSICO	SUP	SÃO BENTO							
	PERMIANO	SUP	PASSA DOIS	RIO DO RASTO	600	Arenito vermelho, Folhelho e Siltito margem avermelhada, intercalado de lentes c/estratificação cruzada	Continental fluvial			*****
				ESTRADA NOVA	700	Arenito e Siltito cinza esverdeado. Calcário arenoso cinza esverdeado claro duro. Siltito cinza esverdeado c/estrutura flaser	Transicional. Planície de mares. Mar raso, salobre			*
				SALTA	110	Argilita cinza escura e preta	Marinho restrito?			
				PALERMO	85	Folhelho betuminoso e Argilita preta	Marinho restrito?			
					300	Siltito arenoso cinza esverdeado amarelado com tubos de vermes	Marinho nerítico			
		MED.	TUBARÃO	R. BONITO	400	Arenito pardo amarelado, fino. Siltito arenoso esverdeado localmente calcífero c/camadas de carvão - Arenito pardo esverdeado	Marinho transgressivo. Continental, planície de mares. Deltaico - Marinho regressivo			**
				ITARARÉ	1300	Siltito e arenito c/estruturas "flaser". Rítmicos. Folhelhos finamente laminados	Planícies de mares. Marinho			*
						Arenito pardo amarelado fino, maciço c/intercalações de diamictito e folhelho várvico. Folhelhos pretos c/tasmenites	Influência glacial. Marinho c/turbidites			
		SUP	TUBARÃO	AQUIDAUANA		Arenito e Siltito vermelho tijolo q/raros diamictitos	Continental, fluvial e lacustre			**
PALEOZOICO	DEVONIANO	INF	PARANÁ	PONTA GROSSA	650	Siltito e Folhelho cinza escura c/arenitos intercalados. Folhelho cinza escura a preto c/laminação paralela. Siltitos, Arenitos e Folhelhos irregularmente acamados	Marinho nerítico. Marinho infranerítico. Marinho nerítico			*
				FURNAS	450	Arenito branco médio a grosso subangular conglomerático c/intercalações de camadas argilosas, muito micáceas	Continental fluvial			**
					40	Laminado cinza avermelhado				
	SIL.									
	ORD.									
	CAMB.									
	PR.					Embasamento metamórfico ou cristalino				

Dados Litoestratigráficos: NORTHFLEET, MEDEIROS E MUHLMANN
Bol. Tec. PET. 12 (3) - 291 - 346 (1969)

de de fácies lateral e vertical que chega a caracterizar o grupo, conforme assinala FULFARO (1971).

Sem aparente descontinuidade, a sedimentação do Permiano superior prosseguiu com clara e gradativa transição do ambiente marinho (Formações Irati e Serra Alta) para o salobro (Formação Estrada Nova) e, posteriormente, para o continental (Formação Rio do Rasto). O contato inferior é colocado na passagem dos siltitos cinza esverdeados da Formação Palermo para os folhelhos e argilitos pirobetuminosos da Formação Irati. O fácies sedimentar evoluciona para argilitos cinza escuros (Formação Serra Alta), característica que é relativamente constante em toda a sua extensão. Este, por sua vez, evolui para uma sucessão de camadas e/ou interdigitações de siltitos, calcários e arenitos, misturados em proporções variadas (Formação Estrada Nova). Sobrejacente a esta encontra-se a Formação Rio do Rasto, constituída por arenitos vermelhos, folhelhos e siltitos interdigitados. O Grupo Passa Dois engloba as rochas sedimentares desta fase de transição e é colocado no Permiano superior.

A etapa final da sedimentação na Bacia do Paraná, mormente na porção brasileira, foi iniciada, possivelmente, no Triássico médio inferior. Com efeito, sobre a topografia esculpida no Permiano, ocorre um pacote de arenitos, siltitos e folhelhos de ambiente aquoso continental (Formação Piramboia e/ou Santa Maria) que passa a arenitos bem selecionados de ambiente eólico (Formação Botucatu).

Os restos fossilíferos de répteis encontrados na parte superior da Formação Santa Maria limitam a sua idade ao Triássico médio (BORTULUZZI & BARBERENA, 1967).

Em relação à Formação Piramboia, SOARES (1972) conclui que, independentemente da deficiente caracterização deste pacote e da diversidade de conceitos envolvidos na sua denominação, esta esteve sempre associada às camadas sedimentares de origem subaquosa, lacustre e/ou fluvial. A idade da Formação Piramboia, baseada na sua posição estratigráfica, é atribuída ao Triássico médio (STANFORD & LANGE, 1960). O contato inferior é uma discor

dância erosiva esculpida, em grande parte, na Formação Estrada Nova.

Acima desses sedimentos aquosos ocorrem arenitos r $\ddot{o}$ seos e amarelados, finos a m $\acute{e}$ dios, com gr $\acute{a}$ os fosc $\ddot{o}$ s e proeminente estratifica $\tilde{c}$ o cruzada caracter $\acute{i}$ stica (Forma $\tilde{c}$ o Botucatu).

No sinclinal de Torres (Figura 6), a seq $\ddot{u}$ encia apresenta-se mais complexa, tendo sido objeto de estudos litoestratigr $\acute{a}$ ficos detalhados por GAMERMANN (1972) e BORTULUZZI (1974). GAMERMANN (op.cit.) englobou parte do Botucatu e dep $\acute{o}$ sitos fluviais e lacustres das Forma $\tilde{c}$ oes Rio Pardo e Santa Maria numa unica unidade, que designou de Forma $\tilde{c}$ o Ros $\acute{a}$ rio do Sul. SOARES (1975) confrontou as situa $\tilde{c}$ oes litoestratigr $\acute{a}$ ficas descritas por GAMERMANN e BORTULUZZI (op. cit.) e conclui serem as Forma $\tilde{c}$ oes P $\acute{i}$ ramboia e Ros $\acute{a}$ rio do Sul ciclos geneticamente similares. O contato superior da Forma $\tilde{c}$ o Ros $\acute{a}$ rio do Sul faz-se com arenitos eol $\acute{i}$ cos da Forma $\tilde{c}$ o Botucatu (s.s.).

Sob os aspectos que mais nos interessam, as contesta $\tilde{c}$ oes sobre crit $\acute{e}$ rios de contatos e de defini $\tilde{c}$ oes destas unidades litoestratigr $\acute{a}$ ficas s $\ddot{a}$ o de pouca import $\acute{a}$ ncia, uma vez que o conjunto Botucatu, P $\acute{i}$ ramboia e correlatos funciona como um unico sistema aq $\ddot{u}$ ifero. Em conseq $\ddot{u}$ encia, no decorrer da an $\acute{a}$ lise hidrogeol $\acute{o}$ gica, adotar-se- $\tilde{a}$ a denomina $\tilde{c}$ o gen $\acute{e}$ rica de sistema aq $\ddot{u}$ ifero Botucatu.

Associada $\tilde{a}$ sedimenta $\tilde{c}$ o e $\acute{o}$ lica, ocorreram as intru $\tilde{s}$ oes diab $\acute{a}$ sicas e extrus $\tilde{o}$ es bas $\acute{a}$ lticas da Forma $\tilde{c}$ o Serra Geral, de modo que s $\ddot{a}$ o comuns ocorr $\tilde{e}$ ncias subordinadas de arenitos intercalados. Estas ocorr $\tilde{e}$ ncias n $\acute{a}$ o deixam d $\acute{u}$ vidas de que tal pacote de arenito $\tilde{e}$ contempor $\acute{a}$ neo com a atividade vulc $\acute{a}$ nica.

Os derrames de "trapp"^{*} da Forma $\tilde{c}$ o Serra Geral document

* Trapp: termo escandinavo que designa as espessas camadas de lava b $\acute{a}$ sica da Isl $\acute{a}$ ndia, (MAACK, 1970).

tam um dos maiores vulcanismos já registrados no globo terrestre (LEINZ, 1949). Uma extensa análise das características geoquímicas desses derrames de lava básica, sob o ponto de vista da "trend surface analysis", o que constitui uma das mais completas e recentes contribuições ao seu estudo, foi realizada por RÜEGG (1975). As datações geocronológicas aí referidas indicam idades compreendidas entre 120 e 130 milhões de anos.

Os derrames deram-se através de um grande número de extravasamentos, formando várias capas sobrepostas e de extensões muito variadas (LEINZ et alii, 1966). Em alguns locais, até trinta e nove derrames, com espessuras variáveis entre 5 e 25 m, foram atravessados pelos poços da PETROBRÁS, conforme mostramos no Quadro 2.

A maior espessura atravessada foi de 1.529 metros, no poço PE-1-SP da PETROBRÁS.

Os topos dos derrames apresentam-se vesiculares e amigdaloidais. Os níveis piroclásticos são pouco frequentes. A topografia inumada pelas Formações Caiuã e Bauru (FRANGIPANI, 1964), bem como aquela dos domínios aflorantes, é muito acidentada.

Os basaltos da Formação Serra Geral constituem a camada confinante do principal sistema aquífero da Bacia do Paraná. Em consequência, a evolução da sua espessura vai constituir fator limitante das possibilidades de exploração daquele sistema aquífero, conforme veremos mais adiante. Por outro lado, as águas subterrâneas acumuladas nas descontinuidades primárias, secundárias e interderrames são, frequentemente, exploradas através de poços rasos e captação das inúmeras fontes.

O Grupo São Bento engloba os sedimentos Piramboia, Santa Maria, Botucatu e os basaltos.

Assentadas em discordância sobre os terrenos mais antigos, mas, de modo especial, sobre os basaltos, temos as Formações Caiuã e Bauru. A coluna estratigráfica mais frequentemente adotada (NORTHFLEET et al., 1969), situa os arenitos vermelhos fluviais da Formação Caiuã no Cretáceo inferior. A Formação Bauru é constituída por arenitos e siltitos, localmente calcíferos,

QUADRO 2 - CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DOS TRAPPS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL SEGUNDO DADOS DOS POÇOS PETROBRÁS

REFERÊNCIA POÇO	ESPESSURA BASALTO (m)	Nº DERRAMES	Nº INTER.SED.	OBSERVAÇÕES
CM1PR	1157	-	-	-
AP1PR	1199	39	4(12m)	Presença de água no sistema de fraturas
AL1RS	32	-	-	-
AM1MT	17	-	-	-
CA1SC	492	-	-	-
CG1MT	145	-	-	Ao longo do fraturamento tem cor vermelha, rocha fresca verde escura criptocristalina
DO1MT	360	11	-	Basalto vesicular
DO3MT	405	-	-	-
DO2MT	342	-	-	-
DO1AMT	371	10	2	Presença de fraturas
HV1SC	675	-	-	-
ES1RS	911	-	-	-
LS1PR	1025	-	-	-
LI1SP	496	-	-	-
IT1RS	426	-	1(5m)	-
MC1SC	506	19	3(2-3m)	Topo, derrame vesicular, amigdalóide, calcita, quartzo mais água
MA1RS	743	-	-	-
MB1SC	152	-	-	-
MC3SC	384	-	-	Entradas água 310, 350, 380 e 400 m profundidade
MC2SC	421	4	4	-
MR1RS	530	-	-	-
PH1PR	714	-	-	-
PJ1SC	539	14	Vários(2m)	Topos vesiculares, microcristalino interior. Entradas de água nos contatos
PP1SP	910	-	-	-
PE1SP	1529	23	-	Basaltos vesiculares, escoriáceos. Entradas de água nos contatos
OL1SP	802	24	-	Fraturas causam perda circulação topos derrames
RP1MT	182	6	6(1-2m)	Entrada água contatos vesiculares e intertrapps basais
RI1RS	196	-	-	Artesianismo ao penetrar nos sedimentos subjacentes
SD1MT	819	36	-	Contatos vesiculares, com muita água doce
SJ1SC	746	-	-	-
TV2SC	663	25	Vários	Abundante produção de água doce zonas contatos
TO1RS	148	-	-	-
TV1SC	613	26	3	Intertrapp derrames inferiores
TG1SC	355	-	-	-
TV4SC	574	22	3(1-3m)	Espessura derrames 10 a 40 m sendo média de 25m
TP2SC	827	32	2	Contatos vesiculares, intertrapp próximo à base
TP1SC	727	32	-	Espessura média 22m. Muita água doce nos contatos
TQ1MT	68	-	-	-
TL1MT	709	-	-	-
TV3SC	645	22	-	-

cor marrom avermelhada, de ambientes fluvial, lacustre e eólico, atribuída ao Cretáceo superior.

Da análise dos dados dos poços e nos reconhecimentos de campo destacam-se três litofácies principais: um superior, essencialmente eólico, muito calcífero, constituindo os espigões topográficos com falésias abruptas; um litofácies médio, siltico-argiloso, rico em passagens ou camadas mais arenosas, eólicas, fluviais ou lacustres; e, finalmente, um litofácies inferior, de granulação mais grosseira e variada, de ambiente essencialmente fluvial. A ocorrência do fácies inferior parece restrita às zonas mais deprimidas da topografia inumada do substrato basáltico.

Nestes termos, o arenito basal, não obstante só aflorar no extremo oeste, junto ao vale do Rio Paranã, preenche as depressões mais pronunciadas da topografia do basalto. Este comportamento vai influenciar, sobremaneira, na potencialidade aquífera do pacote de sedimentos sobrepostos.

A ausência do Cretáceo superior na metade sul da bacia estaria ligada ao funcionamento da sutura geológica que coincide, virtualmente, com o curso atual do rio Paranapanema (FULFARO, 1974).

Os depósitos mais recentes têm representatividade muito local, fugindo assim ao escopo imediato deste trabalho. Ocorrem, em geral, na forma de retalhos erosivos realçados, terraços escalonados e estreitas planícies aluviais.

2 - FEIÇÕES TECTONOESTRUTURAIS

A Bacia do Paranã constitui uma das três grandes sinéclises paleozóicas da plataforma brasileira. Sua feição foi herdada das estruturas brasileiras que ainda hoje contornam, em grande parte, seus limites erosivos (ALMEIDA, 1967). A estrutura geológica é a de uma grande bacia intracratônica na qual não atuaram esforços de compressão capazes de produzir dobramento in

tenso ou outra feição característica.

As deformações estruturais mais importantes foram produzidas por movimentos diferenciais verticais. Esses movimentos envolveram grandes blocos ou estão relacionados aos eixos dos grandes arqueamentos regionais, conforme ilustram os elementos apresentados na Figura 6. A sedimentação, quase toda de caráter detrítico, atinge a espessura de 5.000 metros, em média, estendendo-se a áreas de centenas de milhares de quilômetros quadrados. A grande extensão e pequena espessura das camadas denotam que, em grande parte da história geológica da bacia, estes movimentos tectônicos diferenciais nunca atingiram consideráveis amplitudes verticais. As condições de deposição em ambiente continental cresceram no decorrer do tempo, denunciando o aumento progressivo da estabilidade do seu embasamento.

Na coluna estratigráfica (Figura 5) identificam-se quatro grandes períodos de ascensão generalizada, separados por três períodos de subsidência. Esse comportamento é documentado pela sucessão alternada de sedimentos detríticos arenosos, separados por fácies pelíticas de águas mais profundas. Esse comportamento tem uma grande importância na caracterização das condições hidrogeológicas da bacia. Com efeito, as fases de ascensão generalizada correspondem às unidades de composição predominantemente arenosa, as quais constituem os principais sistemas aquíferos; ao contrário, as fácies pelíticas constituem os aquíferos regionais.

A estrutura de afundamento progressivo constitui fator determinante das precárias condições de circulação. Em consequência, nas camadas predominantemente arenosas da sequência paleozóica, afogadas que foram pela última grande transgressão marinha, situada no Permiano superior, as condições de ocorrência de água doce ficam restritas às zonas periféricas da bacia, correspondentes aos setores que foram lavados pelas infiltrações de águas de origem meteórica.

Existem indícios de movimentações contemporâneas com as deposições. As movimentações havidas produziram uma sequência

cia sedimentar caracterizada por rápidas mudanças laterais de fácies. A grande variabilidade de condições de circulação decorrentes é evidenciada pelas diferenças de salinidade das águas recuperadas nos testes de formação de poços bem próximos, como veremos mais adiante.

B - AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Do quadro geológico aqui sucintamente descrito, deprende-se que diferentes formações são suscetíveis de se comportarem como aquíferos. Esta vocação está intimamente relacionada com a história geológica da bacia, cuja evolução se caracterizou pela alternância de períodos de rápida subsidência e de períodos de maior estabilidade. O primeiro caso condicionou a acumulação de espessas camadas de sedimentos clásticos grosseiros, enquanto que, nos períodos de estabilidade, ambientes mistos ou marinhos de água rasa proporcionaram a sedimentação de clásticos finos.

Esta evolução da sedimentação, segundo uma sequência rítmica, aliada à geometria da estrutura em forma de bacia subsidente, propiciou a formação de aquíferos livres e confinados, a partir das bordas em direção ao centro.

Os recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná são conhecidos apenas a nível preliminar. Foi preciso um estudo de base, compreendendo um inventário das informações e determinação das características hidrodinâmicas de cada aquífero ou grupo de aquíferos. Malgrado a falta de dados, foi possível estabelecer uma síntese bastante elucidativa das condições hidrogeológicas regionais. Em seguida, foram definidas as condições e métodos de exploração dos principais aquíferos da área e os subsídios para pré-avaliar os custos de lavra da água subterrânea. Com isto é possível uma comparação, do ponto de vista puramente econômico, com outras possibilidades de captação.

Tratando-se dos poços, cujo número é avaliado em cerca de dez mil, sendo que perto de 50% se encontram no Estado de São

Paulo, desejar-se-ia falar perfuntoriamente sobre as suas qualidades técnicas. Inicialmente, saliente-se que, em sua maioria, não fornecem dados técnicos construtivos, perfis geológicos e de de mais informações hidrogeológicas fundamentais. Em segundo lugar, em sua maior parte, foram locados, perfurados, testados e equipapados em atendimento às conveniências dos proprietários ou das empresas de perfuração. Em termos de locação, observa-se, por exemplo, que a localização preferencial de poços nos pontos topopográficos relativamente mais elevados tem como conseqüências prinprincipais: maior quantidade métrica de perfuração, maior custo de construção e, por um lado, maior profundidade de nível estático e, por outro, menor possibilidade de rebaixamento, reduzindo as perspectivas de boas vazões e acarretando grandes despesas de bombeamento. Vale ressaltar que se explica tal comportamento como decorrência da própria forma de fixação das populações nos espigões topográficos, porém, isto não se justifica. Finalmente, os testes realizados não satisfazem, na maior parte das vezes, as condições técnicas necessárias. Em conseqüência, as vazões assissinaladas não representam a capacidade máxima de rendimentos dos poços ou aquíferos. A posição do nível dinâmico referido nas fichas técnicas coincide, com freqüência, com o comprimento da coluna da bomba, do emulsor ou do injetor. Além dos problemas de construção, a influência mais direta refere-se ao mal dimensionamento e operação dos equipamentos de exploração. Por todos esses fatos, os dados de produtividade dos poços deverão ser considerados com suma circunspecção.

1 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Face à grande diversidade de significados atribuídos pelas traduções dos termos técnicos especializados, e, para maior clareza, situamos alguns conceitos fundamentais:

Aquíferos - são formações geológicas ou camadas que, por suas propriedades físicas (porosidade e permeabilidade), ati

tude e condições normais de pressão hidrostática, possibilitam o armazenamento e circulação de importantes volumes de água. A palavra deriva do latim, onde *aqui*, *aqua* = água e *fero*, de *ferre* = suportar, levar. As formações predominantemente arenosas da Bacia do Paraná constituem bons exemplos.

Aqüicludes - são formações geológicas ou camadas capazes de armazenar grandes quantidades de água, mas que só permitem uma circulação extremamente lenta ou praticamente nula. O sufixo *clude* é derivado da forma latina *claudere* = prender. As camadas essencialmente argilosas constituem bons exemplos.

Aqüitardes - é a denominação hidrogeológica mais recente para as camadas que armazenam importantes volumes de água, mas sem condições significantes de circulação; são, portanto, terrenos semi-permeáveis. O sufixo *tarde* é latino e significa tardio, que chega com grande atraso. As formações siltico-argilosas pertencem, com frequência a esta classe. Vale salientar que tal classificação tem um significado muito relativo e é restrito ao contexto hidrogeológico considerado. Ademais, as interações dos parâmetros dimensionais (espessura, extensão e geometria), hidrodinâmicos (coeficientes de permeabilidade, transmissividade, armazenamento ou porosidade eficaz) e potenciais hidráulicos em jogo, têm uma grande importância na avaliação dos terrenos para produção de água subterrânea. Com efeito, uma camada muito espessa mas pouco permeável (aquitarde) poderá oferecer maiores possibilidades hidrogeológicas do que uma outra aquífera, porém, muito menos espessa. Do mesmo modo, uma formação que se comporta como aquífera dentro de um contexto hidrogeológico pode passar, num outro diferente, a constituir um aquítarde.

Transmissividade, T, (L^2T^{-1}) - significa a aptidão do material de transportar a água nele contida. É igual ao produto da permeabilidade (LT^{-1}) pela espessura da camada saturada (L), no caso do aquífero livre, ou espessura total do aquífero confinado.

Armazenamento, S (S.D.) - caso de aquífero confinado, representa o volume de água que é liberado por um prisma vertical de aquífero de seção unitária e altura igual à espessura da camada, para um abaixamento de pressão piezométrica de uma atmosfera.

Porosidade eficaz ou efetiva, u (%) - representa a relação percentual entre o volume de água gravitacional, isto é, água que flui no meio poroso saturado sob a ação da gravidade, em relação ao volume total do material. O coeficiente de porosidade efetiva ou coeficiente de restituição interpreta a quantidade de água suscetível de ser bombeada de um volume unitário de aquífero livre.

Vazão específica, Q/S, ($L^3 T^{-1} L^{-1}$) - é a vazão suscetível de ser obtida de um poço por unidade de rebaixamento de nível. Ela é, geralmente, expressa em $m^3/h/m$ ou em $l/s/m$.

Nível estático, NE (L) - significa a posição do nível da água, livre ou sob pressão, no poço, em relação à superfície do terreno naquele ponto, antes do bombeamento.

Nível dinâmico, ND (L) - indica a posição estabilizada do nível da água dentro do poço em relação à superfície do terreno, para um bombeamento à vazão constante e ao cabo de um período de tempo definido.

Nível piezométrico - significa a altitude do nível da água, livre ou sob pressão, num poço, antes de qualquer bombeamento.

Poço artesiano - quando o seu nível piezométrico fica acima da superfície topográfica.

Poço semi-artesiano - poço com água sob pressão, cujo nível piezométrico fica acima do limite superior da camada aquífera, porém, abaixo da superfície do terreno.

Zona de artesianismo - domínio geográfico no qual os níveis piezométricos de um determinado sistema aquífero ficam acima da superfície topográfica.

Substrato hidrogeológico - formação geológica ou camada relativamente impermeável (aquicluda ou aquitarde) situada na base de um aquífero e sobre a qual vêm se acumular as águas de recarga do sistema.

Aquífero livre - quando as águas aí acumuladas encontram-se em contato com a atmosfera em toda a sua extensão através de uma zona de aeração e em condições normais de pressão.

Confinante - formação geológica ou camada relativamente impermeável (aquicluda ou aquitarde) que recobre o aquífero numa grande extensão, capaz de constituir uma descontinuidade hidráulica e, conseqüentemente, engendrar pressão de confinamento.

Aquífero confinado - aquífero encerrado entre um substrato hidrogeológico e um confinante.

Pressão de confinamento - pressão a que ficam submetidas as águas armazenadas nos aquíferos confinados. Tal pressão, superior à pressão atmosférica, é engendrada pela influência das estruturas no comportamento dos fluxos, aliada ao peso da camada confinante e afins sobrepostos.

Horizonte aquífero - domínio hidrogeológico muito extenso, coincidindo, em geral, com unidades litoestratigráficas cujas condições aquíferas são relativamente homogêneas.

Zonas aquíferas - são domínios aquíferos pouco extensos, encerrados em contextos litológicos, cujas permeabilidades são muito variáveis, e que pode chegar a ser praticamente nulas em parcelas muito importantes.

Essa diferenciação tem uma grande importância prática. Com efeito, poços implantados num horizonte aquífero encontram água com certeza, podendo-se mesmo garantir as suas vazões e qualidade. Ao contrário, poços que exploram zonas aquíferas têm resultados muito aleatórios, podendo, com frequência, serem secos, quando atravessam as parcelas do terreno com permeabilidade praticamente nula. As condições de circulação sendo muito complexas e, por vezes, nulas, as águas são, comumente, mui

to salinizadas. Os resultados são, portanto, imprevisíveis, tanto no que se refere às vazões quanto à qualidade das águas.

2 - OS AQUÍFEROS PRINCIPAIS

Os reservatórios de água subterrânea são unidades hidrogeológicas caracterizadas: por parâmetros dimensionais (extensão, espessura e geometria), que são impostos pela geologia estratigráfica e estrutural; por parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade, armazenamento ou porosidade efetiva), que dependem dos padrões faciológicos; pelas condições de recarga e descarga; e pelas variáveis de estado que descrevem a situação do aquífero em cada instante (superfície piezométrica, importância das reservas, aspectos da qualidade, condições de exploração, etc.). A fim de bem operar o sistema aquífero para produção de água, é necessário dispor-se de todas essas informações, além dos aspectos de ordem técnica e econômica.

O sistema aquífero mais importante da região, representando cerca de 80% do potencial hidrogeológico da Bacia Geológica do Paraná, é o aquífero Botucatu. O conjunto arenoso Botucatu, Pirambóia - Rio do Rasto é, em sua quase totalidade, confinado e mergulha em direção ao centro da bacia, subjacente aos derrames de "trapp" da Formação Serra Geral. De segunda importância, do ponto de vista do potencial de exploração, aparecem as zonas aquíferas da Formação Serra Geral e o sistema formado pelas Formações Bauru e Caiuã. Aquíferos de menor importância, como as Formações Furnas, Palermo e Rio Bonito, além de passagens arenosas da Formação Estrada Nova e demais seqüências predominantemente pelíticas, encontram-se restritos a algumas zonas no domínio dos afloramentos. As possibilidades de exploração tornam-se rapidamente proibitivas, devido às grandes profundidades a que são projetadas, na medida que se caminha para o centro da bacia. Fi

nalmente, as características facirológicas das seqüências encaixantes e condições de circulação fazem com que as possibilidades de ocorrência de água de boa qualidade sejam muito aleatórias. As salinidades são, geralmente, elevadas e apresentam um forte cheiro de gases. De modo geral, as melhores possibilidades ficam restritas aos domínios aflorantes.

Nos terrenos pertencentes ao embasamento cristalino regional, de idade prē-cambriana, as possibilidades hidrogeológicas são ligadas a características locais e excepcionais - zonas fraturadas e/ou muito intemperizadas. São, portanto, possibilidades que somente poderão ser definidas e precisadas através de estudos de detalhes; escapam, assim, ao objetivo e escala desta análise.

No presente trabalho, ênfase especial será dada ao sistema Botucatu. A extensão da análise a todos os sistemas aquíferos alongaria demasiadamente o tempo disponível e demandaria um acervo de dados que não dispomos. Não obstante, a importância econômica dos sistemas Bauru e Serra Geral e suas influências sobre as potencialidades do sistema Botucatu impõem uma análise do conjunto, mesmo que preliminar.

Por outro lado, a literatura hidrogeológica arrola alguns estudos prévios que apresentam uma boa quantidade de dados sobre os aquíferos Bauru e Serra Geral, sinal evidente de sua importância regional.

Os parâmetros dimensionais foram obtidos através de análise das seções geológicas e perfis dos poços, de modo especial daqueles pertencentes a PETROBRÁS, tendo em vista que os demais são parcialmente penetrantes e oferecem dados pouco consistentes ou não oferecem informação nenhuma.

As características geométricas dos principais aquíferos são apresentadas nas Figuras 7 e 8, anexas.

As características hidrodinâmicas foram obtidas através de análise dos perfis geológicos dos poços, dados de nível piezométrico, testes de bombeamento, análises granulométricas,

determinações de permeabilidade em laboratório e interpretação de diagrfias elétricas.

Todos os dados apresentados na bibliografia foram objeto de análise e interpretação complementar, tendo em vista os objetivos específicos do presente trabalho.

2.1 - O SISTEMA BAURU - CAIUÁ

O sistema hidrogeológico Bauru assenta-se, na quase totalidade da sua extensão, sobre os "trapps" da Formação Serra Geral. Ele é constituído por um pacote arenoso de granulação muito variável, cobrindo uma superfície de 315.000 Km^2 , ou seja, cerca de 31% da área estudada (Figura 7).

Recobre as regiões sul e leste do Estado de Mato Grosso (150.000 Km^2), sul de Goiás (30.000 Km^2), sul de Minas Gerais (20.000 Km^2), noroeste do Paraná (11.000 Km^2) e oeste de São Paulo (104.000 Km^2).

Os estudos hidrogeológicos, arrolados na bibliografia, tratam quase que exclusivamente da parcela paulista, sinal evidente de sua importância para a vida econômica desse Estado. Com efeito, essa parcela representa 42% do Estado de São Paulo ou $2/3$ da sua área cultivada e oferece, ainda, em algumas localidades, concentrações de calcário de certo valor econômico.

Os três litofácies dominantes, ou sejam, arenitos calcíferos no topo, arenitos siltico-argilosos de granulação fina a muito fina no meio, e arenitos, argilas e conglomerados misturados em proporções variáveis na base, têm comportamentos hidrogeológicos muito distintos.

Nos milhares de poços (perto de cinco mil), dos quais cerca de três mil somente no Estado de São Paulo, a espessura dos litofácies superior e médio (Formação Bauru) varia, conforme a localização topográfica, de 20 até cerca de 300 m. O litofácies inferior (Formação Caiuá) tem apresentado espessuras que vão desde 10 m até perto de 150 m. A espessura média do conjun

to é da ordem de 100 metros.

Em termos puramente hidrogeológicos, o sistema de ar mazenamento subterrâneo abrange a capacidade da zona saturada que atinge, em média, 80 metros de espessura.

O profundo retalhamento da superfície do planalto are nítico, mormente nas áreas em que a erosão é mais ativa, ou se ja, próximo às bordas nordeste e leste da bacia e nas proximidades dos grandes rios, ocasiona o seccionamento dos domínios de acu mulação. Por outro lado, observando as grandes linhas da rede de drenagem, verifica-se que os interflúvios são, de maneira ge ral, estreitos e alongados. Em consequência, a maior parte da infiltração de águas pluviais, que chega ao aquífero como recar ga, volta a sair do solo como escoamento de base dos rios, num ciclo anual. De fato, a maioria dos poços sofre, de forma mar cante e imediata, os efeitos das variações pluviométricas ou do regime de exploração, já que os interflúvios ou espigões de arenitos são demasiadamente estreitos para formarem um reserva tório apreciável. A sua realimentação é, contudo, muito impor tante. Trata-se de uma recarga facilitada pelas formas tabula res ou suavemente onduladas do relevo e pela capacidade de infil tração relativamente grande dos solos ($k < 10^{-5}$ m/s) aliada a uma pluviometria abundante (1.300 mm/ano, em média). Por outro lado, local e ocasionalmente, é possível certa infiltração indi reta proveniente dos mananciais de superfície e do intercâmbio com aquíferos vizinhos. As contribuições mais importantes na região são, sem sombra de dúvida, as recargas de origem pluvial. Devido à sensível diferença entre essa grande recarga e o flu xo subterrâneo lento, acumulou-se, no passado hidrogeológico, muita água no aquífero, o que ocasionou a subida do nível de sa turação até próximo à superfície, onde oscila de acordo com a periodicidade climática.

As posições dos níveis estáticos (NE) são muito variá veis, isto é, de subaflorantes no domínio dos vales até mais de 90 metros nos interflúvios dos rios mais importantes. O valor médio é de 20 metros.

O sistema aquífero Bauru é principalmente livre, com os níveis ligados aos rios que drenam a região. A superfície piezométrica acompanha o relevo, geralmente a pequena profundidade, de tal forma que os divisores de águas subterrâneas e superficiais praticamente coincidem.

Local e ocasionalmente, observa-se uma certa pressão de confinamento, proporcionada pelas intercalações argilosas ou ocorrências de bancos calcíferos. Aquíferos suspensos ocorrem com certa frequência e são explorados através de cacimbões. As entradas d'água nos poços profundos correspondem às modificações da permeabilidade dos diferentes níveis areno-argilosos, silítico-argilosos ou às passagens mais ou menos ricas em cimento calcífero.

A água acumulada no sistema aquífero Bauru flui, em sua maior parte, para os rios, alimentando o seu escoamento de base, enquanto apenas uma pequena parcela infiltra-se no substrato basáltico, segundo a capacidade de transmissão de suas zonas aquíferas. Assim, os exutórios principais do sistema são os rios e a recarga profunda, além da evapotranspiração efetiva, sobretudo importante nos domínios onde o nível estático torna-se muito raso.

Pela mera inexistência de dados, as infiltrações profundas não podem ser avaliadas. Contudo, representam um volume relativamente pequeno comparado com os outros componentes do ciclo hidrológico e cuja participação no balanço anual deverá ser relativamente constante, conforme frisou-se em II, C, 2.

Não se pode falar em dados médios aritméticos, auferidos de poços os mais diversos, de diferentes profundidades, detalhes de construção, locação e testes de vazão, sem incorrer em sérios riscos. Não obstante, são os únicos valores disponíveis e não se pode ignorá-los.

As leituras mensais de posição do nível estático numa rede de cinquenta e quatro poços (ARID, 1970), durante dois anos (março, 1967 - março, 1969), indicam uma amplitude média de 2 m, sendo 0,70 m e 3,40 m os valores extremos. Os níveis estáticos

dos poços observados tinham profundidades compreendidas entre 17 e 20 m.

O valor médio de 3 m para a variação de nível das águas subterrâneas foi encontrado pelo IGG, na bacia hidrográfica do Rio São José dos Dourados (MEZZALIRA et alii, 1976, no prelo), sobre uma meia centena de pontos observados durante o período de dois anos (1974-1975), e pelo DAEE (1974), no domínio da região administrativa nº 6, onde perto de uma centena de poços são observadas quinzenalmente.

DURANTE (1965, Quadro 3) apresenta dados de noventa e cinco poços, cuja análise revela que o nível estático médio (NE) é de 28 m, sendo que 58% apresentaram valores iguais ou inferiores a 10 m. As vazões variaram entre $79,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo a média de $19,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Contudo, em 54% dos poços, as vazões foram iguais ou inferiores a $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Os rebaixamentos variaram entre 4 e 86 m, sendo o valor médio de 36,6 m. A vazão específica média atinge cerca de $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, sendo que 0,03 e $6,00 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ são os valores extremos e 55% apresentam valores iguais ou inferiores à média.

LEINZ & SALLENTIEN (1962), com base nos dados de cento e sessenta e três poços, mostram que vazões de apenas $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ foram obtidas em 37% dos poços.

Por outro lado, em 80 poços no município de São José do Rio Preto (SP), cujas profundidades variam entre 80 e 140 m, as vazões ficaram compreendidas entre 15 e $20 \text{ m}^3/\text{h}$ (ARID, 1970).

Os dados referentes aos noventa e quatro poços inventariados pelo DAEE-SP (1974) no domínio da região administrativa nº 6 (SP) indicam profundidades que variam de 24 e 147 m, com média de 81 m. A vazão média foi de $15 \text{ m}^3/\text{h}$, com valores extremos de 2 e $80 \text{ m}^3/\text{h}$. A vazão específica média foi de $1,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, sendo que 68% ficam abaixo desta média.

MEZZALIRA (1967, 1974) apresenta dados de seiscentos e setenta e sete poços, dentre os quais quatrocentos e dezoito são parcialmente penetrantes e cujas vazões, em 38% dos casos, ficam

situadas entre 5 e 10 m³/h. Nos poços totalmente penetrantes (duzentos e cinquenta e nove), 27% lograram vazões entre 10 e 20 m³/h.

Os poços com vazões inferiores a 1 m³/h são, geralmente considerados como secos. A frequência de ocorrência é inferior a 3% no total.

No que diz respeito aos parâmetros hidrodinâmicos, os testes de poços de uma qualidade técnica satisfatória (DAEE, 1974), bem como os dados de permeabilidade obtidos sobre seiscentas e quatorze amostras no laboratório (DURANTE, 1966, 1968), indicam permeabilidades que variam entre 10⁻⁶ e 10⁻⁵ m/s.

Os valores da porosidade efetiva situam-se entre 5% e 15% e as condições de confinamento incipiente são evidenciadas pelos valores do coeficiente de armazenamento de 10⁻³.

A falta de critério técnico tão patente, tanto na locação quanto na construção e, sobretudo, no dimensionamento do equipamento de exploração, muito tem concorrido para que se faça uma idéia deveras pessimista, por vezes, sobre as possibilidades hidrogeológicas do sistema aquífero Bauru.

A título apenas indicativo, consideremos um poço que atravessasse uma espessura de aquífero saturado de 80 m e em condições de NE que permita um rebaixamento de até 40 m. Nesta situação, a teoria e a experiência mostram (HUISMAN, 1972, p. 185) ser possível obter-se vazões compreendidas entre 15 m³/h ($K=10^{-6}$ m/s) e 80 m³/h ($K=10^{-5}$ m/s). Para tanto, é necessário que o poço seja locado, projetado, construído e equipado segundo critérios técnicos adequados.

Como veremos mais adiante, a produtividade de um poço é melhor compreendida quando expressada em termos de custo de produção do m³ de água.

Os critérios de locação de poços no sistema Bauru de vem visar, fundamentalmente, a captação da máxima espessura aquífera saturada e em condições de nível estático o mais raso possível. Isto pode ser obtido mediante a integração dos condiciona

mentos faciológicos mais favoráveis, inerentes ao pacote sedimentar e influência da evolução da topografia do solo e do substrato basáltico. Com efeito, nos domínios relativamente mais depri-
midos do substrato basáltico, pode-se captar as maiores espessuras saturadas e tirar proveito dos fácies inferiores relativamente mais permeáveis.

A captação de fontes de depressão e de contato ou, tão simplesmente, ressurgências difusas que ocorrem ao longo dos entalhamentos mais profundos do relevo, são também uma forma plausível de utilização dos recursos hídricos do sistema aquífero Bauru. A utilização de galerias em curva de nível ou a implantação de drenos radiais afiguram-se como os métodos mais adequados aos tipos de fontes ou ressurgências encontradas na área.

Em termos de potabilidade, as águas do sistema aquífero Bauru apresentam uma mineralização total, na maioria dos poços, que não ultrapassa 200 mg/l e com pH de 4,3 e 7,5. Excepcionalmente, dada a influência do cimento calcífero, as águas podem apresentar uma dureza excessiva. Vale ressaltar que, em se tratando de um aquífero livre, existe risco de poluição se medidas preventivas não forem adotadas. Neste particular, SINELLI (1974) e o DAEE (1974) já assinalaram vários indícios.

Em termos de nitratos, já se observa acentuada poluição (30%) dos poços localizados em centros urbanos (DAEE, 1974).

2.2 - AS ZONAS AQUÍFERAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

A grande importância econômica da Formação Serra Geral decorre da reconhecida fertilidade da "terra roxa", oriunda da decomposição dos basaltos e base do grande desenvolvimento agro-pecuário característico da região.

O intenso aproveitamento hidroelétrico verificado também se encontra associado aos condicionamentos favoráveis (topo

gráficos e geotécnicos) à implantação de grandes barragens.

A importância hidrogeológica da seqüência de "trapps" decorre da relativa explorabilidade das suas zonas aquíferas pe los meios técnicos e financeiros disponíveis, aliada à uma confi guração climática altamente favorável e privilegiada, bem como devido à grande extensão do seu domínio de ocorrência (Figura 7). A área coberta pela Formação Serra Geral é de cerca de 720.000 Km² em território brasileiro, sendo que 56% afloram de forma pra ticamente contínua. No contexto global da Bacia do Paraná, a ex tensão de "trapps" atinge cerca de 1.000.000 Km², sendo, portan to, um dos mais importantes do mundo.

As restrições locais decorrem do desmantelamento engen drado pela ação erosiva dos rios e outros fatores a serem devida mente abordados.

Devido a esses fatos, justifica-se plenamente o estudo das águas subterrâneas nessa formação geológica, não se devendo, para tal, poupar esforços para um conhecimento mais preciso das condições hidrogeológicas e das possibilidades de aproveitamento.

Os milhares de poços já perfurados para água (cerca de três mil) têm uma profundidade limitada (80-100 m, em média) e não apresentam, em geral, informações consistentes, tanto geolô gicas como hidrogeológicas. Apenas os poços da PETROBRÁS e os estudos geotécnicos para implantação das barragens oferecem ba ses concretas para o discernimento de resultados práticos e cien tíficos.

As informações assim obtidas revelam que os derrames de "trapps" são compactos e impermeáveis, sendo o armazenamento de água subterrânea limitado às zonas mais intensamente fratura das, contatos intertrapps e ocorrências de sedimentos inter ou intratrapianos.

A variedade de matriz e de estruturas constituem, por tanto, os aspectos geológicos mais importantes que condicionam os comportamentos hidrogeológicos. A Formação Serra Geral é constituída por uma sucessão de derrames basálticos de espessura unitária média da ordem de algumas dezenas de metros. Ainda

muito pouco se conhece sobre a extensão lateral média dos suces
sivos derrames.

Em geral, em cada derrame de "trapp" pode-se diferen
ciar dois tipos texturais mais importantes. Basaltos vesicula
res ou amigdalóides ocorrem preferencialmente no topo e na base
dos "trapps", enquanto basaltos compactos microcristalinos consti
tuem o corpo central. Esta "estratificação" fica acentuada na
seqüência de derrames pela ocorrência de arenitos ou siltitos in
ter ou intra-trapeanos, cujas feições variam de totalmente friã
veis até extremamente silicificados. Preenchendo as amígdalas,
quase sempre aparecem quartzo, calcedônea e terra verde.

Deve-se notar a quase ausência de bombas ou cinzas, evi
denciando a não ocorrência de fases explosivas importantes. Podem
ocorrer, contudo, brechas ou conglomerados de basalto, com matriz
siltosa ou arenosa e alteração profunda nos topos dos derrames,
sugerindo que as efusões foram separadas por intervalos de tempo
relativamente prolongados.

Quanto às estruturas, além das descontinuidades de con
tato já referidas, temos a destacar os fraturamentos. Estes se
guem, em geral, dois padrões distintos. Nas bordas dos derrames
predomina um fraturamento horizontal, enquanto que no corpo cen
tral é preferencialmente vertical. Estes dois tipos parecem ge
neticamente ligados à própria formação do derrame, sobretudo pe
la combinação dos esforços de fluxo e de resfriamento. O basal
to, ao longo das fraturas, apresenta tonalidade vermelha ou mar
rom, enquanto a rocha fresca apresenta-se verde escura, cripto a
médio cristalina.

Ressalte-se que, enquanto as descontinuidades de conta
to são, em geral, de grande abertura (de 0,1 até 10 cm), as fra
turas verticais encontram-se, na grande maioria dos casos, preen
chidas, ou melhor, soldadas por materiais rígidos que têm sido
identificados como sendo argilo-minerais montmoriloníticos, cal
cedôneas e calcita.

Por outro lado, em vários locais de implantação de bar
ragens têm sido observadas descontinuidades horizontais de tão

grande importância quanto os contatos, que foram denominadas de juntas-falhas por GUIDICINI & CAMPOS (1968). Essas juntas podem se estender por várias centenas de metros e variam desde uma única fenda até uma faixa extremamente fraturada, cuja espessura pode atingir de 1,0 a 2,0 m.

Os falhamentos regionais associados ao tectonismo da Bacia do Paraná (LEINZ, 1937, 1949) vêm, muitas vezes, associados a diques de diabásio e são, em geral, preenchidos por minerais secundários. Não obstante, a caracterização hidrogeológica regional pode ser feita com base nos eixos tectônicos, conforme ressaltava HAUSMANN (1966), mercê das intercomunicações dos sistemas horizontais assim engendradas.

Na escala dos derrames, as possibilidades hidrogeológicas são, sobretudo, condicionadas pela importância das discontinuidades de contato, das ocorrências de sedimentos inter ou intra-trapeanos e desenvolvimento das juntas horizontais. Na matriz compacta o comportamento é de microfissuras. Na textura vesicular ou amigdalóide as condições de circulação são muito variáveis, face às injunções decorrentes do preenchimento por minerais secundários e/ou da falta de intercomunicação entre os vazios.

Em geral, as condições mais favoráveis são observadas nas zonas de decomposição, associadas a fraturas horizontais ou contatos, e nos primeiros 100 m de profundidade (HAUSMANN, 1966; LEINZ, 1953 e MAACK, 1970).

As análises do comportamento da permeabilidade ao ar de alguns basaltos (FARJALLAT, 1974) revelam valores de 10^{-3} a 10^{-5} m/s para as estruturas de contato e juntas-falhas horizontais de grande extensão. As estruturas verticais, isto é, diaclases de pequena extensão, acusaram permeabilidades inferiores a 10^{-7} m/s. No Quadro 3 apresentamos os valores disponíveis, cuja média atinge 10^{-5} m/s.

As condições gerais de ocorrências das águas subterrâneas são de aquíferos livres. Nos poços mais profundos evidencia-se, contudo, uma tendência de evolução para uma ocorrência

QUADRO 3 - VALORES DA PERMEABILIDADE DOS BASALTOS DA FUNDAÇÃO DE BARRAGENS (OLIVEIRA et alii, 1976)

BARRAGEM	ESTRUTURA	FEIÇÃO GEOLÓGICA DE ROCHA	OU TIPO	VALORES MÉDIOS DE PERMEABILIDADE m/s OU EQUIV.	OBSERVAÇÕES
PORTO COLOMBIA (rio Grande)	barragem de terra (margem direita)	basalto compacto		$4,7 \times 10^{-6}$	
		basalto vesicular		$1,4 \times 10^{-6}$	
		brecha basáltica		$6,0 \times 10^{-8}$	
		contatos entre derrames		$5,1 \times 10^{-6}$	
	barragem de terra (margem esquerda)	basalto compacto		$1,5 \times 10^{-6}$	
		basalto vesicular		$4,5 \times 10^{-7}$	
		contatos entre derrames		$9,0 \times 10^{-6}$	
		solos residuais		10^{-8}	
VOLTA GRANDE (rio Grande)	estrutura de concreto	contato entre derrames junta - falha		1 l/min x m x atm* 1 a 2 l/min x m x atm	*Valor médio encontrado
SALTO OZÚRIO (rio Iguaçu)	barragem de enrocamento	basalto compacto		1,3 a 3,6 l/min x m x atm*	*Valores obtidos com furos feitos para tratamento das fundações
JUPIÁ (rio Paranã)	em geral (verted. de fundo, casa de força, sala de montagem, barragens de ter- ra)			$6,0 \times 10^{-6}$	
				$7,0 \times 10^{-6}$	
				$3,3 \times 10^{-6}$	
				$1,6 \times 10^{-5}$	
	ombreira esquerda	solo de alteração		10^{-6} a 10^{-8}	*Zonas localizadas de alta permeabilidade 10^{-4} a 10^{-5}
ILHA SOLTEIRA (rio Paranã)	ombreira direita	solo de alteração		10^{-7} a 10^{-9} *	
	estruturas de concreto	basalto compacto (derrame III)		$< 5 \times 10^{-6}$ **	**Zonas localizadas de média (5×10^{-6} a 5×10^{-5}) e alta permeabilidade ($> 5 \times 10^{-5}$)
	estruturas de concreto	brecha basáltica argilosa (topo do derrame II)		$< 5 \times 10^{-6}$ ***	***Zonas localizadas de alta permeabilidade
ILHA SOLTEIRA (rio Paranã)	ombreira esquerda (área da eclusa)	contato entre derrames		1 a 10^{-2} *	*Medidas efetuadas com traçadores (radioisotópicos)
IBITINGA (rio Tietê)	estruturas de concreto	falha		$> 10^{-4}$	
		basalto compacto		$< 10^{-8}$	
		contato entre derrames		10^{-6}	
ILHA SOLTEIRA (rio Paranã)	casa de máquinas e ver- tedouros)	junta - falha		5×10^{-5} **	*Com zonas localizadas de permeabilidade da ordem de $7,6 \times 10^{-4}$ m/s
					**Resultados de ensaios de bombeamento em poços
PROMISSÃO (rio Tietê)	estruturas de concreto	contatos entre derrames basaltos		$> 10^{-4}$ * $< 10^{-8}$	*Resultados mais frequentes

essencialmente confinada e restrita aos contatos e juntas horizontais. Os aquíferos que estas estruturas abrigam podem ser mais ou menos independentes, conforme as juntas verticais que os interligam sejam mais ou menos permeáveis.

Dentro da área de estudo, o pacote de "trapps" desempenha o papel de confinante do aquífero Botucatu e constitui o substrato hidrogeológico do sistema Bauru. A ocorrência de sedimentos inter-trapeanos é mais frequente no domínio inferior da sequência de derrames.

Na área recoberta pelos sedimentos Caiuã e/ou Bauru os poços que perfuram o basalto captam direta ou indiretamente o conjunto aquífero, de tal forma que se torna impossível, além de ser desprovida de sentido prático, qualquer tentativa de diferenciação.

A zona aquífera dos basaltos nada mais é do que um prolongamento em profundidade do aquífero Bauru/Caiuã sobrejacente. Este fato tem grande interesse prático, pois, onde a capa sedimentar é pouco espessa ou descontínua, não oferecendo condições de captação, constitui um meio aquífero de transferência de água para a zona fraturada. Esta contribuição aumenta, aliás, quando se bombeia. Os poços nessas áreas apresentam, invariavelmente, duas entradas de água, a primeira correspondendo ao recobrimento sedimentar e a outra ao condicionamento da zona aquífera.

Por outro lado, nas áreas de pequena espessura ou ao longo das ruturas regionais mais importantes engendradas pelos sistemas de falhas, é possível que ocorram contribuições ascendentes, propiciadas pelo aquífero Botucatu subjacente, desde que os níveis piezométricos deste sejam relativamente muito mais elevados. Esse fenômeno pode explicar as temperaturas elevadas da água de alguns poços mais profundos do basalto, bem como de fontes, e a composição química semelhante. Aqui, os critérios de locação são idênticos àqueles preconizados para o sistema Bauru, isto é, devem visar fundamentalmente a captação da máxima espessura aquífera saturada, em condições de nível estático o mais razoável.

Nos domínios aflorantes, a observação do tipo de rocha e sua textura, do grau de desenvolvimento do manto de interismo, dos processos de disjunção e conseqüentes interligações das estruturas aquíferas, torna-se de suma importância. Outro aspecto importante a ser observado diz respeito ao grau de entalhamento da superfície topográfica. Esse entalhamento verifica-se ao longo das faixas mais fraturadas, por se constituírem caminhos preferenciais para os escoamentos superficiais e subterrâneos. Tal condicionamento é bem evidenciado pela predominância de interflúvios alongados e estreitos. Por outro lado, o profundo entalhamento produz o seccionamento das estruturas aquíferas, determinando, com isso, a impossibilidade de acumulação de volumes importantes. Ademais, a circulação no sistema segue caminhos preferenciais de elevada permeabilidade e é, genericamente, dirigida em direção ao centro da bacia, coincidindo, pois, com o sentido das águas superficiais. Em conseqüência, a maioria das fontes descentes secam praticamente durante os períodos de estiagem mais prolongados e os poços acusam violentas variações de nível.

Os fenômenos tectônicos que atingiram os "trapps" e os aspectos texturais assumem, assim, papel de primeira grandeza nos condicionamentos hidrogeológicos.

A produtividade dos poços, naturalmente, varia muito, em função da complexa interrelação dos condicionadores das zonas aquíferas. Não se deve falar em dados médios aritméticos de produção, auferidos de poços os mais diversos e de diferentes profundidades, detalhes de construção e locação, sem incorrer em sérios riscos.

O nível estático é, em geral, pouco profundo para a disposição fisiográfica do aquífero, mormente em seu domínio aflorante. O paralelismo acentuado que apresenta com a superfície topográfica é um comportamento típico de aquífero de acentuada anisotropia.

Os dados referentes a uma centena de poços relacionados por HAUSMANN (1966) indicam níveis estáticos que variam de 0,32 m até 130 m de profundidade. O valor médio é de 15 m, sen

do que 65% apresentam NE superiores a média. A profundidade dos poços varia entre 31 m e 190 m, sendo a média de 84 m, e apenas 43% são menos profundos.

Ante a grande irregularidade das condições de armazenamento e produção, bem como da falta de critérios hidrogeolôgicos na locação (a grande maioria foi locado em atendimento a conveniências do proprietário), os intervalos de vazão específica (Q/s) registrados poderão melhor servir à avaliação da produtividade.

Nos noventa poços do Rio Grande do Sul, relacionados por HAUSMANN (1966), as vazões específicas variam de $4.10^{-3} \text{ m}^3/\text{h/m}$ a $37,7 \text{ m}^3/\text{h/m}$, isto é, num intervalo de, praticamente, 1 a 10.000. O valor médio é de $2,47 \text{ m}^3/\text{h/m}$, sendo que 81% são inferiores. Por outro lado, MAACK (1970) relaciona cento e sessenta e três poços que apresentam vazões específicas médias variando entre $3,5. 10^{-3}/\text{h/m}$ e $4 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

No Estado de São Paulo, os levantamentos básicos sistemáticos em realização pelas equipes de hidrogeólogos (DAEE, 1974) indicam, para cento e dezoito poços da região administrativa nº 6, uma vazão específica que varia de 1 a $2 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Os testes de bombeamento realizados indicam valores de transmissividade de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, isto é, com intervalo de variação de 1 a 100.

Os desvios menores observados são determinados pelo maior número de dados disponíveis.

Lamentavelmente, dentre os milhares de poços já perfurados, grande parte foi locado e executado por gente desprovida de quaisquer conhecimentos sobre os detalhes técnicos que diferenciam um poço construído de uma simples perfuração. Em consequência, faltam todos os dados sobre os aspectos construtivos e, quando existem, são desprovidos de qualquer consistência. Nestas condições, face à importância sempre crescente das águas subterrâneas para o progresso geral, torna-se necessário o controle das perfurações por hidrogeólogos competentes, a fim de se obter bases concretas para o discernimento dos resultados práticos e

científicos.

Em termos de potabilidade, as águas dos "trapps" (HAUSMANN, 1966; LEINZ, 1953; MAACK, 1970; DAEE, 1974, dentre outros) revelam águas com forte tendência alcalina ($\text{pH} = 5,5$ a $6,5$) e mineralização total sempre inferior a 300 mg/l . Ressal^{ta} tam-se os teores em sílica relativamente os mais elevados, superiores a 30 mg/l , em média.

O único elemento restritivo é o ferro, cujos teores os^{ci}lam entre $9,8 \text{ mg/l}$ a $0,1 \text{ mg/l}$, porém possível de eliminação por simples aeração.

Considerando conjuntamente os valores da vazão específica, verificamos que estes, na maioria das vezes (75%), estão próximos de $0,5 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Este valor poderá ser considerado, com certa margem de segurança, para avaliação das potencialidades das zonas aquíferas dos derrames de "trapp" da Bacia do Paraná. Nestes termos, para os poços projetados e construídos segundo critérios técnicos adequados e com rebaixamento da ordem de 30 m , pode-se conseguir produções de $15 \text{ m}^3/\text{h}$.

A captação de fontes de depressão é também uma forma plausível de utilização dos recursos hídricos dos derrames de "trapp". A utilização fica, contudo, condicionada pelo valor de sua vazão e amplitude de variação sazonal. Não se dispõe de um inventário, mesmo preliminar, que possibilite uma estimativa do seu alcance como manancial.

MAACK & SPITZNER (1946), HAUSMANN (1966) assinalam que as vazões das fontes apresentam-se muito variáveis, de alguns litros por hora até $18 \text{ m}^3/\text{h}$. Elas acusam uma grande amplitude de variação, verificando-se interrupção de fluxo nas menores e redução de até mais de 50% nas mais importantes.

Não obstante o caráter extremamente aleatório dos condicionamentos hidrogeológicos, os poços permitem uma produção mais importante e, sobretudo, mais constante no tempo do que as fontes.

2.3 - O SISTEMA AQUIFERO BOTUCATU

Corresponde à espessa sequência sedimentar integrante das unidades litoestratigráficas conhecidas sob a denominação de Formações Botucatu, Piramboia, Rio do Rasto e outras cronocorrelatas, tais como Morro Pelado, Serrinha, Santa Maria e Rosário do Sul.

Vale ressaltar que, enquanto o arenito Botucatu é caracterizado pelos valores excepcionais de permeabilidade e porosidade, típicos de uma formação de origem eólica, bem selecionada, com grãos arredondados, com, geralmente, pouco ou nenhum cimento e diagênese fraca, as formações basais, de ambiente flúvio-lacustre, apresentam variações facio-litológicas extremas, com interdigitações nos diversos sentidos e com presença de camadras lenticulares de arenitos. Conquanto neste sistema coexista tam formações completamente diferentes, as relações hidráulicas recíprocas estão intimamente ligadas, bem como a problemática exploratória de cada uma, de forma que a conceituação de sistema aquífero único é plenamente justificada.

Este grupo é apresentado nas Figuras 7 e 8 de forma indivisa, dada a relativa descontinuidade e/ou delgada espessura das formações basais e escala do trabalho.

Importa ressaltar que, face às grandes profundidades que atinge e por imposição da camada basáltica confinante, praticamente impermeável, as águas armazenadas no sistema aquífero Botucatu apresentam temperaturas relativamente elevadas. As poucas referências disponíveis indicam valores de até 120° C, medidos em profundidade. Nos poços jorrantes de Três Lagoas e Paraguassu, assinalam-se temperaturas de 70° - 80° C.

Funciona como capa deste sistema aquífero o pacote de "trapps" e, como nível basal relativamente impermeável, as camadas argilosas da Formação Estrada Nova. O aquífero origina-se livre na estreita e perturbada faixa de afloramentos, longitudinal à escarpa da Formação Serra Geral, e confina-se, gradativa

mente, para o interior da bacia, em função do mergulho regional e por imposição das rochas basálticas relativamente muito menos permeáveis sobrejacentes.

A seqüência aquífera atinge espessuras, no domínio brasileiro da Bacia do Paran, de at 843 m, conforme dados do poo da PETROBRS apresentados no Quadro 4.

A extenso territorial abrange uma rea de 818.000 Km², sendo que cerca de 700.000 Km² encontram-se confinados pelos basaltos da Formao Serra Geral, cujo comportamento ilustrado atravs da Figura 8.

Sua alimentao como aqufero feita, em geral, pela infiltrao direta das chuvas que caem nos domnios aflorantes, isto , sobre cerca de 98.000 Km². Trata-se de uma alimentao prejudicada, em sua maior parte, pela posio topogrfica abrupta e pela estreita, conquanto alongada, faixa de afloramento ao longo da escarpa basltica e pelos patamares que desta avanam sobre os sedimentos sotopostos. Por outro lado, localmente, onde as espessuras do basalto tornam-se praticamente nulas ou onde os fendilhamentos profundos atingem o topo deste sistema aqufero, desde que os nveis piezomtricos do basalto e outros aquferos afins sejam superiores queles do aqufero confinado, possvel certa filtrao vertical descendente. Inversamente, onde os nveis piezomtricos do sistema Botucatu confinado sobrepujam aqueles dos sistemas aquferos sobrejacentes, verificam-se fluxos ascendentes.

A circulao da gua infiltrada no sistema aqufero Botucatu dirigida para o centro da bacia, no sentido do mergulho das unidades geolgicas. medida que percolam no meio aqufero, as guas armazenadas so submetidas a presses crescentes de confinamento, proporcionadas pelo peso do pacote basltico e afins sobrepostos. Este comportamento faz com que o sistema se constitua um importante potencial geotrmico de grande alcance econmico e social.

Os nveis de gua mais elevados do sistema aqufero encontram-se no centro da faixa oriental de afloramento (altitu

des de 800 a 1.000 m, no trecho Paran - Santa Catarina). Para o norte as altitudes abaixam-se para 800-500 m para o sul, chegam a atingir 200 m. As flutuaes sazonais de nvel de gua so de 2-3 m nos domnios aflorantes. O gradiente muito pequeno , de maneira geral, dirigido da periferia para o centro da bacia, por imposio das estruturas geolgicas. Pela mera inexistncia de poos em nmero suficiente e convenientemente distribuídos, no possvel se conhecer a evoluo da sua superfcie piezomtrica. Por outro lado, os dados em apreo so pobremente registrados e os poucos disponveis provm de poos de caractersticas e profundidades as mais diversas. Apenas os poos da PETROBRS atravessaram toda a espessura aqufera, mas no foram desenvolvidos para produo de gua. Assim, os dados disponveis devem ser considerados com ordens de grandeza pessimistas. A utilizao das referncias de jorro feitas pela PETROBRS, quando da perfurao dos poos, bem como das referncias de nvel d'gua na zona de afloramento, permitem avaliar um gradiente hidrulico da ordem de apenas 2 metros por quilmetro. As referncias disponveis indicam, por exemplo, uma coluna piezomtrica, acima do solo, de 25 m para o poo de Lins e de 110 m para os poos de Paraguau Paulista e Trs Lagoas, com vazes iniciais de 450, 600 e 1.000 m³/h, respectivamente.

Os dados inventariados pelas equipes do DAEE - So Paulo indicam um gradiente de 1 a 2 m/km. Vale salientar que a rea estudada (Regio Administrativa 6) cobre, virtualmente, os domnios de afloramento do sistema aqufero Botucatu-Piramboia.

A transmissividade relativamente baixa de todas as formaes, os baixos gradientes e a carncia de sadas de drenagem prximas para o sistema aqufero Botucatu no possibilitam um fluxo subterrneo intensivo, comparado com a abundncia da recarga.

As caractersticas hidrodinmicas deste sistema so ainda muito pouco conhecidas pela mera inexistncia de testes. Afora as exploraes nas suas reas de exposio e imediatas, no houve, praticamente, a necessria demanda capaz de justificar a

realização de testes, suficientemente longos ou bem dimensionados para determinação de suas vazões potenciais ou, tão simplesmente, garantir a eficiência máxima dos poços. Até o momento, apenas no Estado de São Paulo, tem-se procurado realizar poços que forneçam o máximo possível de vazão. Infelizmente, o número é ainda muito limitado.

Os dados de poços, total e parcialmente penetrantes, coligidos para o sistema Botucatu, no domínio brasileiro da Bacia do Paran, atingem uma meia centena.

Uma dezena de testes interpretados, mormente no Estado de So Paulo, indica valores de permeabilidade de 10^{-4} m/s para a Formao Botucatu propriamente dita e de 2.10^{-5} m/s para a Formao Pirmboia, ou seja, uma mdia de 6.10^{-5} m/s. Os coeficientes de armazenamento variam de 2.10^{-1} a 10^{-1} nos seus domnio em condies de afero livre e de 10^{-3} a 10^{-6} dependendo do grau de confinamento.

Os dados disponveis so ainda pouco numerosos em relao grande extenso territorial do sistema afero. Porm, o condicionamento geral, litolgico e estrutural do sistema Botucatu muito se aproxima dos aferos ideais imaginados pelos formuladores da hidrodinmica clssica. Em conseqncia, justifica-se na escala do presente trabalho, a adoo de valores mdios representativos de permeabilidade e armazenamento, suficientes para definir as vazes especficas potenciais. De fato, com base nos dados de espessura fornecidos pelos poos da PETROBRS, principalmente, e dos valores de permeabilidade obtidos pelos testes de bombeamento de formao consignados no Quadro 4, foi possvel adotar um valor mdio de 1.10^{-5} m/s para a permeabilidade do conjunto. Esses aspectos sero melhor discutidos mais adiante, quando tratarmos da anlise de tendncias dos parmetros dimensionais e hidrodinmicos do sistema afero Botucatu.

A explorabilidade desse sistema no est restrita apenas ao longo e nas imediaes de sua rea de afloramento. No interior da bacia, desde que se disponha de um mapa plano-alti

QUADRO 4 - CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS FUNDAMENTAIS OBTIDAS DOS POÇOS DA PETROBRÁS REFERENTES AO SISTEMA BOTUCATU E INFERIORES

REFERENCIA POÇO	COORDENADAS LAT. S LONG.W	PROFUNDIDADE TOTAL (m)	PROFUNDIDADE BASE AQUIFERO (m)	ESPESSURA AQUIFERO(m)	FORMAÇÃO GEOLOGICA	PERMEABILIDADE Km/s	POROSIDADE TOTAL %	QUALIDADE ÁGUA ppm	OBSERVAÇÕES
CN2SC	261131 502245	1266	1098	861	Rb	<10 ⁻⁸	9	1500 ClNa	Odor sulfuroso
CN1SC	261607 503113	1775(+)	-	-	Rb	-	22	1155 ClNa	Odor sulfuroso
CM1PR	240630 522545	4454(-)	1938	776	Bt-RR	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵	16	A.D.	A.S.m.P.
CA2PR	242934 512526	1888(-)	244	240	RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
BN2SC	273106 494525	702(-)	430	235	Rb	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁶	18	A.D.	A.D.sulf.m.P.
BN1SC	273032 494525	1100	525	238	Rb	6 a 15.10 ⁻⁸	16	A.D.	A.D.sulf.m.P.
AP1PR	232910 511300	4300(-)	1805	606	Bt-RR	-	-	-	A.S.m.P.
AL1RS	294908 554600	2044(+)	875	843	Bt-SR	-	-	A.D.	-
AG1MT	165500 533200	1947(+)	1779	331	F	-	-	330 ClNa	F.Sup.A.S.m.S.
AM1MT	230600 551330	3371	722	674	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
AB1SP	224637 481059	1649(+)	270	67	PRb	-	-	A.D.	A.S.m.P.
AT1SP	223957 474827	-	350	-	PRb	-	-	A.D.	A.S.m.P.
CA1SC	265140 505025	1935(-)	1082	585	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
TG1SC	270455 511502	2431(+)	945	584	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
CG1MT	202700 543700	2668	529	384	Bt-PI	-	-	A.D.	A.S.m.P.(70.000)
AS1SP	223100 473500	1335(+)	154	27	PRb	-	-	A.D.	A.S.m.P.
PG1SP	223304 473830	1228(+)	295	39	-	-	-	A.D.	A.S.m.P.
CA1PR	243200 512330	2791(-)	1062	289	PRb	-	-	-	A.S.m.P.
RC1PR	230053 504215	1999	768	286	PRb	-	-	A.D.	Prof. >1000 A.S.
DO1MT	221700 545000	4161(+)	1127	762	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(45.000)
DO3MT	221958 545256	2226(-)	1190	769	Bt-SR	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵	20	A.D.	A.S.m.P.
DO2MT	220600 550100	2537(-)	1101	744	Bt-SR	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵	24	A.D.	A.S.sulf.m.P.
GU4SP	232622 481552	912(-)	49	49	Bt	-	-	A.D.	(33.000)
GU3SP	232400 481145	984(-)	45	45	Bt	-	-	A.D.	A.D.sulf.m.P.
DO1AMT	221515 545200	1992(-)	1141	760	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
HV1SC	271220 512700	2691	1308	633	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(69.300)
ES1RS	280000 510000	2418(+)	1610	694	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(38.000)
JA1GO	174845 514650	2107(-)	140	136	Bt	10 ⁻⁶	25	A.D.	A.D.sulf.m.P.
LS1PR	252420 522500	3968(-)	1685	660	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
LT1SP	214010 494035	3459(+)	1296	690	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(4.000)
IT1RS	290100 545930	2533(+)	1062	627	Bt-MP	-	-	A.D.	A.S.m.P.
LA1SC	273833 502210	1343(+)	180	150	MP-SR	-	-	A.D.	A.D.sulf.m.P.
JT1PR	232818 495720	2333(-)	186	136	P	-	-	A.D.	A.D.sulf.m.P.
MI1PR	255240 504710	1861(+)	824	264	PRb	-	-	A.D.	A.S.m.P.
MC1SC	263515 510702	1967(-)	1204	694	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(5.675)
MA1RS	273512 513947	2712	1410	643	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(36.300)
MB1SC	271930 504415	2071(+)	898	741	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
MC3SC	263111 510849	1902	1076	687	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(53.000)
MC2SC	263155 510936	2712(+)	1086	660	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
MO2PR	242616 505217	1991(+)	120	79	Rb	5.10 ⁻⁶	23	A.D.	A.S.m.P.(95.000)
MR1RS	273200 515600	2590(+)	1193	658	Bt-SR	-	-	A.D.	500
PH1PR	254932 513529	3621(-)	1446	727	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
PI1SC	272547 514646	2271(-)	1055	512	Bt-MP	2.10 ⁻⁵	19	A.D.	A.S.m.P.(134.000)
PA1SC	273542 494418	1126(-)	765	340	PRb	-	-	A.D.	A.D.sulf.
PP1SP	222500 503430	3663(-)	1445	471	Bt-MP	-	-	A.D.	-
PE1SP	214509 520600	3953(-)	2164	541	Bt-RR	-	-	A.D.	-
OL1SP	204115 485540	2567(+)	1273	374	Bt-PI	-	-	A.D.	A.S.m.P.
O1PR	241024 505347	2025(+)	275	200	Rb	-	-	-	-
PU1SC	261602 510325	2326(+)	380	368	MP-SR	10 ⁻⁸	21	A.D.	A.S.m.P.(25.000)
RP1MT	202516 535655	3666(-)	834	647	Bt-SR	10 ⁻⁶	22	A.D.	A.D.m.P.
RI1RS	221800 550300	2403(-)	922	691	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
SD1MT	215245 535215	3003(-)	1429	577	Bt-PI	-	-	A.D.	A.S.m.P.
QT1PR	233640 495645	1385(-)	900	-	-	-	-	A.D.	A.S.m.P.
R1PR	243730 505300	1909(-)	459	184	P	-	20	A.D.	A.S.m.P.
SJ1SC	281615 495500	1820(+)	1207	456	Bt-RR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
TV2SC	264401 511751	2965(-)	1267	683	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(43.700)
TO1RS	292000 494815	990(+)	525	373	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(15.000)
TV1SC	264437 511857	2237(-)	1350	737	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(78.000)
SJ1PR	234630 503830	2346(-)	1176	319	SR-PRb	-	-	A.D.	-
TV4SC	264433 511937	2069	662	88	Bt	-	-	A.D.	A.S.m.P.(54.500)
TP2SC	264404 513009	2504(-)	1420	584	Bt-MP	-	-	A.D.	A.S.m.P.(63.500)
TP1SC	264220 512554	3002(-)	1320	562	Bt-MP	1,4.10 ⁻⁵	-	495 ClNa	A.S.m.P.(78.000)
TQ1MT	175200 531530	2021(-)	527	433	Bt	-	-	A.D.	A.S.m.P.
TL1MT	205245 514500	4585(+)	1406	568	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.
TV3SC	264332 511901	2096(-)	1237	592	Bt-SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(64.000)
UV1PR	261130 510200	2162	345	200	SR	-	-	A.D.	A.S.m.P.(15.000)

OBS: Bt = Botucatu; MP = Morro Pelado; RR = Rio do Rasto; SR = Serrinha; F = Furnas; P = Palermo; Rb = Rio Bonito; PI = Piramboia;
A.D. = Água Doce; A.S.m.P. = Água Salgada nas formações aquíferas mais profundas; Sulf. = Sulfurosa; (70.000) = valor da salinidade
medida em ppm de ClNa; (+) = poço que atingiu o embasamento geológico; (-) = poço não atingindo embasamento geológico.

métrico de boa precisão, aliado ao bom conhecimento dos fatores tectono-estruturais e afins condicionantes, pode-se local excelentes sítios de perfuração de poços para explorar o sistema aquífero Botucatu a níveis econômicos. Com base nos mapas plano-altimétricos na escala de 1:1.000.000, foi possível delinear os domínios geográficos com condições de artesianismo. Estes correspondem, praticamente, aos setores cujas cotas topográficas são inferiores a 500 metros. Nos domínios com cotas superiores a 500 metros, as posições da superfície piezométrica poderão variar de subaflorantes a muito profundas. Nas áreas montanhosas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os poços perfurados acusam níveis de até 400 m. Esta observação tem grande alcance prático, conquanto, na medida em que o nível estático dos poços se torna profundo, diminuem as possibilidades de viabilidade econômica das vazões exploráveis. Por outro lado, os equipamentos de exploração normalmente disponíveis no mercado não permitem o bombeamento de vazões importantes em níveis superiores a 100 m.

A viabilidade técnica e econômica de exploração do Botucatu está, portanto, intimamente ligada às condições estruturais e morfológicas. No primeiro caso, temos que levar em conta a posição geográfica, o que vai determinar a espessura do basalto e afins sobrepostos e, conseqüentemente, indicar a possibilidade de ser o aquífero suficientemente penetrado com o equipamento de perfuração disponível. Atualmente, a capacidade das sondas utilizadas no Brasil para água é de no máximo 2.000 metros. Por outro lado, o entalhamento excessivo, com desníveis que chegam a superar os 600 m, permite, local e ocasionalmente, uma possível exploração econômica das águas nestes domínios topográficos mais realçados.

Os estudos de locação devem visar preferencialmente os pontos mais baixos do relevo, na perspectiva de um acesso mais fácil ao aquífero sotoposto e obtensão de nível piezométrico artesianiano ou o mais raso possível. Por outro lado, levando-se em conta os altos investimentos necessários à captação do aquífero Botucatu, torna-se imprescindível a execução de poços conve

nientemente projetados, visando uma máxima eficiência.

A captação de fontes nas áreas de contato Botucatu/Estrada Nova também é bastante promissora em certas áreas, onde ressurgências diversas congregam-se para dar origem a cursos de água. Falta, contudo, um inventário, mesmo preliminar, que possibilite avaliar o alcance dessas fontes como manancial para abastecimento público, industrial ou agrícola.

A qualidade química, física e bacteriológica das águas subterrâneas do Botucatu é, via de regra, adequada ao consumo humano e industrial, segundo os padrões de potabilidade vigentes. A mineralização total é, na maioria dos casos, inferior a 200 mg/l. Em casos muito raros assinala-se a presença de ferro e manganês. A sua utilização para irrigação necessita ser analisada, ao nível dos projetos, devido à abundância de sódio.

O sistema aquífero Botucatu, sendo o mais importante reservatório subterrâneo da Bacia do Paraná e quarta do Brasil, será o objeto fundamental dos capítulos seguintes. Nas análises que se seguirão, destaque especial será dado aos aspectos de custo de produção. Assim, os potenciais hidrogeológicos serão definidos em termos de valor financeiro do metro cúbico de água, o que possibilitará o desenvolvimento de análise Custo/Benefício e, conseqüentemente, definição do valor econômico de suas reservas exploráveis.

Também será possível uma comparação, do ponto de vista puramente econômico, com outros mananciais de água e, por conseguinte, o desenvolvimento de análises de alternativas, na perspectiva de uma exploração integrada e racional dos recursos hídricos da área.

As características fundamentais dos principais aquíferos são apresentadas no Quadro 5.

C - AVALIAÇÃO DAS RESERVAS

1 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS

A Bacia do Paraná constitui, sem dúvida, a mais importante província hidrogeológica do Brasil, em função da sua aptidão em armazenar e liberar grandes quantidades de água e pelo fato de se encontrar nas proximidades das regiões relativamente mais povoadas e economicamente mais desenvolvidas do país.

A avaliação quantitativa das reservas, conquanto a nível preliminar, é de fundamental importância para o planejamento da exploração dos aquíferos.

De forma praticamente unânime, consideram-se as reservas dos aquíferos sob três aspectos principais:

Reservas reguladoras, isto é, o volume de água da zona de flutuação (anual ou sazonal) do nível de saturação. Correspondem ao volume da realimentação anual ou estacional, ou seja, representam o "ativo" do sistema.

Reservas permanentes - volume de água da parte do aquífero situada abaixo da zona de flutuação anual ou estacional. Nas condições naturais, este volume varia somente em intervalos de tempo geológico; representa o seu "passivo". Assim, enquanto as reservas permanentes dão uma idéia da grandeza de volume de água armazenada no aquífero, as reservas reguladoras indicam as

QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DOS PRINCIPAIS AQUÍFEROS

SISTEMA AQUÍFERO	ÁREA DE OCORRÊNCIA (Km ²)	ESP. MÉDIA DO AQUÍFERO (m)	PERMEABILIDADE		COEFICIENTES	
			Tipo	m/s	μ	S
BAURU	315.000	80	Interstício	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶	5 a 15%	10 ⁻³
BASALTO	720.000	100	Fraturas	10 ⁻³ a 10 ⁻⁷	1 a 5%	-
BOTUCATU	818.000	300	Interstício	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵	10 a 20%	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶

suas condições de recarga.

A capacidade de armazenamento de um aquífero pode ser fraca, mas seu rendimento considerável se sua alimentação é assegurada. Inversamente, as reservas permanentes podem atingir dimensões consideráveis, mas ser fracamente realimentadas. A grandeza dos recursos exploráveis poderá ser superior, igual ou inferior ao valor da recarga dos aquíferos no seu estado natural. Por outro lado, o bombeamento de água de um aquífero qualquer provoca um aprofundamento do seu nível e, conseqüentemente, aumento dos gradientes hidráulicos. Se o regime de fluxos ainda permanece linear, isto é, obedece à lei de Darcy, a vazão de escoamento aumentará proporcionalmente ao incremento dos gradientes hidráulicos. Tais efeitos são sobretudo sensíveis nos aquíferos livres.

Recursos exploráveis - Com base nestes valores e nos dados técnicos e econômicos dos projetos, torna-se possível avaliar os recursos exploráveis. Nesta avaliação deve-se considerar que estes recursos podem variar no espaço e no tempo, em função das condições hidrogeológicas, do efeito das explorações sobre o regime de fluxo nos aquíferos, da disposição e concepção das obras de captação e dos equipamentos de exploração, dentre outros fatores. Nestas condições, a diferença que existe entre os aquíferos profundos ou confinados e os aquíferos livres e rasos tem influência não somente sobre as previsões relativas à sua exploração, bem como sobre a maneira de estudá-los e os objetivos a atingir em cada caso. Com efeito, os aquíferos livres e pouco profundos apresentam, normalmente, um "ativo" muito importante em relação com o "passivo". Em conseqüência, torna-se prioritária a avaliação precisa das reservas reguladoras e suas flutuações. A metodologia adotada pelo estudo reconhece, também, que toda e qualquer exploração de um aquífero livre engendra um abaixamento dos níveis de água e, conseqüentemente, induz maiores taxas de recarga. Ao contrário, os volumes armazenados nos aquíferos confinados, como o sistema Botucatu, praticamente não va

riam. Este comportamento pode provir do fato de o fluxo subterrâneo ser muito lento. Por conseguinte, as condições de estado praticamente não sofrem as perturbações ou as acusam num lapso de tempo extremamente longo, em relação com as curtas flutuações climáticas.

O coeficiente de realimentação - relação entre o "ativo" e o "passivo" - bem caracteriza as condições de recarga do aquífero Botucatu, conforme veremos mais adiante.

Nestes termos, no estudo das condições de exploração do aquífero Botucatu para produção de água, prioridade deve ser dada à determinação das características dimensionais e hidrodinâmicas e condições limites. Estes dados servirão para avaliar as condições de exploração, mediante o estabelecimento de modelos de gestão técnico-econômica. O escoamento deverá ser evidentemente estudado, mas, podemos nos contentar com um conhecimento esquemático, tendo em vista precisar as condições limites e o regime hidráulico do sistema aquífero em questão.

Ressalte-se ainda que, atualmente, o conceito clássico, segundo o qual não se devia explorar além das reservas reguladoras ou ativas, torna-se desprovido de sentido. Com efeito, toda e qualquer exploração dos sistemas aquíferos livres ou confinados vai se traduzir por uma nítida queda dos seus níveis piezométricos e, portanto, por uma inevitável redução de suas reservas permanentes e modificação das condições de recarga. A única resposta possível consiste na realização do modelo de gestão através das técnicas de análise de sistemas, as quais permitem o exame sistemático de um grande número de diferentes alternativas para atingir um objetivo, procurando aquela que é considerada ótima, de acordo com um critério adotado.

2 - RESERVAS REGULADORAS

A quantidade de água subterrânea que flui através de um aquífero depende da sua geometria, das suas características

hidráulicas e das condições de recarga e descarga. No caso dos aquíferos livres este escoamento encontra seu caminho no exterior, alimentando os rios e outros exutórios, num ciclo anual, enquanto nos aquíferos confinados o lapso de tempo é muito mais longo. Nestas condições, os aquíferos alimentam, na estiagem, o fluxo de base dos rios com seu próprio armazenamento.

Seguindo este modelo, apresentamos uma estimativa preliminar das reservas ativas de água subterrânea dos principais sistemas aquíferos da área.

2.1 - AQUÍFERO BOTUCATU

A alimentação do mais importante sistema aquífero da área é realizada seguindo dois mecanismos principais: infiltração direta através da sua zona de afloramento e, indiretamente, através das formações sobrepostas. De fato, as Formações Serra Geral e Bauru-Caiuã podem funcionar, local e ocasionalmente, como reservatórios intermediários, os quais, depois de saturados, permitem que parte de suas reservas, assim mantidas, migrem continuamente até o aquífero Botucatu através das descontinuidades intra e interderrames mais ou menos importantes e relativamente permeáveis. Tais contribuições verificam-se em todo o domínio geográfico onde os níveis piezométricos dos aquíferos superiores sobrepujam aqueles do aquífero Botucatu, isto é, em cerca de 50% da área de ocorrência dos basaltos confinantes.

Tomando-se por base o valor da restituição específica aos rios, ou seja, 15% da pluviometria média (1.500 mm/ano) que cai nas áreas de afloramento (98.000 Km²), as infiltrações diretas atingem cerca de:

$$22.10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

No estágio atual de conhecimento, as infiltrações indiretas são muito difíceis de se avaliar. Pode-se, de uma maneira

geral, tratar somente de estimá-las, baseando-se, principalmente, em características médias de permeabilidade e diferença de potenciais hidráulicos. Adotando-se um valor de permeabilidade de $k = 5.10^{-8}$ m/s, um valor médio de diferença de potencial de 100 m, espessura média de camada filtrante de 400 m e com base na equação de Darcy, o volume da infiltração indireta atinge cerca de:

$$138.10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

As reservas ativas totais são, portanto, de:

$$160.10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Por outro lado, nas áreas onde os níveis piezométricos do aquífero Botucatu são mais elevados do que aqueles dos aquíferos sobrepostos, verifica-se fluxo ascendente. Considerando-se que as áreas de admissão e emissão são praticamente equivalentes, porém com diferenças de carga de apenas a metade, as trocas entre os aquíferos devem se verificar na proporção de dois para um, excetuando-se, talvez, o Bauru, que contribui mais do que recebe. Em consequência, o fluxo subterrâneo que atinge a zona de descarga direta, mercê das diferenças de altitudes, deve corresponder à parcela que se infiltrou nas zonas de afloramento, mais cerca da metade da recarga indireta, ou seja:

$$113.10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Tendo em vista as características dimensionais e hidrodinâmicas do sistema aquífero Botucatu, esta descarga pode ser considerada como constante, num ciclo anual.

A adoção de um valor de permeabilidade relativamente baixo para o conjunto confinante, em comparação com os dados pontuais disponíveis, justifica-se, face à grande anisotropia característica dos basaltos.

2.2 - AQUÍFERO BAURU

A avaliação de recarga efetiva ou "ativo" deste sistema aquífero é difícil de ser realizada, devido, sobretudo, ao grande retalhamento engendrado pelos ciclos erosivos e variabilidade de características litológicas. Apesar disso, considerando o comportamento da rede hidrográfica associada, os cálculos baseados na restituição específica oferecem maior segurança, pelo menos relativa.

A análise das curvas de depleção mostram que, para os domínios hidrográficos esculpidos predominantemente nestes sedimentos, temos uma restituição média anual equivalente a 18% da pluviometria (1.300 mm/ano), ou seja, uma lâmina de 234 mm/ano.

A área de ocorrência do sistema aquífero Bauru sendo de 315.000 Km², o valor da reserva ativa atinge cerca de:

$$74.10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Vale ressaltar que, nos domínios de afloramento dos membros médio e inferior do pacote sedimentar, os estudos do DAEE (1974) indicam uma restituição de até 30% da pluviometria média (1.400 mm/ano), refletindo, em parte, a sua melhor aptidão em armazenar e liberar grandes quantidades de água em relação aos membros superior e médio, mais ricos em cimento calcífero e/ou componentes argilosos.

Os dados apresentados no Quadro 1 refletem o comportamento do conjunto de sedimentos, basaltos e terrenos cristalinos que ocorrem nos domínios hidrográficos controlados pelos diferentes postos fluviométricos.

A reserva assim avaliada corresponde aos volumes de água subterrânea que são restituídos aos rios no ciclo anual. A outra parcela que se infiltrou mais profundamente sô reaparece

após períodos de tempo muito mais longos, porém de forma constante.

A adoção dos dados de variação de nível de água dos poços, cuja média atinge 3 m, não se justifica, tendo em vista a grande variação faciológica do pacote sedimentar, o pequeno número de dados sobre a flutuação dos níveis e, sobretudo, a extrema variabilidade das características construtivas dos poços observados.

Não foram incluídas nestas avaliações as reservas das zonas aquíferas da Formação Serra Geral, pois não se pode definir, na escala deste estudo, a extensão e localização das zonas armazenadoras. A alimentação é realizada pelas chuvas e rios, diretamente, através do fraturamento exposto e, indiretamente, através da cobertura dos sedimentos das Formações Bauru-Caiuã, ou do manto de intemperismo e dos aluviões. Daí porque, a captação destas reservas, através de poços tubulares, sempre apresenta duas entradas de água: uma mais rasa, correspondente à base do recobrimento, e outra, mais profunda, correspondente à zona aquífera do basalto.

A avaliação adequada da recarga efetiva destes reservatórios somente será possível mediante o estudo de unidades hidrológicas homogêneas.

3 - RESERVAS PERMANENTES

A partir do conhecimento das características dimensionais e hidrodinâmicas dos aquíferos, foi realizada uma estimativa preliminar das reservas permanentes de água subterrânea dos dois sistemas aquíferos mais importantes da área.

3.1 - AQUÍFERO BOTUCATU

As reservas permanentes do sistema aquífero Botucatu são aquelas quantidades de água armazenadas nas rochas e suscetíveis de serem restituídas por gravidade (água de saturação), mais o volume de água acumulada sob pressão.

O volume de água de saturação do aquífero é avaliado tendo-se por base os seus parâmetros dimensionais e coeficiente de porosidade efetiva. Sendo admitida para os 800.000 Km² do sistema aquífero Botucatu uma espessura média de 300 m e porosidade eficaz de 20%, obteremos:

$$R_s = 48.10^{12} \text{ m}^3$$

O volume de água sob pressão é determinado tendo-se por base a extensão do domínio em condições de confinamento, a correspondente espessura média e o coeficiente de armazenamento da camada aquífera.

Os dados disponíveis permitem a adoção de uma superfície de 700.000 Km² com água sob pressão, espessura média da camada de 300 m e coeficiente de armazenamento de 10⁻⁴. Temos, então:

$$R_p = 21.10^9 \text{ m}^3$$

As reservas totais permanentes do Botucatu atingem, portanto, cerca de:

$$48.021 \text{ bilhões de m}^3$$

3.2 - AQUÍFERO BAURU

As reservas permanentes do sistema aquífero Bauru são aquelas quantidades de água armazenadas nos sedimentos abaixo do nível de variação periódica e suscetíveis de serem restituídas por gravidade.

Sendo a espessura média saturada de 80 m, a porosidade eficaz de 10% e a extensão de cerca de 300.000 Km², obtemos:

$$R_p = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$$

O coeficiente de realimentação do aquífero Botucatu sendo de $3 \cdot 10^{-3}$ contra $3 \cdot 10^{-2}$ para o sistema Bauru, bem evidencia as suas condições fundamentais de ocorrência.

4 - RECURSOS EXPLORÁVEIS

A fração do volume total de água armazenada nas rochas que pode ser utilizada, dentro dos limites de viabilidade técnica e/ou econômica, constitui as reservas exploráveis ou os recursos de água subterrânea da área.

Os limites de explorabilidade são bastante variáveis, o que torna relativamente difícil estabelecer a quantidade global de água realmente capaz de ser explorada para uma área tão extensa.

Teoricamente, as reservas ativas correspondem àquelas quantidades de água que podem ser exploradas sem que ocorram perturbações hidrológicas no quadro geral da região. A utilização das reservas permanentes implicaria em um progressivo esgotamento dos aquíferos. Tratando-se de aquíferos confinados, admite-se, também, que a exploração não deve provocar declínios de níveis d'água abaixo do teto da formação aquífera.

Na prática, tendo em vista, sobretudo, as formas dos cones e o regime de fluxo contínuo nos aquíferos, torna-se impossível captar o volume total das reservas reguladoras. No caso de bacias hidrogeológicas relativamente fechadas como o nosso, a experiência tem demonstrado ser possível captar até cerca de 2/3 das recargas.

A parcela efetivamente explorável por poço será função do nível dinâmico adotado e do tempo de exploração. As condições técnicas de exploração sugerem níveis dinâmicos de 100 m e de 50 m respectivamente, para os domínios confinado e livre. Nestes termos, o volume explorável por poço pode ser avaliado através das equações de THEIS (1935), considerados os valores dos coeficientes hidrodinâmicos dos aquíferos, já referidos ao longo desta análise.

Empregando valores de campo, a equação de THEIS pode ser expressa por:

$$s = \frac{q}{4 \pi T} \cdot W(u) \quad \text{ou} \quad q = \frac{s \cdot 4 \pi T}{W(u)}$$

em que s é o rebaixamento em metros, q é a vazão do poço em m^3/s , T é o coeficiente de transmissividade em m^2/s e $W(u)$ é a integral exponencial denominada "função de poço". O argumento u é dado por:

$$u = \frac{R^2 S}{4 T t}$$

em que R é a distância em metros do poço de observação ao poço de bombeamento, S é o coeficiente adimensional de armazenamento e t é o tempo de bombeamento em segundos.

Para efeito dos cálculos, adotamos um $R = 10^{-1}$ m, equivalente ao raio da porção com filtros; t de 20 anos, correspondente à vida média do poço; $T = 5 \cdot 10^{-3}$ e $S = 10^{-4}$, para o aquífero confinado; e, $T = 10^{-3}$ e $S = 5 \cdot 10^{-2}$ para os domínios livres.

Nestas condições, a vazão explorável por poço, em regime de bombeamento contínuo, será de $763 \text{ m}^3/\text{h}$, ou seja,

$$6,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

para o aquífero confinado, e de $61 \text{ m}^3/\text{h}$, ou,

$$0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

para o aquífero livre.

As posições dos cones são apresentadas na Figura 9 onde se pode verificar que o raio de influência do poço que capta o aquífero livre atinge cinco quilômetros. No caso do aquífero confinado temos que, a dez quilômetros de distância do poço, já se observa um rebaixamento de 22 metros. Este valor representa a interferência, isto é, o acréscimo de rebaixamento que seria provocado pela exploração de um segundo poço de produtividade equivalente e situado a 20 km do primeiro. Vale mencionar que, em se tratando de um aquífero com grande pressão de confinamento, a perturbação engendrada pelo bombeamento em um ponto qualquer do domínio propaga-se rapidamente, devido ao elevado grau de elasticidade do sistema.

Constata-se, aliás, que o raio de influência do poço simulado atinge perto de 300 km ao cabo de um ano de bombeamento. Nestes termos, torna-se impossível atender às condições de não interferência que eram preconizadas de forma tão peremptória pelos clássicos da hidrogeologia. Atualmente, o espaçamento ótimo é definido pela condição de equivalência entre o valor adicional das despesas de bombeamento, gerado pelas interferências, e a redução dos custos de adução e rede elétrica. Esta condição de equivalência varia, no espaço e no tempo, em função dos progressos realizados no campo tecnológico ou econômico.

Por outro lado, sob o efeito da exploração contínua e outras causas artificiais, as reservas reguladoras podem variar. De maneira geral, o abaixamento do nível é mais acentuado durante os primeiros anos, enquanto não se estabelece o novo equilíbrio di

Fig.9 - EVOLUÇÃO DOS CONES

nãmico do sistema aquífero. Por todos estes fatos, uma avalia
ção em escala regional é extremamente difícil.

Numa primeira aproximação, pode-se admitir um valor de
reserva explorável como sendo equivalente a 1/3 das recargas
anuais, ou seja,

$$80. 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Tendo-se adotado, sistematicamente, grande margem de
segurança nos cálculos, os volumes encontrados podem ser encara
dos como ordens de grandeza pessimistas.

Não obstante, do exposto, observa-se que os recursos dis
poníveis são cerca de vinte vezes superiores à demanda da populaa
ção atual (40 milhões), considerando-se a taxa "per capita" de 300
litros/habitante/dia, ou seja

$$4. 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$$

A caracterização de tão abundantes recursos não deve
ser tomada como um convite ao desperdício. A necessidade de
adoção de medidas que visem o uso e a conservação de um contex
to hidrológico equilibrado vem se tornando um desafio cada vez
maior no Brasil e no mundo.

No Quadro 6 apresentamos os valores das reservas hidro
geológicas da Bacia do Paranã. Consideradas as vazões poten
ciais dos poços para que os níveis dinâmicos de 100 m e de 50 m sejam
atingidos ao cabo de 20 anos, respectivamente nos sistemas aquíferos
confinados e livres, torna-se possível explorar cerca de
20.000 poços, ou, um número muito maior, proporcionalmente aos me
nores valores da vazão explorada em cada poço.

QUADRO 6 - RESERVAS DOS PRINCIPAIS AQUÍFEROS

Sistema aquífero	Reservas reguladoras	Reservas permanentes	Reservas exploráveis	Número de poços
BAURU	74.10^9	$2.400.10^9$	24.10^9	12.000
BOTUCATU	160.10^9	$48.021.10^9$	56.10^9	8.000

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE TENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DIMENSIONAIS
E HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BOTUCATU

A - ASPECTOS METODOLÓGICOS

Num escoamento tridimensional no meio poroso a repartição dos potenciais obedece a equação seguinte:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (T_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S \frac{\partial h}{\partial t} \pm q$$

com;

x, y, z = coordenadas de um ponto do domínio [L]

T_x, T_y, T_z = coeficientes de transmissividade nas direções x, y e $z = [L^2 T^{-1}]$

S = coeficiente de armazenamento [S, D]

q = vazão entrando (+) ou saindo (-) do sistema $[L^3 T^{-1}]$

h = potencial hidráulico do ponto observado [L]

Essa equação, na sua forma derivada parcial, não pode ser resolvida, diretamente, na maioria dos casos. Adota-se, com frequência, uma solução aproximada, que consiste em substituí-la por uma equação à diferenças finitas, isto é, uma equação na qual as derivadas parciais de uma quantidade em relação à uma das variáveis, são substituídas pela relação de duas diferenças finitas.

Na prática, o domínio de estudo é discretizado através de uma malha, cujas dimensões devem ser suficientemente pequenas para que se possa considerar que, em cada célula centralizada sobre um ponto (i, j) e de lados $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, as condições de homogeneidade e isotropia são satisfeitas. Assim, ao invés de procurar conhecer o valor das incógnitas em todos os pontos do domínio, podemos nos limitar aos nós da malha.

A equação geral apresentada nada mais é do que o argumento da lei de conservação do fluxo:

— os seis termos do primeiro membro representam o fluxo que entra ou que sai pelas seis faces da célula considerada;

— o primeiro termo do segundo membro representa o arma

zenamento específico da célula;

—o segundo termo do segundo membro representa a vazão de recarga ou descarga do meio, por exemplo, infiltração de chuvas (+), bombeamentos (-).

Obtêm-se, portanto, se N é o número de células, um sistema de N equações com N incógnitas; as incógnitas sendo os valores de h se o potencial não é fixado e q se o potencial é fixado. Cada equação comporta, assim, sete incógnitas.

Para resolver esse problema impõe-se, em geral, os valores dos parâmetros hidráulicos nos pontos observados e simula-se, através de modelos matemáticos ou analógicos, o comportamento dos fluxos no aquífero. Compara-se a piezometria calculada com aquela observada no campo e repete-se a operação até obter uma boa concordância.

Essa fase de aferimento será tanto mais curta quanto mais consistentes forem os dados de entrada. Regra geral, trabalhos complementares de campo tornam-se necessários, acarretando grandes despesas e perda de tempo. Nessas condições, a identificação prévia dos valores dos parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos de representatividade regional à introduzir em cada malha do modelo, tem um grande alcance prático e científico, mormente quando se tratar de domínios extensos e com pequena densidade de dados experimentais. Por outro lado, a obtenção de representações ordenadas sobre a distribuição e avaliação da qualidade dos dados disponíveis, ao nível mesmo do reconhecimento, conduzirá a uma racionalização das tarefas de campo, evitando-se, ainda, a acumulação de dados que pouco ou nada contribuem para o melhor conhecimento do problema.

As variações dos parâmetros podem ser visualizadas através de linhas de contorno que se apoiam nos valores numéricos da variável em questão, colocados no ponto de observação. São métodos de avaliação visual e por conseguinte, sujeitos a um elevado grau de subjetividade. Diferentes pessoas construirão linhas de contorno diversas, a partir dos mesmos dados.

O procedimento estatístico permite uma análise objetiva. Dentre os métodos estatísticos recomendados, ressaltase o "Trend Surface Analysis". A superfície de tendência pode ser definida como a forma de tratamento que permite separar os dados de representatividade regional daqueles de importância local. Os valores identificados pela análise de tendência apresentam uma variação sistemática sobre todo o domínio de ocorrência. As flutuações em menor escala e aparentemente não sistemática, podem ser identificadas através da análise dos resíduos, isto é, desvio do valor de tendência em relação ao observado.

No domínio da hidrogeologia, o problema geralmente apresentado consiste em se determinar a distribuição de um valor P (parâmetro geométrico ou hidrodinâmico) que é função das coordenadas cartesianas X e Y . Trata-se, de fato, de mapear a superfície que melhor se ajusta aos valores P num espaço bidimensional. O argumento tem a seguinte anotação:

$$P(X_i, Y_j) = p(X_i, Y_j) + e_{ij}$$

isto é, o valor do parâmetro P observado num espaço bidimensional é igual ao valor de tendência, mais o componente de aleatoriedade e_{ij} .

Ao se interpretar os resultados de uma análise de tendências deve-se ter em mente que a superfície corresponde a uma equação de um determinado grau, em um sistema tridimensional de coordenadas X , Y e Z . Uma superfície de primeiro grau é um plano, cuja equação é:

$$Z = A + Bx + Cy.$$

Uma superfície de segundo grau é um parabolóide, isto é, uma superfície gerada por uma parábola (equação de 2º grau num sistema de coordenadas cartesianas) que se move sobre outra não contida no mesmo plano e cuja equação é:

$$Z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2$$

A equação da superfície de 3º grau contém os termos de zero, primeiro e segundo, e mais quatro termos cúbicos

$(Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3)$. Pode-se, assim, obter a equação representativa de uma superfície de grau qualquer, simplesmente adicionando-se os termos da expressão polinomial de grau mais elevado correspondente.

A determinação do grau da superfície de melhor ajuste é feita com base na densidade de amostragem e nos valores dos parâmetros estatísticos fundamentais, tais como: por cento da soma total dos quadrados, desvio padrão e coeficientes de determinação e correlação.

Vale salientar que HOWART (1967) ao analisar várias distribuições de dados gerados ao acaso, preconizou certos critêrios para a aplicação do método de "Trend Surface Analysis". Estabelece, por exemplo, que o número de dados deve ser três vezes superior ao número de coeficientes da superfície; o por cento da soma total dos quadrados deve ser superior a 16,2%, pois valores mais baixos podem estar ligados as distribuições não sistemáticas. Assim, tendo em vista o pequeno número de dados (34) restringiu-se a aplicação da técnica a superfície de grau 3.

Por outro lado AMARAL (1976) preconiza o valor da porcentagem da soma total dos quadrados com o parâmetro mais sensível. Para o número de dados disponíveis esse valor deve ser superior a 31%.

Os cálculos foram realizados em computador, a partir de um programa escrito em linguagem FORTRAN IV, adaptado aos equipamentos Burroughs B 6600/B 7 700, do Centro de Computação da Universidade de São Paulo. O programa "TREND" desenvolvido por AMARAL (1975) desenvolve as matrizes até o 8º grau, e calcula os parâmetros estatísticos destinados a avaliar o nível de ajuste das várias superfícies obtidas. Os polinômios são tratados pelo método dos mínimos quadrados e as matrizes são resolvidas pelo método de Gauss, com refinamento de solução e dupla precisão, de tal forma que os coeficientes obtidos tem erro inferior a 0,5%.

Através de uma sub-rotina, os mapas correspondentes as superfícies de 1º ao 8º graus, são diretamente impressos pelo computador.

A análise dos resíduos serve para orientar as campanhas de campo com vista à obtenção de dados complementares. O pequeno número de parâmetros disponíveis, em relação com a extensão do domínio, não permite uma análise estatística mais aprofundada. O enfoque realizado visou, tão somente, chamar a atenção dos interessados sobre o grande alcance científico e prático dessas técnicas na abordagem hidrogeológica regional. O assunto é muito vasto e foge ao escopo imediato dessa análise, preferindo-se, assim, voltar a ele oportunamente.

B - ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA

1 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA BASE DO SISTEMA AQUÍFERO BOTUCATU

Quando se pretender explorar a vazão máxima do aquífero, os poços deverão ser totalmente penetrantes, isto é, deverão atingir sua base. O conhecimento prévio da profundidade das captações é de fundamental importância para elaboração do projeto do poço e avaliação dos meios técnicos e financeiros necessários à execução da obra.

O mapade "Trend Surface" para as profundidades (Figura 10) indica dois maiores aprofundamentos, correspondentes à depressão de São Paulo e ao sinclinal de Torres, separados por uma sela na altura do Arco de Ponta Grossa. A tendência dos valores máximos é de 1800 à 1900 metros. A evolução geral das profundidades reflete, sensivelmente, a geometria geral da bacia. O valor do por cento da soma total dos quadrados de 49 e do coeficiente de correlação superior a 70%, indicam o bom grau de ajuste da superfície obtida.

A evolução geral dessa superfície corrobora as interpretações apresentadas por FULFARO (1971) sobre o comportamento tectônico e paleogeográfico da Bacia Sedimentar do Paraná.

Figura 10 - Superfície de tendência do grau 3 da profundidade da base do aquífero Botucatu. Porcento da soma total dos quadrados = 49.6. Coeficiente de correlação = 71%.

2 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA ESPESSURA AQUÍFERA

A evolução das espessuras do sistema aquífero Botucatu, isto é, do conjunto predominantemente arenoso situado entre a capa basáltica e os sedimentos argilosos da Formação Estrada Nova, é apresentada na Figura 11. Verifica-se que as espessuras aumentam da periferia para o centro. O por cento da soma total dos quadrados é de 38,9% e o coeficiente de correlação é superior a 62%, o que indica um relativo ajuste da superfície.

Esse quadro é ligeiramente diferente do anteriormente descrito, sobretudo no que diz respeito a evolução da forma ovalôide cujo eixo principal tem direção norte sul, no domínio da depressão de São Paulo, e passa a sudoeste-nordeste na zona situada ao sul. A comparação dessas formas com aquela encontrada por FULFARO (1971), referente as isôpacas da Formação Botucatu s. s., indica que o fâcies sub-aquoso deve representar a parcela mais importante do pacote aquífero. Existe, com efeito, uma boa concordância entre o mapa da Figura 11 e a faciologia dessas formações, isto é, as partes mais espessas ocorrem, na realidade, nas áreas onde os depósitos exibem as características de deposição sub-aquosa mais marcantes. Esse ciclo culminou com o assoreamento quase completo do ambiente de sedimentação. A evolução do contexto geral deu-se no sentido da aridez, o que favoreceu o retrabalhamento pelo vento dos sedimentos aflorantes e desenvolvimento de uma drenagem endorrêica; num quadro em muito semelhante as regiões desérticas atuais. O aumento da deposição eólica está associado com os derrames de lava basáltica. O fâcies Botucatu s.s. parece ser, tão somente, o produto do retrabalhamento eólico dos sedimentos de deposição sub-aquosa sotopostos.

O conhecimento da evolução da espessura da camada aquífero é de suma importância, tendo em vista a sua grande influência sobre as transmissividades e conseqüentemente, sobre as potencialidades hidrogeológicas dos fâcies.

Figura 11 - Superfície de tendência do grau 3 da espessura do aquífero Botucatu. Porcento da soma total dos quadrados = 42. Coeficiente de correlação = 65%.

3 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA ESPESSURA DO BASALTO

Os basaltos da Formação Serra Geral constituem a camada confinante do grande sistema aquífero Botucatu e, por suas características de dureza e espessura, muito oneram as despesas de exploração, pois os custos de perfuração nos basaltos são de três a quatro vezes superiores àqueles dos sedimentos. Por to dos esses motivos torna-se de fundamental importância o conhecimento da espessura da camada basáltica para elaboração do projeto dos poços e realização da estimativa dos custos de perfuração.

O padrão dessa superfície (Figura 12) é muito semelhante ao da Figura 10, sugerindo, portanto, a retomada de um desenvolvimento tectônico interrompido durante a deposição da Formação Botucatu s.s. A superfície gerada mostra um eixo de maior acumulação orientado de nordeste para sudoeste, no domínio da depressão de São Paulo e depois de norte para sul. O máximo de espassamento verifica-se na parte central da bacia, ao longo do rio Paranã. Uma redução encontra-se bem marcada na altura do Arco de Ponta Grossa. O porcento da soma total dos quadrados sendo de 55 e o coeficiente de correlação superior a 74% indicam o grau de ajuste dessa superfície.

O padrão geral é ligeiramente diferente daquele encontrado por FULFARO (1971). Nas áreas de maior espessamento permanecem os retalhos da última fase de sedimentação correspondente às Formações Caiuã e Bauru. Esse comportamento serve para indicar a tendência de maior subsidência nessas áreas.

4 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSIVIDADE ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

Esse coeficiente interpreta as aptidões do aquífero em transportar a água nele armazenada. O seu conhecimento é de fundamental importância para estudo do comportamento geral dos fluxos e avaliação da produtividade dos poços. Utilizando-se as

Figura 12 - Superfície de tendência do grau 3 da espessura do basalto. Porcento da soma total dos quadrados = 55. Coeficiente de correlação = 74%.

técnicas dos modelos de simulação, a imposição do coeficiente de transmissividade, representativo em cada célula de discretização do domínio, permite calcular, com rapidez e segurança, os fluxos de transferência dos aquíferos. A resolução do problema direto consiste em, com base nos valores de transmissividade T , gerar os mapas dos potenciais h , inicialmente em regime permanente

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad \text{e depois em regime transitório.}$$

O coeficiente de transmissividade, cuja evolução é apresentado na Figura 13, é igual ao produto da espessura (Figura 11) pela permeabilidade. O valor de 10^{-6} m/s é geralmente usado com o limite inferior que classifica um material como permeável. Os valores encontrados variam de 10^{-3} a 10^{-9} m/s. A análise comparativa dos elementos dessas figuras mostra uma tendência de aumento da permeabilidade, do centro para a periferia. Um tal comportamento vem corroborar os modelos de evolução faciológica definidos por FULFARO (1971), segundo os quais os componentes arenosos dos sedimentos aumentam nessa direção. O percento da soma total dos quadrados é de 33%, o que indica o bom ajuste da superfície.

5 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DA VAZÃO ESPECÍFICA ($m^3/h/m$)

Em muitos casos, especialmente ao nível dos estudos de reconhecimento, as propriedades hidráulicas dos aquíferos podem ser estimadas a partir da vazão específica. Vale ressaltar, todavia, que sendo as vazões específicas dos poços sensivelmente afetadas pelos fenômenos de penetração parcial, perdas de carga e condições limites, os coeficientes de transmissividade assim avaliados representam, apenas, ordens de grandeza pessimistas.

Por outro lado, como a vazão específica varia com o logaritmo de $1/S$, resulta pouco precisa uma avaliação do coeficiente de armazenamento, em comparação com os pequenos erros re-

Figura 13 - Superfície de tendência do grau 3 do coeficiente de transmissividade ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) do aquífero Botucatu. Porcento da soma total dos quadrados = 33. Coeficiente de correlação = 57%.

lativos à avaliação do coeficiente de transmissividade. Considere-se, contudo, que a vazão específica se aproxima do valor do coeficiente de armazenamento com o tempo, sendo praticamente igual para períodos de bombeamento contínuo superior a 180 dias, conforme demonstra WALTON (1970).

A superfície de tendência apresentada na Figura 14 revela um comportamento muito semelhante a evolução das transmissividades, em concordância, portanto, com os princípios básicos da hidráulica subterrânea. O aumento sensível das espessuras, da periferia para o centro da bacia, compensa de forma remarcável a redução dos valores da permeabilidade que é engendrada pelo aumento gradativo do componente argiloso. Esse comportamento serve para ilustrar a fragilidade das avaliações hidrogeológicas que são baseadas nos valores da permeabilidade. Em termos práticos e científicos deve-se sempre considerar o coeficiente de transmissividade. Com efeito, uma camada de sedimento de 300 metros de espessura e com permeabilidade de apenas 10^{-6} m/s é melhor aquífera do que uma outra com permeabilidade dez vezes maior mas com apenas 100 metros de espessura. Quando se tratar de um aquífero livre, o primeiro, caso tem ainda a seu favor a possibilidade de um maior rebaixamento e conseqüentemente maior vazão.

6 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DO M³ DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A evolução da superfície de tendência apresentada na Figura 15 indica a importância do fator custo de construção dos poços na composição das despesas. Com efeito, não obstante poder-se ter as maiores vazões na zona central da bacia, tendo em vista as condições mais favoráveis de nível estático, os custos de produção são ainda os mais elevados. Em termos relativos, os custos de produção mais elevados tem ainda condições de concorrer com as demais fontes de abastecimento da área. Com efeito, os aquíferos, em termos de volumes armazenados e custos, são mais do

Figura 14 - Superfície de tendência do grau 3 da vazão específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) do aquífero Botucatu. Porcento da soma total dos quadrados = 36. Coeficiente de correlação = 51%.

que suficiente para atender as demandas. Sob o plano qualitativo a importância das águas subterrâneas é ainda mais evidente. Com efeito, as águas superficiais são, no seu estado natural, impróprias para o consumo humano. As despesas de purificação e de transporte são muito elevadas e tanto mais difíceis de rentabilizar quanto as demandas são fracas ou muito dispersas.

Em definitivo, as águas subterrâneas da Bacia do Paraná, por apresentarem a dupla vantagem de melhor se adaptarem a estrutura da demanda e de não exigirem tratamento ou transporte, tem um papel muito importante nas estratégias de desenvolvimento racional dos seus recursos hídricos.

No que diz respeito a alimentação humana, ressalte-se que, na medida em que a demanda não ultrapasse a capacidade de produção dos poços ou que não se encontre em condições de rentabilizar os elevados custos das instalações de tratamento das águas superficiais, as águas subterrâneas constituem o recurso hídrico por excelência.

Figura 15 - Superfície de tendência de grau 3 do custo de produção do m³ de água do sistema aquífero Botucatu. Porcento da soma total dos quadrados = 31. Coeficiente de correlação = 56%. Valores em centavos de cruzeiros.

CAPÍTULO V

CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E CUSTOS DE LAVRA

A - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS DAS CAPTAÇÕES

A avaliação das reservas de água acumuladas nos aquíferos constitui subsídio fundamental para o planejamento da gestão dos recursos hídricos de uma região. Por seu intermédio pode-se preparar modelos de aproveitamento ótimo, integrado com os outros mananciais, o que representa um estágio mais avançado no caminho do desenvolvimento racional dos recursos hídricos da área.

Em virtude do baixo grau de exploração atual das águas subterrâneas, é prematuro desenvolver modelos para o manejo ótimo dos sistemas aquíferos da Bacia do Paranã. Por outro lado, visto que o seu principal sistema aquífero se encontra confinado sob uma espessa seqüência de derrames basálticos, a sua exploração é bastante onerosa e depende de fatores e limitações diversas. Na determinação da disponibilidade de água subterrânea consideram-se essas limitações, tais como: dificuldades técnicas de perfurações, profundidades de captação, posição dos níveis piezométricos, capacidade limite dos meios de bombeamento, bem como os aspectos financeiros. Portanto, a disponibilidade de água não é definida como a quantidade máxima existente no aquífero, mas como a quantidade disponível para utilização em forma de exploração planejada. Ressalte-se, ainda, que tais potenciais não são valores numéricos constantes, pois, podem variar em função das condições econômicas dos projetos, da evolução da tecnologia de exploração, do aumento da demanda de água e da existência ou não de fontes alternativas.

A prática e a tendência atuais de captação das águas subterrâneas na área, bem como o resultado das avaliações dos custos de produção, indicam que, de modo geral, a exploração do sistema aquífero Botucatu é viável, mesmo em grandes profundades, caso seja aplicada a tecnologia recomendada. A exploração dos outros sistemas aquíferos é sensivelmente mais baixa, comparada ao Botucatu.

1 - FUNDAMENTOS PARA O PROJETO E CONSTRUÇÃO DOS POÇOS

As condições de ocorrência do sistema aquífero Botucatu são relativamente especiais, devido a existência de uma camda basáltica constituindo o seu confinante e cuja espessura crece da periferia para o centro, onde pode atingir mais de 1.500 m.

Esta situação tem como consequência onerar,substancialmente, os custos de perfuração dos poços, tendo em vista, sobretudo, a importância dos diâmetros necessários à exploração das grandes vazões potenciais do sistema aquífero subjacente.

Geralmente, o objetivo fundamental do projeto do poço é conseguir a melhor combinação possível entre eficiência ou rendidimento, vida útil e custos razoáveis. No caso de poços rasos é aconselhável, com freqüência, sacrificar a eficiência hidráulica ou a vida útil, a fim de reduzir os custos. Em se tratando, todavia, de poços muito profundos, como é o caso, vida útil e eficiência máxima são condições fundamentais à viabilização econômica da exploração.

O projeto e construção de poços, segundo especificações técnicas adequadas, acarretarão, sem dúvida, maior despesa inicial. Ocorre, porém, e a experiência tem demonstrado, serem estes acréscimos francamente compensados pela maior eficiência e vida útil. De fato, enquanto a maior eficiência vai contribuir, de modo sensível, para a redução das despesas anuais de manutenção, menor consumo de energia e maior longevidade das bombas, a maior vida útil do poço vem proporcionar valores de amortização anual dos investimentos iniciais, bem mais baixos. Finalmente, eficiência e vida útil máximas significam utilidade econômica mais elevada do m³ de água.

Estes aspectos são, infelizmente, ainda pouco difundidos no nosso meio técnico e administrativo; neste domínio, trabalha-se, em geral, ao nível do cotidiano.

O projeto e construção dos poços devem se apoiar, portanto, sobre dados de natureza variada: características do qua

dro hidrogeológico, condições técnicas de construção e bombeamento, bem como de aspectos de ordem econômica.

Para o propósito de projeto, um poço que se destina à produção de água do sistema aquífero Botucatu consiste de três partes principais: uma parte superior, até uma profundidade de 150 m, ou câmara de bombeamento, cujos diâmetros são impostos pelas condições de trabalho dos equipamentos de exploração que se espera instalar; uma parte média, ou coluna de revestimento, que liga a câmara de bombeamento a seção inferior, ou zona produtora. Os seus diâmetros são definidos em função das vazões potenciais do aquífero ou projetadas para a captação, tendo em vista evitar excessivas perdas de carga.

As especificações técnicas da zona de admissão ou seção de filtros, deverão ser definidas em função das características faciológica e granulométricas do material aquífero, tendo-se também como preocupação evitar excessivas perdas de carga e carreamento de areia, fenômenos esses tão comuns nos poços da região.

Com efeito, ao abaixamento de nível que se verifica num poço quando se bombeia, vem se juntar as perdas de carga, cujo efeito principal é reduzir a performance da obra de produção de água. Estas são efetivamente de três tipos principais:

J 1 - Perdas de carga engendradas pelas grandes diferenças de velocidade entre as condições de fluxo natural no aquífero e aquelas provocadas nas proximidades dos poços. Esses fenômenos são tanto mais importantes quanto mais confinados e extensos são os aquíferos explorados. Nos poços que explorem o sistema aquífero Botucatu nas suas áreas de grande confinamento, essas perdas de carga não deverão ser negligenciáveis. Dado, contudo, o caráter litológico predominantemente quartzoso das formações e dificuldades técnicas para realização de um desenvolvimento pelos métodos clássicos, devido às grandes pressões e profundidades, será praticamente impossível reduzi-las.

J 2 - Perdas de carga engendradas pela passagem dos fluxos através dos filtros. Esse tipo é possível de ser minimizado mediante um adequado dimensionamento e colocação dos filtros ou,

eventualmente, prẽ filtros.

J 3 - As perdas de carga provocadas pela fricção da água ao longo da coluna de tubos de revestimento. Este tipo é geralmente negligenciado quando os poços são relativamente rasos, devido às pequenas dimensões da coluna. No caso presente, face às suas grandes dimensões, torna-se de fundamental importância que este tipo de perda de carga seja convenientemente minimizado. Ela é função, fundamentalmente, das velocidades de fluxo e dos diâmetros, para um determinado tipo de material de revestimento.

As perdas de carga dos tipos J 1 e J 2 podem ser avaliadas segundo os métodos preconizados por JACOB (1946) e RORABAUG (1953), cuja expressão é a seguinte:

$$J = BQ + C Q^n$$

onde: J = perdas de carga totais

BQ = perdas de carga da formação

CQ^n = perdas de carga impostas pela qualidade técnica do poço.

O coeficiente B depende das características hidrogeológicas da formação aquífera explorada, o coeficiente C depende da maior ou menor adequação técnica do poço às condições de exploração e n é um coeficiente que varia segundo o tipo de captação. Admite-se que, em geral, n é vizinho de 2, para poços que exploram aquíferos muito extensos e confinados como o Botucatu.

O coeficiente C situa-se, normalmente, em torno de 5 para poços bem construídos.

As perdas de carga J 2 e J 3 são minimizadas quando certos limites de velocidade de fluxo são respeitados. Assim, a experiência e a teoria mostram que as velocidades da água através dos filtros não devem ultrapassar 0,03 m/s e as velocidades de fluxo dentro da coluna de revestimento deverão ser inferiores a 1,8 m/s.

A abertura do filtro sendo definida em função da granu

lometria da formação aquífera, a seção útil de admissão de água que satisfaz as condições de velocidade para a vazão potencial ou projetada será obtida, a miúdo, pela combinação entre diâmetros, comprimento e qualidade dos filtros.

A coluna de revestimento é definida com base, fundamentalmente, nas velocidades limites, para obtenção da vazão potencial ou projetada através da seção do tubo. Vale salientar que a utilização de um diâmetro menor engendra aumento das perdas de carga e conseqüente redução da eficiência do poço e dos equipamentos de exploração.

No Quadro 7 apresentam-se, os diâmetros adequados da coluna de revestimento e respectivas perdas de carga, para a gama de vazões potenciais mais importantes do sistema aquífero Botucatu.

Quanto aos filtros, os tipos fabricados no país com diâmetro de 200 milímetros, têm capacidade expressada em metros cúbicos por hora por metro linear, que varia de 3,9 a $26 \text{ m}^3/\text{h/m}$, considerada a velocidade de admissão igual a $0,03 \text{ m/s}$.

A câmara de bombeamento deverá ser dimensionada com base nas características do equipamento de exploração a ser instalado. Recomenda-se uma folga de 4 polegadas entre o diâmetro interno da câmara e o diâmetro externo da turbina. O comprimento ou profundidade da câmara deverá ser dimensionado, tendo-se em conta a posição do nível dinâmico no fim da vida útil média do poço.

Do exposto constata-se que existe uma grande diferença entre um poço projetado e construído de uma simples perfuração. A não observância de uma especificação técnica adequada é responsável pelo grande desperdício de recursos financeiros e hídricos que ora assistimos.

2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BOMBAS

Os equipamentos de bombeamento podem ser diversos, des

QUADRO 7 - DIÂMETROS ADEQUADOS PARA CAPTAÇÃO DAS VAZÕES POTENCIAIS DO AQUIFERO BOTUCATU

VAZÃO		DIÂMETRO COLUNA DE REVESTIMENTO		VELOCIDADE MÁXIMA NA COLUNA	PERDA DE CARGA
l/s	m ³ /h	Polegada	Milimetro		m/100 m
≤30	108	6	150	1,70	4,0
56	202	8	200	1,78	3,1
88	317	10	250	1,79	2,4
126	454	12	300	1,78	2,0
171	616	14	350	1,78	1,6
224	806	16	400	1,78	1,4
285	1026	18	450	1,79	1,2

tacando-se as bombas turbina de eixo prolongado e as bombas submersas, dentro outros.

Não nos pareceu recomendável, ao nível dessa análise, apresentar cálculos econômicos, tendo em vista estabelecer o equipamento melhor adaptado às condições de exploração das águas dos sistemas aquíferos mais importantes da Bacia do Paraná-

Em função, portanto, dos nossos objetivos, adotou-se como solução adequada a utilização de bombas turbinas de eixo prolongado, acionadas por motores elétricos. As características das bombas variam em função da vazão projetada e da altura manométrica de recalque (profundidade do nível dinâmico, mais perdas de carga do sistema).

As performances dos equipamentos variam de um fabricante para outro, mas, em seu princípio geral, utilizam a força centrífuga desenvolvida por uma turbina girando em alta velocidade. A pressão desenvolvida depende da velocidade e do diâmetro do rotor.

A título de exemplo, apresenta-se no Quadro 8 as características técnicas das bombas ESCO, adequadas à exploração das águas da área, considerando níveis dinâmicos de 50 e 100 m.

Ressalte-se que o nível dinâmico de 100 metros e vazão de $1\ 000\ m^3/h$ representam, praticamente, no momento, os limites da capacidade de trabalho dos equipamentos disponíveis no merca-do nacional. Ressalte-se, ainda, que o aquífero Botucatu tem potencialidade bem superior a $1.000\ m^3/h$ e que, sobre cerca de $1/3$ da área de estudo apresenta condições de artesianismo. Contudo, como a todo nível constante corresponde uma vazão variável no tempo, e como o utilizador, em geral, necessita uma vazão constante, importa computar os equipamentos e despesas correspondes de exploração, ao nível desta análise geral. É evidente que, ao nível dos projetos, a condição de artesianismo proporcionará sensível economia, mormente durante as etapas iniciais da utilização.

QUADRO 8 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BOMBAS

VAZÃO m ³ /h	H (m)	MODELO	Nº ESTÁGIOS	CÂMARA (mm)	RENDIMENTO %	MOTOR HP
100	55	8-MEB	10	200	78	30
200	52	10-EB	6	250	81	60
300	54	12-CEB	5	300	77	100
400	52	14-CEB	3	350	81	125
500	53	14-CEB	3	350	78	150
600	53	16-CEB	2	400	81	200
700	54	16-CEB	3	400	81	200
800	53	16-CEB	3	400	78	250
900	54	18-CEB	2	450	82	250
1000	55	18-CEB	2	450	81	300
100	104	8-MEB	19	200	78	60
200	103	10-EB	11	250	82	125
300	106	12-CEB	9	300	78	200
400	104	14-CEB	5	350	82	250
500	105	14-CEB	6	350	79	300
600	108	16-CEB	4	400	83	350
700	104	16-CEB	4	400	83	400
800	105	16-CEB	5	400	80	450
900	106	18-CEB	3	450	84	500
1000	109	18-CEB	3	450	84	600

H = altura manométrica de recalque

20 e 37 colunas de 3 metros

velocidade 1770 rpm

Agradecemos a colaboração do Dr. Antonio de Escobar - Diretor
Presidente da ESCO S/A.

B - AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DO M^3 DE ÁGUA

Os custos de exploração das águas subterrâneas são função das suas disponibilidades locais e das condições de acessibilidade aos meios técnicos, de perfuração e bombeamento, disponíveis.

Nas condições gerais de ocorrência do sistema aquífero Botucatu, os investimentos são sensivelmente influenciados pelas características técnicas das captações, compatíveis com a sua produtividade potencial e com a ocorrência da camada de rochas basálticas constituindo o seu confinante. Sobre todo o domínio de ocorrência do sistema aquífero Botucatu (perto de $800\ 000\ km^2$) as suas águas podem ser captadas, salvo as limitações de profundidade de nível que, local e ocasionalmente, são impostas pela topografia.

Os custos aqui referidos compreendem as despesas relativas à construção do poço, à aquisição do equipamento de exploração, ao consumo de energia e as despesas de manutenção.

Com base na produtividade do poço e das despesas e amortizações anuais correspondentes, avalia-se o custo de produção do m^3 de água liberado na boca do poço.

1 - ELEMENTOS DE BASE PARA OS CÁLCULOS

1.1 - CUSTO DE CONSTRUÇÃO DOS POÇOS

Os cálculos realizados basearam-se nos preços praticados pelas companhias de perfuração que operam no Brasil.*

* Preços abril, 1976: 1. US\$ = 10 cruzeiros

A variação de preços encontrada nos permite avaliar um preço médio, por metro linear de poço, para as condições encontradas no domínio brasileiro da Bacia do Paraná. Os valores adotados compreendem: custo de perfuração, revestimento, filtros, cimentação, pré-filtros e desenvolvimento (eventualmente). A realização de um teste de produção (vazão de exploração e nível dinâmico correspondente) e supervisão técnica são também incluídos.

As condições de ocorrência das águas subterrâneas da área de estudo sugerem a construção de poços com profundidades que podem variar de cerca de 100 até 2.000 metros.

As profundidades inferiores a 200 metros podem ser adotadas para exploração de águas subterrâneas em condições de aquífero livre, e, de 500 a 2.000 m para os poços que explorem o sistema Botucatu, nas zonas com água sob pressão ou artesianas.

No Quadro 9 apresentam-se os custos de construção dos poços e o valor da prestação que amortiza os investimentos, isto é, capital obtido a juros de 7% a.a. e a ser recuperado ao longo de uma vida útil média de 20 anos.

A taxa de juros adotada corresponde ao valor médio praticado pelo BNH para as diferentes condições de empréstimo (BNH, 1975).

O valor da prestação anual é dado pela expressão:

$$P = C \cdot \frac{a^{-1}}{n} i \quad (\text{FARO, 1970})$$

onde, C = capital inicial

i = taxa de juros por período (ano)

n = número de períodos (anos)

De uma tabela financeira retira-se $\frac{a^{-1}}{n} i$ que é denominado de fator de recuperação do capital.

Assim, nos termos considerados o coeficiente 0,12 será aplicado aos investimentos com vida útil média de 20 anos.

QUADRO 9 - CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS POÇOS E VALORES DA AMORTIZAÇÃO ANUAL

PROFUNDIDADE (m)	CUSTO POÇO (x 1000 cruzeiros)	VALOR (P) DA AMORTIZAÇÃO ANUAL (x 1000 cruzeiros)
Aquífero Livre		
100	80	10
200	300	36
Aquífero Confinado		
500	2500	300
1000	7000	840
1500	12000	1440
2000	20000	2400

Preços de abril de 1976 - 1 US\$ = Cr\$10,00

1.2 - CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS

Os preços das bombas variam em função da vazão projetada e da altura manométrica de recalque correspondente (profundidade do nível dinâmico mais perdas de carga do sistema).

No caso presente, consideram-se vazões compreendidas entre 20 e 1.000 m³/h, para níveis dinâmicos correspondentes de 50 e 100 m, com perdas de carga totais sendo inferiores a 10%.

Por outro lado, os preços adotados referem-se as bombas ESCO (abril, 1976), cujos valores foram majorados de 25%, para fazer face às despesas com instalação do equipamento. Consideram-se, ainda, as despesas com manutenção, avaliadas em 5% do preço do equipamento.

Ressalte-se que, tendo o poço uma vida média de 20 anos e os equipamentos apenas 7 anos, torna-se necessário contabilizar os custos de três equipamentos.

A compra antecipada das três gerações de bombas é uma operação desaconselhável, do ponto de vista financeiro, pois, não somente acarreta maior desembolso financeiro inicial como onera desnecessariamente o custo das parcelas de amortização.

Por outro lado, as características das duas gerações de bombas subseqüentes serão ligeiramente diferentes, tendo em vista a natural evolução dos níveis dinâmicos no tempo. A realização de medidas regulares de nível, durante as sucessivas fases da exploração constitui tarefa fundamental para o adequado dimensionamento dos equipamentos necessários.

Até o nível dos projetos os equipamentos seriam adquiridos a intervalos de 7 anos. Para efeito da avaliação, torna-se, portanto, necessário considerar os seus valores atuais, o que é feito utilizando o fator $(1 + i)^{-n}$; sendo i a taxa de juros compostos vigente por período (7% a.a.) e n o número de períodos (anos), isto é, 7 e 14 anos, respectivamente, para a segunda e terceira bombas.

O valor da amortização anual passará a ser avaliado com base no período total, correspondente à vida útil média dos poços, ou seja, 20 anos.

No Quadro 10 apresentam-se os investimentos necessários à compra dos equipamentos e respectivas parcelas de amortização anual, considerada a taxa de juros de 7% a.a. Os valores de $(1 + i)^{-n}$ são obtidos de uma tabela financeira, ou seja, 0,96 e 0,92, respectivamente, para 7 e 14 anos.

1.3 - DESPESAS DE BOMBEAMENTO

O consumo de energia consumida é calculada com base no trabalho mecânico que é realizado ao se elevar um metro cúbico de água à altura de um metro.

Em se tratando de bombas que devem descarregar água com uma densidade de 1.000 Kg/m^3 , à vazão de $q \text{ m}^3/\text{s}$ e contra uma coluna manométrica $H \text{ (m)}$, a potência requerida em Kw é dada pela expressão seguinte:

$$p = \frac{d g q H}{1000 e} \text{ Kw}$$

onde d = densidade da água (1.000 kg/m^3)
 g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 H = altura manométrica (m)
 e = eficiência do sistema (%)
 q = vazão (m^3/s)

No Quadro 11 apresenta-se o consumo anual de energia em Kwh, admitindo-se que as bombas funcionem 90% do tempo real. A despesa correspondente foi avaliada tendo-se por base o preço unitário médio do Kwh de Cr\$ 0,045/Kwh.

O preço do Kwh é influenciado pelo valor da demanda, da potência instalada e da energia consumida por ano. Consideran

QUADRO 10 - CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS DE BOMBEAMENTO INSTALADOS E AMORTIZAÇÃO ANUAL

VAZÃO m ³ /h	H (m)	CUSTO EQUIPAMENTO BOMBEAMENTO (x 1000 cruzeiros)	VALOR AMORTIZAÇÃO ANUAL (B) (x 1000 cruzeiros)
20	55	144	20
50	55	201	28
100	55	432	59
200	52	624	86
300	54	864	119
400	53	1186	163
500	53	1209	166
600	53	1302	179
700	54	1425	196
800	53	1814	249
900	54	1857	255
1000	55	1900	261
20	104	231	32
50	103	519	71
100	104	864	119
200	103	1353	185
300	106	1425	196
400	104	2160	296
500	105	2332	320
600	108	2549	350
700	104	2952	405
800	105	3312	454
900	106	3571	490
1000	109	3672	505

OBS. H = altura manométrica de recalque.

Preços Bombas, Abril 1976, 1 US\$ = Cr\$10,00

QUADRO 11 - DESPESAS DE BOMBEAMENTO

Q m ³ /h	H (m)	RENDIMENTO SISTEMA %	CONSUMO Kw	CONSUMO ANUAL (x1000 Kwh)	DESPESA ANUAL(E) (x1000 cruzeiros)
20	55	82	4	31	3
50	55	81	9	70	7
100	55	78	19	148	15
200	52	81	35	272	27
300	54	77	57	443	44
400	52	81	70	544	54
500	53	78	93	723	72
600	53	81	107	832	83
700	54	81	127	987	99
800	53	78	148	1151	115
900	54	82	161	1252	125
1000	55	81	185	1438	144
20	103	81	7	54	5
50	105	78	18	140	14
100	104	78	36	280	28
200	103	82	68	529	53
300	106	78	112	871	87
400	104	82	138	1074	107
500	105	79	181	1407	141
600	108	83	213	1656	166
700	104	83	239	1858	186
800	105	80	286	2224	222
900	106	84	309	2403	240
1000	109	84	354	2753	275

do-se a gama de equipamentos e, tendo em vista os objetivos do trabalho, adotou-se um valor médio, para efeito dos cálculos de Cr\$ 0,10/Kwh.

1.4 - DESPESAS DIVERSAS

Este item compreende, fundamentalmente, o custo de instalação da rede elétrica até os poços, respectivos transformadores e complementos gerais. Com base nos preços praticados no Estado de São Paulo, o custo das instalações elétricas, para um comprimento de linha de até 5 km, atinge cerca de Cr\$ 400.000,00.

O tempo de amortização sendo de 20 anos, as despesas diversas, aqui designadas pela letra D, atingem cerca de Cr\$ 38.000,00 por ano.

2 - CUSTOS DE PRODUÇÃO DO M³ DE ÁGUA

Com base nos elementos referidos nos Quadros 9, 10 e 11, o custo de produção do m³ de água subterrânea pode ser obtido pela expressão seguinte:

$$C = \frac{P + B + E + D}{V}$$

- onde: P - é o valor da prestação anual que amortiza o capital investido para construção do poço;
B - é o valor da prestação anual que amortiza o capital investido para compra das bombas;
E - despesa anual com energia para o bombeamento;
D - valor da prestação anual que amortiza as despesas diversas;
V - volume anual explorável do poço (m³).

No Quadro 12 apresenta-se os custos de produção do metro cúbico de água, para as diferentes condições de explorabilidade, dos principais aquíferos da área.

C - ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PRÉ-VIABILIDADE

A solução de qualquer problema começa com o seu conhecimento. Assim, o primeiro passo consistiu em enfatizar os dados essenciais que, ao nosso ver, condicionam a equação permanente do problema do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos.

As potencialidades precisam ser aproveitadas. Sô se pode fazê-lo, sem perder de vista a realidade, através de um planejamento racional e flexível que permita, a partir de metas e objetivos bem definidos, a identificação de providências e ações conducentes à obtenção de melhores resultados, no prazo mais curto possível.

Em problemas essencialmente dinâmicos desse tipo, as soluções devem visar sempre o atendimento permanente, de modo que, ao longo do tempo, mantenham-se resolvidos e equacionados os problemas.

A eficiência comprovada do esquema do Sistema Financeiro do Saneamento, que é constituído pelo BNH - como ôrgão central, normativo e controlador - e pelos governos e entidades que a ele livremente aderiram, permitiu evoluir, de ações tímidas, e parciais, para programas globais que visam a extinção do "deficit" e o permanente equilíbrio futuro entre demanda e oferta, no campo do abastecimento de água no país.

A diferença fundamental do processo proposto para os usuais é o fato de que as condições de viabilidade são previamente estabelecidas para todo o programa e não pesquisada "a posteriori" para cada parte. A definição de uma política tarifária justa e rea

QUADRO 12 - CUSTOS DE PRODUÇÃO DO m³ DE ÁGUA

VAZÃO m ³ /h	PROFUNDIDADE DOS POÇOS (m)						H (m)
	100	200	500	1000	1500	2000	
20	0,45	0,58	2,25	5,70	9,48	15,60	55
50	0,21	0,26	0,93	2,30	3,82	6,26	55
100	0,13	0,16	0,51	1,20	1,96	3,18	55
200	0,10	0,11	0,28	0,62	1,00	1,61	52
300	0,09	0,10	0,21	0,44	0,69	1,10	54
400	0,08	0,09	0,17	0,34	0,53	0,84	53
500	0,07	0,08	0,14	0,28	0,43	0,65	53
600	0,06	0,07	0,12	0,24	0,36	0,57	53
700	0,06	0,06	0,11	0,21	0,32	0,50	54
800	0,06	0,06	0,11	0,19	0,29	0,44	53
900	0,06	0,06	0,10	0,17	0,26	0,39	54
1000	0,05	0,06	0,09	0,16	0,24	0,36	55
20		0,70	2,38	5,80	9,61	15,69	104
50		0,40	1,10	2,44	3,96	6,40	103
100		0,28	0,61	1,30	2,10	3,28	104
200		0,20	0,36	0,71	1,10	1,70	103
300		0,16	0,26	0,49	0,74	1,15	106
400		0,15	0,23	0,41	0,59	0,90	104
500		0,13	0,20	0,34	0,49	0,73	105
600		0,12	0,18	0,29	0,42	0,62	108
700		0,12	0,17	0,26	0,37	0,55	104
800		0,12	0,16	0,24	0,34	0,49	105
900		0,11	0,15	0,22	0,31	0,45	106
1000		0,11	0,14	0,21	0,28	0,41	109

lista, base para toda a equação financeira do problema, está ainda longe de ser alcançada, apesar do progresso já obtido. É necessário que ela produza receita suficiente para cobrir as despesas financeiras, operacionais e de manutenção, permitindo, inclusive, a renovação e a ampliação dos sistemas.

De acordo com a orientação emanada do Banco Nacional de Habitação, a água não poderá custar mais do que 3% do salário mínimo regional, para um consumo mínimo de $15 \text{ m}^3/\text{mês}$.

Adotando-se, por exemplo, o preço de um cruzeiro por metro cúbico, pode-se situar nos gráficos das Figuras 16 e 17 as condições de pré-viabilidade das águas subterrâneas. Assim, para um poço de, 1.000 m de profundidade a vazão mínima que pré-viabiliza a captação, e de apenas $120 \text{ m}^3/\text{h}$, para um nível dinâmico de 50 m (Figura 16) e de apenas $150 \text{ m}^3/\text{h}$ quando o nível dinâmico for de 100 m (Figura 17).

Tais vazões são extremamente modestas, em relação com as potencialidades do aquífero em geral, pois já oferece vazões de até $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

No caso em que se fixar a vazão, pode-se ver, consideradas as condições locais de exploração, os custos de produção decorrentes. Por exemplo, um poço bem construído em Lins, SP (profundidade de captação de 1.000 m), ao explorar a vazão potencial do aquífero, propiciará água a um custo de apenas vinte e cinco centavos o m^3 .

Entre as conciliações, com vistas a viabilidade, a atitude mais adequada, do ponto de vista técnico e econômico, consiste em procurar atender as demandas vizinhas. Evitar-se-ia, assim, a proliferação de poços, de consequência danosa para o sistema aquífero, devido às interferências. Do ponto de vista econômico, lograr-se-ia a obtenção do máximo de produtividade por m^3 de água disponível, além de evitar desperdício de recursos financeiros.

Infelizmente, as soluções adotadas, com maior frequência, consistem em sacrificar o rendimento ou eficiência, a fim de reduzir os custos de construção. Adotam-se por exemplo, fil

Fig. - 16

Fig. - 17

tros inadequados ou em quantidades insuficientes por ser mais barato; revestimentos de aço ordinário, que custam muito menos, mas que reduzem a vida útil do poço; ou simplesmente, utiliza-se a vazão de que se necessita e se deixa escoar livremente os excedentes.

Considerando-se, contudo, que são os custos de construção quem mais oneram os investimentos, conforme pode ser visto pela análise realizada, as melhores condições de viabilidade são obtidas pela alternativa que melhor combina, eficiência ótima e vida útil mais longa.

Essa é, aliás, a meta principal dos utilizadores de poços nos países mais ricos, onde não é concebível se desperdiçar recursos hídricos ou financeiros.

Ao nível do abastecimento público, a vantagem econômica da alternativa de atendimento total ou parcial através da água subterrânea, deve-se a vários fatores, dentre os quais se destacam:

a) o plano de execução da alternativa referente às águas subterrâneas sendo mais facilmente adaptável, no espaço e no tempo, ao comportamento da demanda, propicia um parcelamento dos investimentos;

b) a captação de água subterrânea do sistema Botucatu dispensa o seu tratamento químico e se encontra, naturalmente, bem protegida dos agentes poluidores. Recomenda-se tão somente a cloração, tendo em vista garantir a qualidade higiênica das águas ao longo da rede de distribuição;

c) considerando-se que o sistema Botucatu ocorre, virtualmente, sobre todo o domínio brasileiro da Bacia do Paranã, as suas águas podem ser captadas onde se fazem necessárias, salvo limitações, locais e ocasionais, impostas pelas posições do nível piezométrico. Os custos com adução serão, também, relativamente pequenos. Sem sombra de dúvida, estes serão francamente compensados pelas economias propiciadas ao nível da rede de distribuição. Nesse particular, vale mencionar o estudo comparativo de viabilidade econômica elaborado por SILVA et alii (1975), onde mostra uma

economia de 50%, no caso de Araraquara.

Nessas condições, as avaliações de custos de produção do m³ de água, obtidas segundo a metodologia proposta, possibilita uma análise comparativa com os mananciais de superfície, ao nível do utilizador.

O item referente à Reservação foi excluído, supondo-se que seu custo se equivale nas duas alternativas (captação superficial ou subterrânea).

D - ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA EXPLORAÇÃO

Da análise dos elementos que foi possível caracterizar, infere-se que a exploração das águas subterrâneas da Bacia do Paran, tem sido realizada com tcnicas e equipamentos insuficientes para se conseguir as importantes vazes dos aferos. Na realidade, a explorao atual das guas subterrneas feita de forma emprica e sobretudo improvisada.

Por outro lado, importa ressaltar que no possvel comparar a vazo que obtida de um poo com aquela suscetvel de ser capatada de um rio, mesmo que modesto. Com efeito, as guas subterrneas fluem nos aferos atravs de uma seo que pode ser milhares de vezes superior quela do rio. Em consequncia, para obteno de uma vazo equivalente, faz-se necessrio multiplicar o nmero de poos, o que nem sempre possvel, do ponto de vista prtico e econmico. De fato, se a concentrao dos poos numa pequena rea de captao engendra efeitos de interferncia e, conseqentemente, diminuio da sua produtividade, dispers-los muito, significa onerar substancialmente os custos do sistema, tendo em vista as grandes despesas com implantao de adutoras de reunio e rede eltrica, sem se falar dos aspectos operacionais.

A geometria das baterias de poos, isto , a sua disposio no espao, imposta por fatores de natureza hidrogeo

lógica e técnica, destacando-se: tipo de aquífero, características dos fluxos, posição do nível estático, grau de vulnerabilidade aos agentes potenciais ou efetivos de contaminação e/ou poluição, recursos técnicos (perfuração, bombeamento) e financeiros.

Uma vez definido o sistema de captação, isto é, o número de poços necessários para atendimento da vazão do projeto e a geometria das baterias, a distância adequada entre as captações pode ser obtida através de uma análise de soluções alternativas em que se comparam os incrementos de custos de bombeamento do m^3 de água, engendrados pelas interferências, com as reduções de custos de implantação das adutoras de reunião e rede elétrica correspondentes. A solução ótima é definida pelo ponto de valor mínimo das funções de custos. Para efeito de cálculo, os custos de bombeamento e adução são referidos em termos de m^3 .

Na Figura 18 apresenta-se, de forma generalizada, o comportamento das funções correspondentes. Vale ressaltar que a distância ótima depende fundamentalmente da concepção e dimensionamento do sistema de captação.

A avaliação do nível dinâmico dos poços projetados e respectivos incrementos de rebaixamento, devidos as interferências, podem ser avaliadas através dos métodos clássicos preconizados por THEIS (1935), FERRIS et alii (1962), HANTUSH (1964), WALTON (1970), em função do tipo de aquífero captado.

Adequar recursos e meios materiais a um ritmo razoável de implantação é tarefa que, a par de ser teoricamente difícil, na prática encontra óbices de natureza variada: políticos, sociais e técnicos. Assim, a concepção dos sistemas de abastecimento deverá ser adequada às características do manancial.

No caso de abastecimento urbano, a solução mais racional consiste em distribuir os poços em baterias.

Considerando que o aquífero Botucatu se encontra naturalmente bem protegido de possíveis contaminações locais, as captações poderão ser locadas dentro do próprio espaço físico urbano. O sistema de abastecimento público passaria a ser constituído por um conjunto de anéis, cada um dos quais devendo ser dimen

Fig. 18- AVALIAÇÃO DA DISTÂNCIA ÓTIMA

sionado com base nas condições de atendimento econômico ótimo das baterias. Tendo em vista ainda a grande potencialidade dos poços que captem o aquífero Botucatu, na maioria dos centros urbanos da área, um anel pode ser abastecido por apenas um ou dois poços.

Quando a comunidade a ser abastecida comportar mais de um anel, estes poderão ser interligados, com vistas a proporcionar uma manutenção mais confortável e maior segurança na operação do sistema. Também por medida de segurança, todo sistema de abastecimento público deve comportar mais de um poço, os quais deverão ser submetidos a um regime de bombeamento que garanta o seu funcionamento, concomitante ou alternado, sem ocasionar desperdício de recursos hídricos, como soe acontecer.

Na Figura 19 apresenta-se um esquema do sistema adequado às condições hidrogeológicas da área, mormente do sistema aquífero Botucatu. No caso dos aquíferos livres, atenção especial deverá ser dada aos aspectos de vulnerabilidade aos agentes de contaminação e/ou poluição.

E - PERSPECTIVAS DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Há falta de dados sobre as fontes de abastecimento e consumo atual de água das comunidades da área, o que impossibilita a avaliação do consumo efetivo das águas subterrâneas, seja "per capita", seja por classe de consumidor, seja por município. Estudos, a nível de reconhecimento, foram ou estão sendo realizados pela maioria dos Estados que fazem parte da área. Os resultados são apresentados na forma de relatórios técnicos de uso restrito dos órgãos contratantes e constam fundamentalmente de um diagnóstico das condições atuais do abastecimento público e de um plano diretor, para corrigir distorções ou sanar deficiências até o ano 2.000.

Para superar esta dificuldade, foram feitas previsões da demanda total, baseadas em estimativas de crescimento de popula

Fig. 19-CONCEPÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO

ção e de consumo "per capita". Assim, admitiu-se uma população de projeto (20 anos) equivalente ao dobro da atual, ou seja, 80 milhões e uma taxa "per capita" de 300 l/habitante/dia. Nessas condições, as demandas são avaliadas em oito bilhões de m³/anos, ou seja, apenas um décimo das reservas exploráveis, estimadas nas condições mais pessimistas.

Por outro lado, os custos de produção do m³ de água, através de poços de 1.500 m de profundidade, para um nível dinâmico de 100 m, ao cabo de 20 anos, atinge apenas cinquenta centavos. A vazão correspondente explorada por poço (500 m³/h) seria suficiente para abastecer uma população de 40.000 pessoas, a uma taxa "per capita" de 300 l/habitantes/dia. Assinale-se ainda que, atualmente o número de cidades deste porte não atinge uma dúzia.

Portanto, sua utilidade para abastecimento público poderá ser auferida através de seu conhecimento e da aplicação de técnicas de captação e de gestão dos sistemas, que visem a obtenção da máxima produtividade por m³ disponível de água.

Outro uso potencial, de grande alcance econômico e social das águas subterrâneas da Bacia do Paranã é representado pelos abundantes volumes de águas quentes, temperaturas entre 50 e 120° C, armazenadas nos domínios mais profundos dos sistemas aquíferos Botucatu, Palermo-Rio Bonito e Furnas.

A exploração deste tipo de manancial, dito de baixa temperatura, tem um desenvolvimento muito recente. Dentre as suas aplicações de maior alcance social e econômico, destacam-se: aquecimento de casas, alimentação de sistemas de ar condicionado, desenvolvimento de centros de lazer (piscinas, duchas), hotéis, nas culturas de estufa e alguns tipos de indústrias. No Japão inclui-se o uso em piscicultura. A utilização para aquecimento de casas, na época de frio, e de refrigeração, no período de calor, é sobretudo desenvolvida no Japão, Rússia e Hungria e, em pequena escala, na França, Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e América Central.

O uso da energia geotermal na refrigeração é baseado

no processo que utiliza água como refrescante e uma solução de brometo de lítio, como fluido absorvente de baixa temperatura. Como nos demais sistemas convencionais, a água é vaporizada e para isso extrai calor do meio ambiente. Nesta forma, o refrescante é absorvido pela solução de brometo de lítio de baixa temperatura. Mediante um aquecimento (neste caso proporcionado pela fonte geotermal) separa-se o absorvente da água e esta, novamente na sua forma líquida, recomeça o ciclo.

A utilização de tais sistemas proporcionaram à Rússia uma economia de 15 milhões de toneladas de combustível no ano de 1970. Na Nova Zelândia os custos são de apenas doze centavos de dolar por milhão de quilocalorias produzidas, contra US\$ 2,4 pelos sistemas convencionais. Os custos dos equipamentos são praticamente equivalentes (BARNEA, 1972). Na Hungria, conforme tivemos a oportunidade de verificar, os custos para aquecimento são de apenas um quarto das despesas com combustível.

As grandes preocupações dos estudiosos do assunto são fundamentalmente relacionadas com a vida útil dos mananciais.

Neste particular, as nossas condições são bastante favoráveis. Com efeito, conta-se com extensos reservatórios que são recarregados, naturalmente, através da infiltração de águas meteoricas nas zonas de afloramento. Dispõe-se de três sistemas aquíferos superpostos, sendo que o primeiro contém água doce e, os outros dois águas fortemente mineralizadas. Nesses termos, pode-se explorar o Botucatu, seja para uso múltiplo, isto é, refrigeração-aquecimento, lazer e abastecimento público, por exemplo, seja reservá-lo para o abastecimento público e utilizar apenas os dois outros como fonte geotermal.

As reservas, embora muito importantes, poderão receber uma recarga adicional mediante a injeção das águas usadas, mormente quando se tratar da exploração dos sistemas aquíferos mais salinizados, conforme ilustra-se na Figura 20. Esta solução resolveria os problemas decorrentes do rejeito das águas usadas, pelos rios ou outros exutórios naturais.

Em termos de captação, as características dos poços

Fig.20- ESQUEMA DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA GEOTERMAL

não diferem muito daquelas exigidas para as captações que abastecem o saneamento público, já definidas ao longo desta análise.

A exploração destes recursos geotermiais poderá livrar do frio as mais importantes cidades interioranas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e proporcionar um grande reforço dos potenciais turísticos da região, dentre outros benefícios.

Sua utilidade somente poderá ser auferida mediante a aplicação de técnicas e medidas que visem a obtenção do máximo de benefício por m^3 de água explorado e sem perder de vista as condições de uso e conservação dos recursos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A análise desenvolvida serviu para evidenciar os aspectos fundamentais das condições hidrogeológicas da Bacia do Paraná e delinear as perspectivas de utilização mais racional dos seus recursos hídricos subterrâneos.

Tendo-se adotado, sistematicamente, grande margem de segurança nos cálculos, as reservas avaliadas podem ser encaradas como ordens de grandeza pessimistas. Não obstante, observa-se que os recursos exploráveis são cerca de vinte vezes superiores à demanda da população atual (40 milhões), considerada a taxa "per capita" de 300 litros/habitante/dia.

Ressalte-se, ainda, que tais potencialidades não são valores numéricos constantes, pois, podem variar em função da evolução dos meios técnicos e financeiros de exploração, das influências sobre os componentes do balanço, das condições econômicas dos projetos e da necessidade de se garantir o desenvolvimento de um contexto ecológico mais ou menos equilibrado.

De primeira importância, em termos de volume das reservas, destaca-se o sistema aquífero Botucatu. Esse manancial ocorre virtualmente sobre todo o domínio da Bacia Geológica do Paraná. Ao contrário do aquífero Bauru, constitui um sistema confinado por excelência. Nos restritos domínios aflorantes, as problemáticas de uso e conservação são semelhantes àquelas delineadas para o sistema Bauru.

O sistema aquífero Botucatu mergulha em direção ao centro da bacia, subjacente aos derrames de basaltos da Formação Serra Geral. Se essa situação lhe propicia, de um lado, uma excelente proteção contra os riscos de poluição, engendra, do outro lado, grande aumento dos custos de captação. As possibilidades de exploração tornam-se rapidamente proibitivas para os utilizadores em geral, na medida que se caminha para o centro da bacia. Ademais, as suas vazões potenciais são de tal forma importantes que se torna imprescindível a execução de poços convenientemente projetados e que visem uma máxima eficiência técnica e econômica. Esse é, aliás, o objetivo principal dos utilizadores de poços nos países mais ricos e desenvolvidos, onde não é concebível des

perdiçar recursos hídricos ou financeiros.

Ao nível atual do abastecimento público, o grande alcance social e econômico reside no fato de ser possível, através de um ou dois poços, atender a demanda dos mais importantes complexos sócio-econômicos em desenvolvimento. Por outro lado, o plano de execução da alternativa referente às águas subterrâneas sendo mais facilmente adaptável, no espaço e no tempo, à evolução da demanda, propicia um parcelamento dos investimentos. Considerando-se, ainda, que o aquífero Botucatu ocorre, virtualmente, sobre todo o domínio da Bacia do Paranã e encontra-se naturalmente bem protegido dos riscos de poluição, as suas águas podem ser captadas onde se fazem necessárias, salvo limitações locais e ocasionais impostas pela topografia.

Quanto aos aspectos de qualidade, vale destacar que as suas águas são adequadas ao consumo humano e usos industriais em geral, recomendando-se tão somente uma cloração, tendo em vista garantir a qualidade higiênica ao longo da rede de distribuição.

Em termos de custo, verifica-se que, mesmo nas condições mais desfavoráveis, o valor monetário médio do metro cúbico produzido é inferior a um cruzeiro. Portanto, sua utilidade, para abastecimento, em geral, poderá ser auferida através de seu conhecimento e da aplicação de técnicas de captação e de gestão dos recursos que visem a obtenção da máxima produtividade de por m^3 de água disponível.

Outro uso potencial de grande alcance econômico e social das águas do sistema Botucatu é representado pelos grandes volumes de águas quentes, com temperaturas entre 50 e 120° C, armazenados nos domínios mais profundos da bacia. A exploração desse tipo de recurso geotermal, dito de baixa temperatura, tem um desenvolvimento muito recente. Destina-se, fundamentalmente, ao aquecimento e/ou refrigeração de casas, desenvolvimento de culturas de estufa, pisciculturas e centros de lazer.

A exploração desses recursos geotermiais poderá livrar do frio as mais importantes cidades interioranas da área e pro

porcionar um grande reforço dos seus potenciais turísticos. Nesse particular, vale destacar a condição excepcionalmente favorável, tendo em vista a existência de mais dois aquíferos sotopostos, com águas fortemente mineralizadas e mais quentes. Nesses termos, poder-se-ia explorar o aquífero Botucatu para uso múltiplo, ou reservá-lo para o abastecimento público e utilizar os aquíferos Palermo-Rio Bonito e Furnas como fontes geotermiais. As reservas, embora muito importantes, poderão receber uma recarga adicional mediante a injeção das águas usadas. Essa solução resolveria os problemas relativos ao rejeito das águas altamente mineralizadas através dos rios ou outros exutórios naturais.

O aquífero Bauru, muito embora ocupe menos de um terço da área, participa com perto da metade dos recursos exploráveis. Essa condição advém do fato de ser um sistema livre, local e ocasionalmente freático e submetido a uma abundante recarga. É, por conseguinte, um aquífero de fácil acesso às diferentes classes de utilizadores. Contudo, essa condição de ocorrência faz com que o manancial nele acumulado seja potencialmente muito vulnerável aos agentes poluidores. Os riscos são iminentes, face ao grande surto de desenvolvimento agro-industrial que experimenta a região.

Ao nível das explorações, ressalta-se a necessidade de um grande esforço, tendo em vista melhorar a qualidade técnica dos poços. As baixas vazões obtidas refletem, sem sombra de dúvida, as suas péssimas qualidades construtivas e operacionais. Ademais, os poços mal construídos ou utilizados de forma pouco adequada transformam-se em focos de contaminação do manancial explorado. Por tudo isso, urge que sejam estudados os meios de proteção da qualidade das águas do sistema aquífero Bauru. Esse tipo de abordagem deve comportar três partes fundamentais: identificação dos riscos de poluição; formalização e quantificação dos mecanismos de propagação e tempo de residência; e elaboração de modelos prospectivos das condições de proteção da qualidade das águas subterrâneas em particular e dos recursos hídricos em

geral. As águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru consti
tuem, sem sombra de dúvida, o manancial de maior alcance social
e econômico, porque se encontra relativamente ao alcance dos
meios financeiros e técnicos da grande maioria dos utilizadores.

Infelizmente, toda abordagem que enfatiza a necessidade
de adoção de medidas que visem o uso e a proteção da qualidade
desses recursos hídricos subterrâneos esbarra na hipocondríaca
preocupação sobre os gastos decorrentes. Ninguém parece se preo
cupar, entretanto, com os benefícios que as medidas preventivas
poderão proporcionar, mormente tendo-se em conta a impraticabi
lidade de qualquer medida corretiva.

De menor importância, do ponto de vista do potencial
de exploração, aparecem as zonas aquíferas dos basaltos da For
mação Serra Geral. As condições gerais de ocorrência das águas
subterrâneas são de aquífero livre, mais ou menos independentes
e de pequena capacidade de acumulação.

Nos aquíferos das Formações Furnas, Palermo, e Rio Boni
to, passagens arenosas da Formação Estrada Nova e demais seqüên
cias predominantemente pelíticas, as condições de ocorrência de
águas de melhor qualidade ficam restritas às zonas de afloramen
to. Com efeito, as explorações tornam-se rapidamente proibiti
vas devido às grandes profundidades a que são projetadas, na me
dida que se caminha para o centro da bacia. Ademais, as condi
ções de circulação fazem com que as águas se apresentem muito
salinizadas.

Ao nível dos projetos, somente a utilização de técni
cas adequadas de exploração e de instrumentos de análise econômi
ca possibilitarão avaliações mais precisas e a definição da gama
de hipóteses de utilização dos potenciais hídricos da região de
forma integrada. As decisões a tomar dependerão, forçosamente, da
definição de uma política que vise o uso e a conservação dos re
cursos.

Uma concepção clássica desses problemas consiste em
dizer: elaborem as normas. Esse procedimento gera um ciclo vi
cioso, pois uma norma não é um dado, mas, uma consequência. A

elaboração de uma norma deve se destinar a satisfazer objetivos previamente definidos por uma política, cujo único objetivo deve rá ser: assegurar recursos, em quantidade, qualidade e custo ne cessários ao desenvolvimento harmônico da estrutura sócio-econô mica visada.

A metodologia utilizada oferece, em escala regional, avaliações aproximadas e comparáveis dos problemas reais, que era a nossa ambição.

O papel dos planificadores consiste em encontrar o justo equilíbrio entre as diversas soluções possíveis, estabelecer as linhas de ação e definir as ordens de prioridade.

Possa este trabalho lhes ser realmente útil.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F.F.M.de (1964) - Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista - IGG, Bol. 41: 169-263
- ALMEIDA, F.F.M.de (1967) - Origem e Evolução da Plataforma brasileira - DGM.DNPM.Bol.241. 29 pp. 1 mapa. Rio de Janeiro
- AMARAL, G. (1975) - Programa "Trend" em Linguagem Fortran IV, - Biblioteca do Centro de Computação da Universidade de São Paulo, em fita
- AMARAL, G. (1976) - Testes da Análise de Superfícies de Tendência para distribuições aleatórias - XXIX Congr. Bras. de Geologia - Resumos e Comunicações - Belo Horizonte
- ARID, F.M. (1970) - Estudos hidrogeológicos no município de São José do Rio Preto, SP. Bol.Soc.Bras.Geol.19(1):43-69. Ilustr. São Paulo
- BARCHA, S.F. & ARID, F.M. (1975) - Origens das cachoeiras da Bacia do Alto Paraná. Rev.Bras.Geol. Vol.5, nº2.
- BARNEA, J. (1972) - Geothermal Power, in Press, F. & Siever, R. - Planet Earth reading from Scient.American 1974
- BORTULUZZI, C.A. & BARBERENA, D.C. (1967) - The Santa Maria beds - In: Int.Symposium of the Gondwana Strat.and Paleont. - 1, 169-196, Curitiba
- BORTULUZZI, C.A. (1974) - Contribuição à Geologia de Santa Maria, Rio Grande do Sul - UFRGS. Inst.Geoc., Pesquisas, 4; 1-86, Porto Alegre
- BRASIL, Serv.de Meteorologia (1970) - Atlas Climatológico do Brasil - Cons.Nac.Geogr., Rio de Janeiro
- BRASIL, Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE - (1972) - Estudo de Águas Subterrâneas - Avaliação Preliminar - São Paulo
- BRASIL, Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE - (1974) - Estudo de Águas Subterrâneas - 4 Vol. Atlas, São Paulo
- BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE - (1974) - Anuário Estatístico do Brasil. 840 p. Rio de Janeiro

- BRASIL, Banco Nacional da Habitação (1975) - Modificações no sistema financeiro do saneamento - Secretaria de Divulgação. 72 p. Rio de Janeiro
- BRITO NEVES, B.B. de & TOMAZ, A.J.P. (1973) - Geologia e Províncias Hidrogeológicas de Santa Catarina - Anais XXVII Congr. Bras. Geol. Sergipe
- CIBPU - Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Uruguai - Hidrologia da Bacia do Alto Paraná - Relat. Geral. São Paulo
- CORDEIRO, N. & WILLET, K. (1969) - Bacia do Rio da Prata - Estudo para sua planificação e desenvolvimento - Inventário de dados Hidrológicos e Climatológicos. OEA. Departamento de Recursos Naturais. Washington, D.C. 273 p. 10 mapas
- DAVIS, J.C. (1973) - Statistics and Data Analysis in Geology - John Wiley and Sons Inc., N.Y.
- DURANTE, A. (1966) - Estudos de permeabilidade de arenitos em laboratório com emprego de permeâmetro - Bol. IGG s/n. São Paulo
- DURANTE, A. (1968) - Estudos de permeabilidade de arenitos em laboratório com emprego de permeâmetro, Parte II, Bol. IGG, 20(nº único): 3-43. São Paulo
- DURANTE, A. et al. (1965) - Estudos e captação de água subterrânea no Estado de São Paulo feitos pelo IGG - 14 p. il. Bol. IGG 44. São Paulo
- FARJALLAT, J.E.S. (1974) - Comportamento da permeabilidade ao ar de alguns basaltos do sul do Brasil - XXVIII Congr. Bras. Geol. Bol. 1, Resumo das Comunicações, p. 69-70, Porto Alegre
- FARO, C. de (1970) - Matemática Financeira - 4ª Ed. APEC - São Paulo
- FERRIS, J.G.; KNOWLES, D.B.; BROWN, R.H. & STALLMAN, R.W. (1969) - Theory of Aquifer Tests - Geol. Survey - Water-Supply Paper 1536-E. Washington
- FRANGIPANI, A. (1964) - Mapa da superfície superior do basalto subjacente nos arenitos cretáceos no Estado de São Paulo - IGG, 15: 67-72, São Paulo

- FULFARO, V.J. (1971) - A Evolução Tectônica e Paleogeografia da Bacia Sedimentar do Paraná pelo Trend Surface Analysis - Esc. Eng. São Carlos, Geol. 14, 112 pp. mimeografiado, ilustrado. (Tese de Livre-Docência), São Paulo
- FULFARO, V.J. (1974) - Tectônica da faixa estrutural do Paranapanema - XXVIII Congr. Bras. Geol. Bol. 1: Resumo de Comunicações, 537-540, Porto Alegre
- GAMERMANN, N. (1972) - Formação Rosario do Sul - UFRGS. Inst. Geoc., Pesquisas 2: 5-36, Porto Alegre
- GUIDICINI, G. & CAMPOS, J. de O. (1968) - Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos - Bol. Soc. Bras. Geol. 17(1): 15-28, São Paulo
- HALL, F.R. (1968) - Base Flow - A - Review-Water Res. Research, vol. IV, nº5, 973-983, Washington. Figs. Tabs. Bibliogr.
- HANTUSH, M.S. (1964) - Hydraulics of Wells, in: Advances in Hydroscience; Academic Press, New York
- HAUSMAN, A. (1956) - Relatório sobre a hidrogeologia da fronteira oeste do Rio Grande do Sul - (inédito). Notas para uma divisão regional do Rio Grande do Sul - Rev. Eng. do RGS, nº34, 15-22, Porto Alegre
- HAUSMAN, A. (1966) - Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul - Bol. Paranaense de Geografia - nºs 18-20. Curitiba
- HOWARTH, R.J. (1967) - Trend-Surface fitting to random data - An experimental test. Am. Journal Sci. 265, 619-625
- HUISMAN, L. (1972) - Groundwater Recovery - Part 6.3, 185-191 - Macmillan Press. Londres
- HULMANN, H.; SCHNEIDER, R.L.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A. & DAEMON, R.F. (1974) - Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná - XXVIII Congr. Bras. Geol. nº1, Resumo das Comunicações. 812-815. Porto Alegre
- JACOB, C.E. (1946) - Drawdown test to determine effective radius of artesian well - Proc. Am. Soc. Civil Eng. vol. 72(5): USA
- LANDSBERG, H.E. (1965) - Global distribution of solar and sky radiation, World Maps of Climatology, Springer Verlag 2^a ed. New York

- LANGE, F.W. & PETRI, S. (1967) - The Devonian of the Paraná Basin Problems in Brazilian Devonian Geology - Bol. Paranaense de Geol. n^{os} 21-22, 5-61. Curitiba
- LEINZ, V. (1937) - Observações nos contatos de diabásio com sedimentos - Serv. Geol. Mineralógico. Notas Preliminares e Estudos 7: 13-16. Rio de Janeiro
- LEINZ, V. (1949) - Contribuição à Geologia dos derrames basálticos do Sul do Brasil - USP, FFCL Bol. 105, Geologia 5. São Paulo
- LEINZ, V. (1953) - Água Subterrânea com referência a São Paulo - Ciência e Cultura, vol. 3: 119-120. São Paulo
- LEINZ, V. & SALLENTIEN, B. (1962) - Água Subterrânea no Estado de São Paulo e regiões limítrofes - Bol. Soc. Bras. Geol. 11(1) 27-36, ilustr. São Paulo
- LEINZ, V.; BARTORELLI, A.; SADOWSKI, G.R. & ISOTA, C.A.L. (1966) - Sobre o comportamento espacial do trapp basáltico da Bacia do Paraná - Bol. Soc. Bras. Geol. 15(4): 79-91. São Paulo
- MAACK, R. & SPITZNER, R. (1946) - Estudo contributivo ao conhecimento de algumas águas minerais do Estado do Paraná - Arq. de Biologia e Tecnologia, vol. 1, 129-154. Figs. Mapas. Curitiba
- MAACK, R. (1970) - Notas preliminares sobre as águas do sub-solo da Bacia do Paraná-Uruguai - Trad. Ursula Maack, 162 p. Tab. Geof. Bibliogr. Curitiba.
- MEZZALIRA, S. (1967) - Atualização dos Estudos e captação de água subterrânea feitos pelo IGG no Estado de São Paulo, 1965-1967. Bol. IGG 19: 83-91. Ilustr. São Paulo
- MEZZALIRA, S. (1974) - Contribuição ao Conhecimento da Estratigrafia e Paleontologia do Arenito Bauru - IGG 51, São Paulo
- MEZZALIRA, S. et alii (1976) - Avaliação dos recursos hídricos da Bacia do rio São José dos Dourados - São Paulo. (No prelo).
- NORTHFLEET, A.A.; MEDEIROS, R.A. & MHULMANN, H. (1969) - Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná - Bol. Tec. Petrobrás, vol. 12, n^o 3, julho-setembro, 291-343. Brasil

- OLIVEIRA, A.M.S.; SILVA, R.F. da & GUIDICINI, G. (1976) - Comportamento Hidrogeotécnico dos Basaltos em Fundações de Barragens - Anais do 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. (No prelo). Rio de Janeiro
- PEREZ, H.H. & HOLTZ, A.C. (1970) - Bacia do Prata - Inventário e Análise Crítica sobre os Recursos Naturais - Mapa Hidrogeológico. OEA. Washington
- PFAFSTETTER, O. (1957) - Chuvas Intensas no Brasil - (DNOS), Ministério da Viação e Obras Públicas do Brasil. Rio de Janeiro
- RAMOS, A.N. (1970) - Aspectos páleo-estruturais da Bacia do Paraná e sua influência na sedimentação - Bol. Tec. Petrobrás, vol. 13, nºs. 3-4, 85-93, Rio de Janeiro
- REBOUÇAS, A.C. (1973) - Le Problème de l'eau dans la zone semi-aride du Bresil - Evaluation des ressources, orientation pour la mise em valeur - Memoire de l'Université de Strasbourg nº CNRS-AO 8639, 287 p. Tab. Ilust. Mapas. França
- REBOUÇAS, A.C. & MARINHO, E. (1970) - Hidrologia das Secas - Contribuição ao I Seminário Internacional Sobre Secas - Lima, Peru - SUDENE Ser. Hidrogeologia, 40, 130 p. Recife. Fig. Tab. Bibliogr.
- RORABAUGH, M.I. (1953) - Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian well - Proc. Am. Soc. Civil Eng. vol. 79, Separate nº 362. USA
- RÜEGG, N.R. (1975) - Modelos de variação química na província basáltica do Brasil meridional - Tese de Livre-Docência. Departamento de Mineralogia e Petrologia, IG-USP. São Paulo
- SANFORD, R.M. & LANGE, F.W. (1960) - Basin study approach to oil evaluation of Paraná Miogeosyncline, South Brazil - Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 44(8). 1316-1370. Rio de Janeiro
- SERRA, A.B. & RATISBONNA, L. (1956) - As Massas de Ar da América do Sul - Serv. de Meteorologia do Min. da Agricultura, 13 p. Fig. Tab. Bibliogr. Rio de Janeiro
- SILVA, J.B. da; PIERRI, A.B.; LIMA, D.P.N. & CARNESECA, L.F. (1975) - Estudo Comparativo de Viabilidade Economica entre Água Superficial e Água Subterrânea para Ampliação do Sistema de Abastecimento de Água de Araraquara - Rel. DAAE. Araraquara, São Paulo

- SINELLI, O. (1974) - Vulnerabilidade dos Aquíferos Subterrâneos na região NNE do Estado de São Paulo - XXVIII Congr. Bras. Geol., Bol. n^o 1. Resumo das Comunicações, 76-77. Porto Alegre
- SOARES, P. C. (1972) - Arenitos Botucatu e Piramboia no Estado de São Paulo - XXVI Congr. Bras. Geol. Bol. 1, 250-251. São Paulo
- SOARES, P. C. (1975) - Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo - Rev. Bras. Geol., vol. 5 n^o 4. São Paulo
- THEIS, C. V. (1935) - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage - Trans. Amer. Geophysical Union, Vol. 16, 519-524. USA
- THORNTON, C. W. & MATHER, J. R. (1954) - The Measurement of Potential Evapotranspiration, Instruction and Tables for Computing Potential Evapotranspiration, vol. XII, n^o 1. Elmer N. Jersey, USA
- WALTON, W. C. (1970) - Groundwater Resource Evaluation - McGraw-Hill Co. New York, USA

BACIA DO PARANÁ

ÁREA DE AFLORAMENTO DOS PRINCIPAIS AQUIFEROS E DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS

por:
Aldo C. Rebouças

BACIA DO PARANÁ
DIAGRAMA PAINEL DAS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

por:
Aldo C. Rebouças

ESCALAS

LEGENDA

AQUÍFEROS LIVRES

- Arenitos Bauru-Caiuá
- Basaltos Serra Geral

AQUÍFEROS CONFINADOS

- Arenitos Botucatu, Piramboia, Rio do Rastro
- Arenitos Palermo, Rio Bonito
- Arenito Furnas

Aquífero com água salgada

Aquicludes regionais

Embasamento geológico

OL-I-SP Poço Petrobrás

Fig. - 8