

Nº 17

CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICAS NO PROCESSO DE SUBSIDÂNCIA EM CAJAMAR, SP

João Alberto Bottura*, José Luiz Albuquerque Filho*

*Pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
- IPT, Cidade Universitária, São Paulo, SP

RESUMO

O município de Cajamar localiza-se na região metropolitana de São Paulo e dista cerca de 20 km da cidade de São Paulo (FIGURA 1); em agosto de 1986, no bairro de Lavrinhas, ocorreu uma subsidência de proporções catastróficas.

A zona colapsada assenta-se sobre calcários muito pouco metamorfisados, capeados por espesso pacote de solo residual, condicionamento local para a ocorrência de dois aquíferos superpostos: o superior, do tipo livre e o inferior confinado, e sobre os quais foi verificado um comportamento hidráulico extremamente complexo.

Os antecedentes locais, sobretudo a intensiva exploração de água subterrânea em estruturas cársticas, foram fatores evidentes do relacionamento do fenômeno de subsidência ao mecanismo de ação da água subterrânea.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogeologia; carst; subsidência; hidrogeologica cárstica, acidente geológico.

INTRODUÇÃO

Em agosto de 1986, em Lavrinhas, bairro da zona urbana de Cajamar, município da região metropolitana de São Paulo distante cerca de 20km da cidade de São Paulo, ocorreu uma subsidência de proporções catastróficas, antecedida por ruídos semelhantes a trovoadas ou explosões. A zona colapsada assenta-se sobre calcários muito pouco metamorfisados (metacalcarenitos, metadolomitos, metaconglomerados dolomíticos brechados) capeados por espesso pacote de solo, constituído por material detrítico e com solo de alteração de rochas metamórficas de baixo grau intercaladas aos calcários (FIGURA 1).

A predisponência ao colapso já era sentida pela população local, pois a propagação de ruídos, deformações em pisos, aparecimento de trincas nas edificações, rompimentos constantes das tubulações da rede de água local etc, eram ocorrências rotineiras. A cratera, com dimensões da ordem de 10m de diâmetro por 10m de profundidade, foi de aparecimento repentino e seus reflexos imediatos se propagaram por uma região com raio da ordem de 400m, através do desenvolvimento de trincas em edificações e no solo.

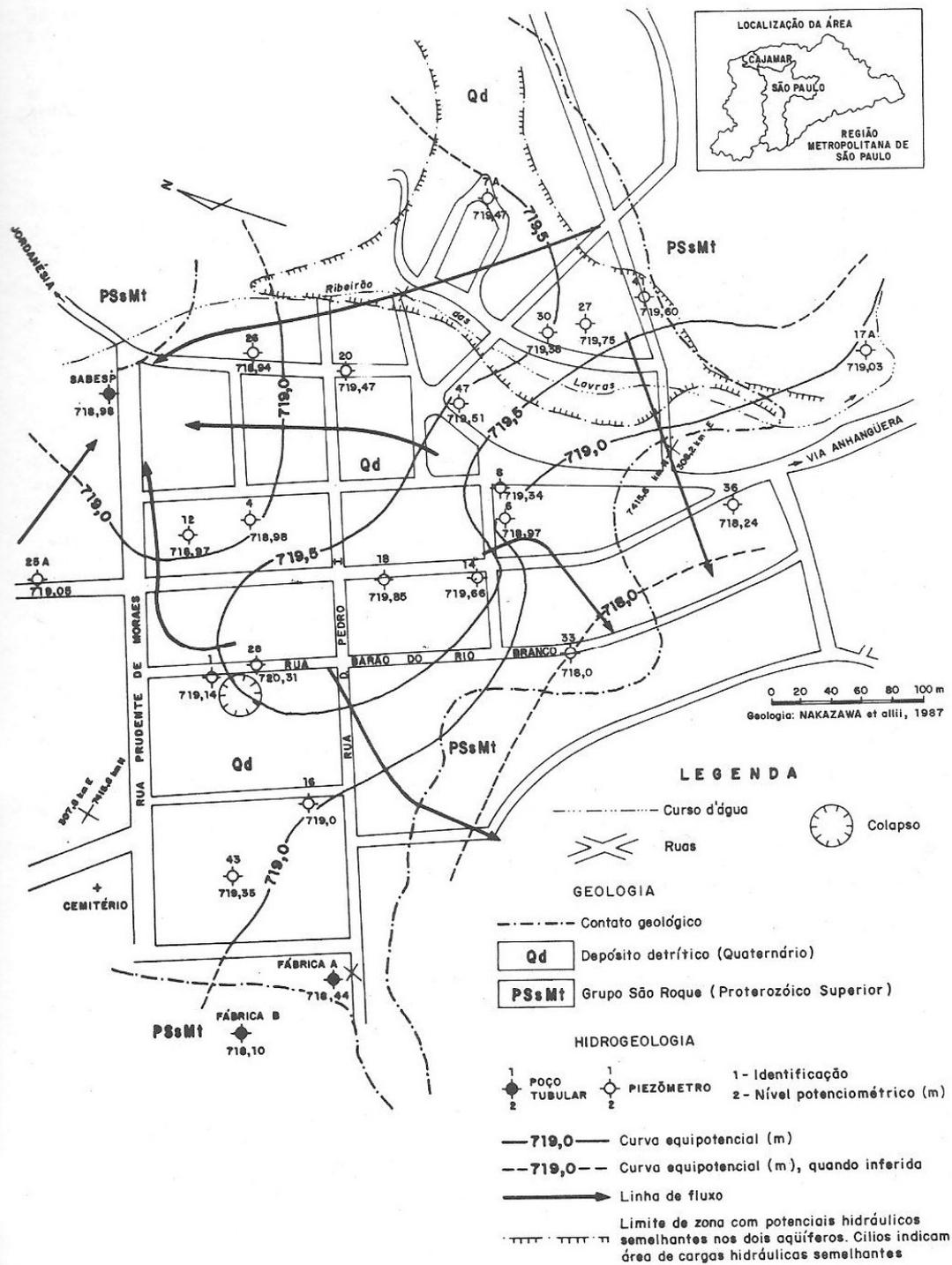


FIGURA 1 - GEOLOGIA DA ÁREA E MAPA POTENCIOMÉTRICO DO AQUIFERO INFERIOR (11/12/86)

A propagação dos efeitos foi rápida no primeiro mês, quando o diâmetro da cratera atingiu 25m e a profundidade 13m. Após 6 meses ela apresentava diâmetro de 32m e a profundidade permanecia a mesma.

Como consequência da sua evolução, 4 casas foram destruídas totalmente e algumas dezenas parcialmente. Nos entornos da área afetada, foram registrados movimentos descendentes do solo (recalques), que mantinham velocidade de 1cm/mês e 6 meses após o colapso, acumulavam amplitude registrada de 5cm à 100m da zona colapsada.

Os antecedentes locais, presença de calcário carstificado, intensiva exploração de água subterrânea captada em estruturas cársticas para o abastecimento urbano e industrial, efeitos da estiagem prolongada devido a ocorrência de uma estação anormalmente seca que se estendeu entre 1984 e 1986 e operações de drenagem efetuadas em pedreira próxima, no período do colapso, foram fatores evidentes do relacionamento do fenômeno a mecanismos de ação da percolação da água subterrânea.

INVESTIGAÇÃO DA ÁREA

A análise de informações referentes aos antecedentes do colapso, pluviometria, exploração local da água subterrânea, eventos de drenagem, aportes temporários de águas (residuais e meteóricas) e o próprio acompanhamento da evolução temporal do colapso, consubstanciaram o programa de investigações desenvolvido.

Deste programa constou: levantamento geológico e geomorfológico de detalhe, prospecção geofísica, investigações diretas do subsolo (sondagens), controle sismológico local, medidas de movimentação em solo, estruturas e edificações, instalação de piezômetros, monitoramento do nível d'água e execução de ensaios de caracterização hidráulica. O detalhamento das informações deste programa é descrito em IPT (1987), NAKAZAWA et alli (1987) e PRANDINI et alli (1987).

O estudo hidrogeológico propriamente dito, foi desenvolvido com base nas informações referentes ao histórico da evolução do fenômeno e antecedentes do uso de água subterrânea na área, sendo o mesmo adequado no transcorrer das investigações desde que a análise integrada o requeresse.

O embasamento teórico do estudo foi obtido com base no monitoramento piezométrico e ensaios de caracterização hidráulica executados. A instrumentação utilizada para este fim constou de: 43 piezômetros (simples, duplos ou triplos) instalados no maciço calcário carstificado, na cobertura de solo, no contato do solo silteoso marrom ou apenas neste último, além de 2 poços tubulares da Indústria de Bebidas Cajamar (Poços Fábrica A e Fábrica B) e 1 da SABESP.

A análise integrada dos dados registrados durante o monitoramento piezométrico e no transcorrer dos ensaios de caracterização hidráulica executados, ensaios de bombeamento de longa duração no poço SABESP e de infiltração em piezômetros, serviram de base para a definição do modelo hidrogeológico local.

HIDROGEOLOGIA

Os calcários carstificados do Grupo São Roque, recobertos por espesso depósito de material detrítico de constituição complexa e compostos essencialmente por solo coluvionar, talus e aluviões, constituem o sistema aquífero local. Duas unidades aquíferas foram reconhecidas, uma superior, do tipo livre, contida na porção superior do depósito de material detrítico, e uma inferior, do tipo confinada a localmente semiconfinada, heterogênea e com pronunciada anisotropia hidráulica, contida no maciço carstificado e englobando a porção basal do depósito de material detrítico.

Aquífero Superior

Aquífero livre, constituído pelo solo coluvionar predominantemente argiloso da porção superior do depósito detrítico que repousa sobre os calcários carstificados, com espessuras da ordem de 15-20m. Seu comportamento hidráulico está intimamente associado às variações genéticas e texturais dos materiais que constituem este solo coluvionar. Sua base repousa sobre os solos essencialmente siltosos, que gradam para um "solo siltoso marrom escuro" da porção inferior do depósito detrítico, ou então diretamente sobre o maciço carstificado. Suas águas apresentam características físicas de águas de baixa salinidade, C.E. próxima a 100µmho/cm e pH ácido, entre 4,0-5,0.

Suas características hidráulicas são pobres, os valores encontrados para a permeabilidade situam-se entre $4,6 \times 10^{-7}$ e $8,6 \times 10^{-5}$ m/h. Os valores mais característicos situam-se entre $1,3 \times 10^{-6}$ e $8,6 \times 10^{-5}$ m/h e denotam caráter de baixa permeabilidade e pequena variabilidade espacial, típica de aquífero pobre e com baixa capacidade de drenagem. No contexto hidrogeológico local esta unidade comporta-se mais propriamente como um aquífero.

A superfície piezométrica apresenta equipotenciais com distribuição relativamente homogênea e gradiente hidráulico variando entre $1,3 \times 10^{-4}$ m/m e $6,9 \times 10^{-3}$ m/m. O ribeirão das Lavras é o exutório natural do aquífero superior e o fluxo subterrâneo desloca-se no sentido NE-SW, na margem direita do ribeirão e no sentido NW-SE, na esquerda. A configuração espacial dos potenciais hidráulicos apresenta melhor definição na margem direita do ribeirão das Lavras, sua distribuição é mais homogênea e as direções de fluxo subterrâneo são bem definidas. Na margem esquerda, a distribuição dos potenciais hidráulicos é indefinida e a configuração do fluxo subterrâneo é mais complexa.

O desenvolvimento de uma zona com fluxo subterrâneo sob baixo gradiente hidráulico na porção central da área, entre a Praça Benedito Martins da Cruz e a parte baixa da Vila Branca, denota a ocorrência de uma zona com permeabilidade relativamente mais alta.

A recarga é originada pela infiltração das águas meteóricas e a velocidade de trânsito através do meio não-saturado é rápida.

Pela configuração dos potenciais hidráulicos nas proximidades da calha do ribeirão das Lavras, observou-se que durante a estação seca, sua superfície piezométrica situava-se abaixo do leito do ribeirão.

Foi observado ainda seu comportamento estanque em relação ao aquífero inferior, pois os bombeamentos realizados neste último em nenhum momento afetaram seus potenciais hidráulicos.

Aquífero Inferior

Aquífero confinado a localmente semiconfinado, constituído pelo maciço de calcário carstificado com intercalações de filitos e quartzitos e pela porção basal do depósito detrítico, notadamente a porção caracterizada como "solo siltoso marrom", de constituição e conformação complexas e onde desenvolvem-se vazios saturados por água ou lama, sob pressão. Seu comportamento hidráulico está associado às variações litológicas e estruturais do maciço, o que lhe confere características de heterogeneidade com pronunciada anisotropia hidráulica.

Suas águas apresentam características físico-químicas típicas de aquífero cárstico, dureza alta (> 120 mg/L) e pH básico (> 8)

Os valores de seus parâmetros hidráulicos são altos e apresentam grande dispersão, condicionamento hidráulico condizente ao meio que associa-se à presença de vazios em solos e maciço carstificado com presença de cavernas e fraturas de grande extensão abertas por dissolução. Os valores das suas características hidráulicas situam-se dentro dos seguintes intervalos de variação.

transmissividade efetiva (Te) - $7,1m^2/h$ - $97,4m^2/h$; e
coeficiente de armazenamento (S) - $1,7 \times 10^{-4}$ - $7,0 \times 10^{-3}$

A distribuição espacial da transmissividade efetiva mostra tendência de aumento dos valores a partir da porção central da área, em direção às partes altas dos bairros de Lavrinhas e Vila Branca. Na porção baixa, os valores situam-se entre $8,0m^2/h$ e $14,6m^2/h$, a curva de isotransmissividade efetiva de $20m^2/h$ engloba toda esta porção baixa e adentra para a zona do abatimento e em direção a sul (FIGURA 2)

Os locais com valores de transmissividade efetiva relativamente mais altos são pontos do maciço localizados na parte topograficamente mais alta. Esses valores são excessivamente superiores aos usuais, mais característicos de maciços com alto grau de carstificação e variam entre $31,3m^2/h$ e $93,11m^2/h$, são crescentes no sentido do fluxo subterrâneo e da elevação da superfície topográfica (FIGURA 2).

A configuração espacial da superfície potenciométrica mostra a existência de um patamar cortando a área no sentido aproximado E-W, que comporta-se como um divisor local, com fluxo subterrâneo divergindo a partir dele para as direções NE-SW, no sentido dos poços tubulares existentes (FIGURA 1).

Por outro lado, a configuração espacial da superfície potenciométrica induzida em decorrência de 24h de bombeamento no poço SABESP em direção ao poço Fábrica A e, para sul, em direção aos piezômetros 6 e B (FIGURA 2). Os fluxos subterrâneos, durante o bombeamento, sofrem inversão em relação à superfície original, convergindo a partir de toda a área para o poço SABESP (FIGURA 2). Nota-se, da comparação entre as duas superfícies, que os gradientes hidráulicos sofrem sensíveis alterações devido ao bombeamento; os gradientes naturais situam-se entre $1,7 \times 10^{-3}$ a $1,3 \times 10^{-2}$, enquanto que os induzidos apresentam aumentos significativos, situando-se entre $3,1 \times 10^{-3}$ a $2,4 \times 10^{-2}$.

As irregularidades na distribuição espacial dos rebaixamentos induzidos pelo bombeamento do poço SABESP, mostram com clareza dois eixos principais de anisotropia hidráulica do maciço (FIGURA 2)

MODELO HIDROGEOLÓGICO

O sistema aquífero local, de constituição e conformação espacial complexa, foi individualizado com base nos potenciais hidráulicos medidos na rede piezométrica monitorada. Ele comporta duas unidades aquíferas, como anteriormente definidas, que no contexto geológico/hidrogeológico local não possuem estrato de confinamento litológico. O confinamento hidráulico é exercido pelo limite extremo existente entre as características hidráulicas das duas unidades aquíferas que se superpõem:

T (aquífero superior) - $1,5 \times 10^{-3} m^2/h$ a $2,0 \times 10^{-4} m^2/h$
Te (aquífero inferior) - $7,1m^2/h$ a $97,4m^2/h$

Para os limites mais próximos, relação entre o menor valor de transmissividade do aquífero inferior e maior valor de transmissividade do aquífero superior, a razão é de 4730 vezes, suficiente para manter a estanqueidade entre as duas unidades. A unidade superior, a nível local, comporta-se mais propriamente como um aquitard. O condicionamento hidráulico individualizado das unidades aquíferas, particularmente da inferior, é complexo. Drenança entre elas não foi registrada, mesmo após 72h de bombeamento contínuo. Durante os 3 ensaios de bombeamento executados, foram monitorados sistematicamente os piezômetros 03C, 07, 08, 12C, 15B, 22B, 25B, 28B, 30C, todos instalados no aquífero superior. Nos piezômetros 03C, 15B, 22B, 28B não foi registrado resposta ao bombeamento, enquanto os piezômetros 12C, 25B apresentaram comportamento indefinido. O piezômetro 12C, apesar de rebaixar $0,13m$ no início do ensaio, após decorridos 600 min de bombeamento entrou em processo de recuperação do nível. Os piezômetros 07 e 30C responderam aos

ensaios; o piezômetro 07, de maneira mais consistente e apresentando resposta com retardamento da ordem de 26 min, enquanto o piezômetro 30C apresentou retardamento de 300 min. no segundo ensaio e 350 min no terceiro ensaio, além de comportamento inicial anômalo com elevação dos níveis.

Os piezômetros 25A, 28A, 30A, 43A instalados no aquífero inferior ou então no contato entre ambos, também apresentaram resposta com retardamento; os piezômetros 03B, 15A responderam com retardo apenas ao segundo ensaio de bombeamento de longa duração. Este comportamento leva a considerar que os piezômetros 25A, 28A, 30A, 43A para o período inicial ensaiado, estejam refletindo o comportamento sobreposto das duas unidades aquíferas.

Para o aquífero inferior, registrou-se um quadro de extrema variabilidade, não só espacial mas também pontual, das características hidráulicas do maciço indicando sua estratificação hidráulica e mostrando que as condicionantes do fluxo subterrâneo, principalmente os gradientes hidráulicos induzidos, sofrem profundas variações localizadas. Para o piezômetro 28, localizado entre os piezômetros 03B e 15A, a transmissividade efetiva registrada é 4 vezes menor do que nestes dois, para os quais foram registrados valores de 85 e 115 m²/h, no trecho inicial da curva. Nos piezômetros 01, 04A, 06A, 12A e 28A, foram determinadas transmissividades efetivas no trecho final das curvas, cerca de 2 vezes superiores àquelas registradas no trecho médio.

Os hidrogramas mostram diferenciação no comportamento espacial das interrelações hidráulicas entre as duas unidades aquíferas. Nos piezômetros situados no bairro de Lavrinhas, margem direita do ribeirão das Lavras, nota-se nítida diferenciação nos potenciais hidráulicos e no comportamento temporal das duas unidades. Neste local, os potenciais hidráulicos do aquífero superior nas proximidades do vale do ribeirão estão cerca de 1,0m superiores aos do aquífero inferior, enquanto nas porções mais elevadas, as diferenças atingem cerca de 20m. Os hidrogramas mostram nítidas diferenças nas respostas induzidas pelas recargas. Na unidade superior elas são ligeiramente mais lentas e de menor amplitude, apesar da forma ser semelhante para ambas as câmaras dos piezômetros.

Os aspectos de recargas das duas unidades guardam, apesar da semelhança, individualidades características. As formas das curvas do aquífero inferior, mostram características de homogeneidade e evidências que o processo de recarga é semelhante em toda a unidade. Para o aquífero inferior, as respostas são rápidas, tanto na elevação quanto no descenso, e as amplitudes são ligeiramente decrescentes para os mais distantes do ribeirão das Lavras.

Na margem esquerda do ribeirão das Lavras, não existe diferenciação nítida entre os potenciais hidráulicos medidos nos piezômetros superiores e inferiores.

O monitoramento executado no transcorrer de violento aguaceiro com duração aproximada de 90 minutos, permitiu caracterizar aspectos relevantes sobre o mecanismo de recarga do sistema aquífero local (FIGURA 2). A falta de estação pluviométrica no local não permitiu estabelecer correlações entre a lâmina precipitada e as recargas induzidas.

Os registros obtidos indicaram que apenas na área de influência do piezômetro 25 não foi verificada recarga. Em todos os outros pontos ela foi detectada e com maior intensidade na porção baixa da área, margem esquerda do ribeirão das Lavras, bairro de Vila Branca. A distribuição espacial da lâmina d'água infiltrada variou entre 0,09-1,65m e a sua configuração espacial se traduz por uma superfície concêntrica ao piezômetro 07A. Este comportamento caracterizou esta região como área de recarga local do aquífero inferior e mostrou evidências do relacionamento entre as recargas e o regime de cheias do ribeirão (FIGURA 3)

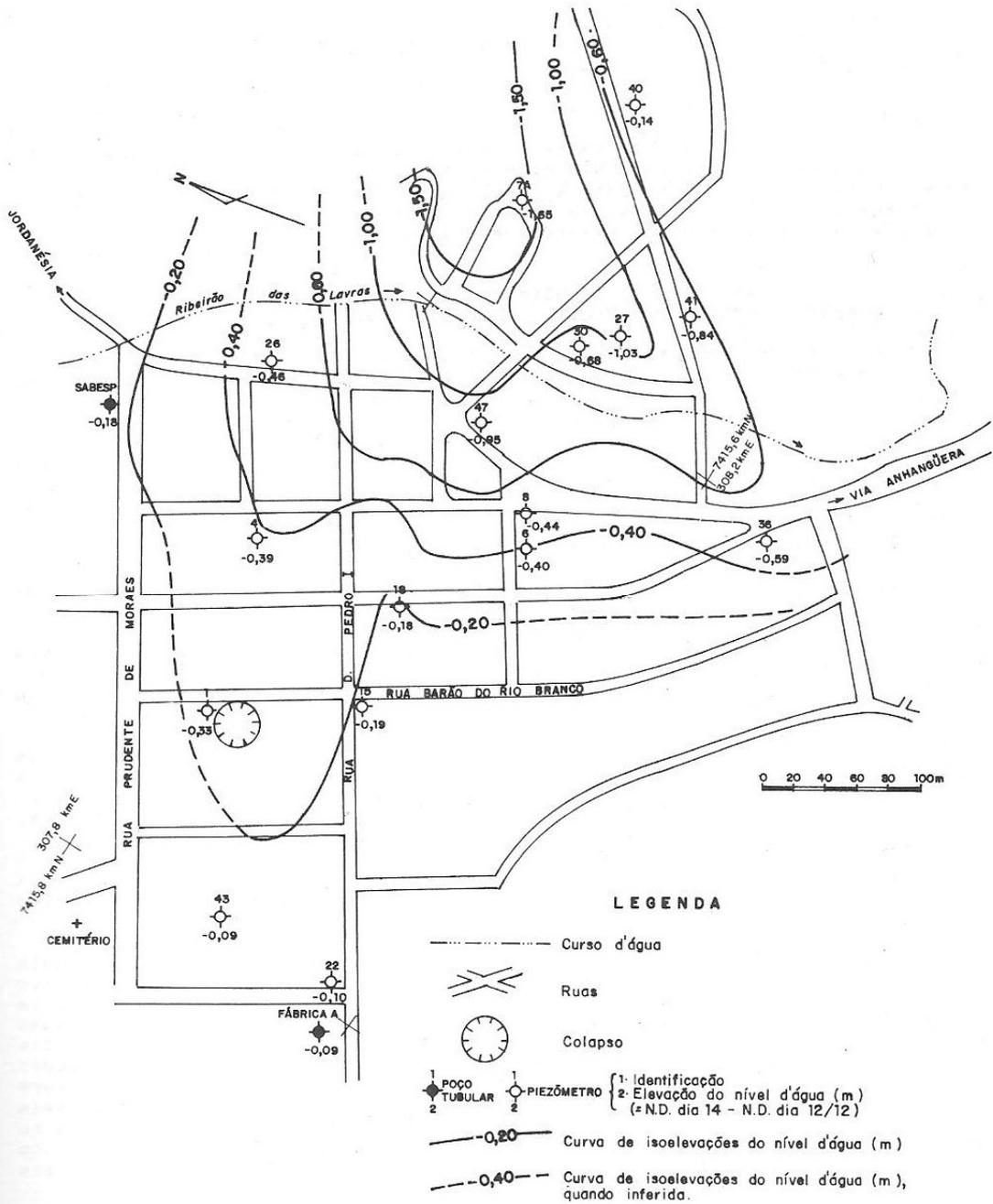


FIGURA 3 - RECARGA INDUZIDA PELA CHUVA DO DIA 13/12/86

CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICAS NO PROCESSO DE SUBSIDÊNCIA

Com base no modelo hidrogeológico, alguns aspectos relevantes do condicionamento hidráulico do aquífero inferior, ressaltam-se como agentes ativadores do processo de abatimento e subsidência:

apesar de não ter sido possível a quantificação, aspectos de sobreexploração dos recursos hídricos subterrâneos são evidentes. O quadro atual mostra um desequilíbrio nas ações de aportes e saídas de água subterrânea, o rebaixamento da superfície potenciométrica do aquífero inferior é generalizado, a queda das vazões explotadas e o aumento dos rebaixamentos nos poços tubulares em operação são significativos. Aliado a isto, tem-se ainda operações de drenagem levadas a cabo na pedreira Pires e a estiagem prolongada dos últimos anos. O somatório destes efeitos reflete-se em alterações no equilíbrio dos esforços efetivos internos do aquífero;

Poço	N.E. (m)		ND(m)		s (m)	Q/s (m ³ /h/m)	Data
	Prof.	Cota	Prof.	Cota			
SABESP	2,41	725,00	9,54	717,87	7,13	20,2	8/80
	8,32	719,09	20,12	707,29	11,80	6,8	8/86
	7,28	720,13	27,00	700,41	19,72	5,7	12/86
	7,58	719,89	31,05	696,36	23,53		2/87
CAJAMAR A	29,30	723,66	30,90	722,06	1,60	18,7	12/79
	33,48	719,48	36,40	716,56	2,92	8,6	8/86
	34,28	718,68	36,12	716,84	1,84	8,1	12/86

QUADRO 1 - Posições conhecidas do Nível Estático do aquífero inferior

- observa-se no quadro acima que, durante o período compreendido entre os anos de 1980/1986, foi verificado rebaixamento do nível estático de aproximadamente 6m, no poço SABESP e de 4m no poço Cajamar A. Concomitantemente a esse rebaixamento, foram observadas quedas significativas nas vazões específicas e também nos níveis dinâmicos dos 2 poços. No período 1979/1980, o nível estático do poço SABESP estava bem próximo à posição atual da superfície piezométrica do aquífero superior, nos seus entornos;

- a indução de fluxos direcionais e localizados em decorrência dos bombeamentos. Estes sistemas de fluxo são transitórios e estão sujeitos à mudanças de sentido e velocidade, de acordo com as operações de bombeamento dos poços. As percolações induzidas, além de direcionadas para as captações, devido às características peculiares do meio ocorrem em zonas preferenciais, cavidades ou fraturas abertas. Em decorrência dos altos gradientes hidráulicos formados durante os períodos de fluxo transitório, esforços localizados e o aumento das velocidades de percolação podem ter induzido colapsos e processos erosivos internos;

- as decompressões podem atuar a dois níveis: nos vazios existentes no "solo siltoso marrom", da base do maciço detrítico e nas cavidades do maciço carstificado. Elas são originadas pelas variações diárias da superfície potenciométrica, em decorrência das operações de bombeamento, e suas amplitudes estão relacionadas ao tempo de operação dos poços, às variações sazonais de nível d'água e aos rebaixamentos induzidos. Além de alterações cíclicas nas pressões atuantes, este processo, nos vazios em solo, dá origem ao sistema de fluxo vertical descendente, direcionada por zonas preferenciais de percolação no maciço. No interior de cavidades ou fraturas abertas no maciço carstificado, e independentemente da natureza dos materiais ou condições de preenchimento, o processo atua como agente modificar dos esforços resistentes;

- a localização da área de recarga local do aquífero inferior, na porção baixa da área, proximidades da zona preferencial de fluxo induzido pelo bombeamento, pode vir a colaborar na ativação de possíveis processos de dissolução dos calcários na área. O nível de ação desta dissolução, caso

ocorra, será controlado pelo sistema de fluxo transitório induzido pelo bombeamento, pelas flutuações da superfície potenciométrica e pela diferença entre a composição físico-química da água do aquífero e de recarga; e

- as condicionantes hidrogeológicas do aquífero superior têm sua atuação, no momento, voltada à ação secundária como agente evolutivo do processo de subsidência. As alterações impostas ao meio, particularmente aquelas visíveis em superfície, o buraco e o sistema de trincas que se desenvolvem no solo, nos entornos da área afetada, podem evoluir de maneira a vir contribuir para modificar o caráter das interrelações hidráulicas entre as duas unidades aquíferas. Estas modificações atuarão no sentido de facilitar processos de infiltração induzidas, dando origem a fluxo vertical descendente entre as duas unidades aquíferas, passando, este processo, a atuar como mais um agente ativador dos fenômenos de colapso e subsidência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NAKAZAWA, V.A.; PRANDINI, F.L.; ÁVILA, I.G. de; PONCANO, W.L.; BRAGA, A.C. de O.; BOTTURA, J.A.; SANTORO, E. 1987. Cajamar - carst e urbanização: investigação e monitoramento. In: Cong. Bras. Geol. Eng., 5, São Paulo, 1987. Anais... São Paulo, ABGE, v.2, p.443-460.
- PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; ÁVILA, I.G. de; OLIVEIRA, A.M.S.; SANTOS, A.R. dos. 1987. Cajamar - carst e urbanização: zoneamento de risco. In: Cong. Bras. Geol. Eng., 5, São Paulo, 1987. Anais... São Paulo, ABGE, v.2, p.461-470.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT. 1987. Diagnóstico do abatimento de terreno em Cajamar, SP, e definição de medidas e diretrizes para a resolução do problema. São Paulo, 7v. (IPT Relatório no. 25 053).