

Movimentos de água subterrânea relacionados com a atividade sísmica em Bebedouro (SP): Inferências com geotermia

Tereza H. Yamabe - FCT/UNESP-PP, Valiy a M. Hamza - ON/MCT, Rio de Janeiro, Marcelo Assumpção – IAG/USP e Carlos Alberto Birelli – IPT, São Paulo

Copyright 2006, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica
Este texto foi preparado para a apresentação no II Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, Natal, 21-23 de setembro de 2006. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Técnico-científica do II SR-SBGF mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF

Resumo

Estudos dos tremores de terra no Distrito de Andes, município de Bebedouro (SP), sugerem uma correlação entre a atividade sísmica e o bombeamento de água subterrânea. Perfilagens térmicas de poços tubulares profundos nesta região revelam distribuições de temperaturas com características típicas de transporte advectivo de calor no interior dos poços. Os resultados indicam fluxo descendente de água subterrânea (geralmente de ~40 a ~130m) a partir de aquíferos superiores para as zonas fraturadas profundas. Estimativas preliminares indicam fluxos da ordem de 2–10m³/h. Quando os poços não são bombeados, este aporte adicional de água pode reduzir atritos em zonas de fraturas subsaturadas podendo ser o mecanismo gerador da sismicidade.

Introdução

No Brasil, ocorrências de sismos induzidos por poços tubulares foram constatadas nos municípios de Nuporanga (Hamza, 1978) e de Presidente Prudente (Yamabe, 1999), ambos na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo. Berrocal et al. (1984) também relatam possíveis ocorrências semelhantes em outras localidades da Bacia do Paraná.

No caso de Nuporanga o fluxo de fluidos, propiciado pela perfuração dos poços foi o mecanismo responsável pelas atividades sísmicas (Yamabe e Hamza, 1996). Neste local os poços tubulares apresentaram condições favoráveis para movimentos descendentes de águas provenientes das camadas superiores. Isto é, os poços atuam como condutos de infiltração das águas dos aquíferos superficiais para zonas de fraturas ou fendas profundas sub-saturadas. Este processo torna-se significativo quando os poços não são revestidos.

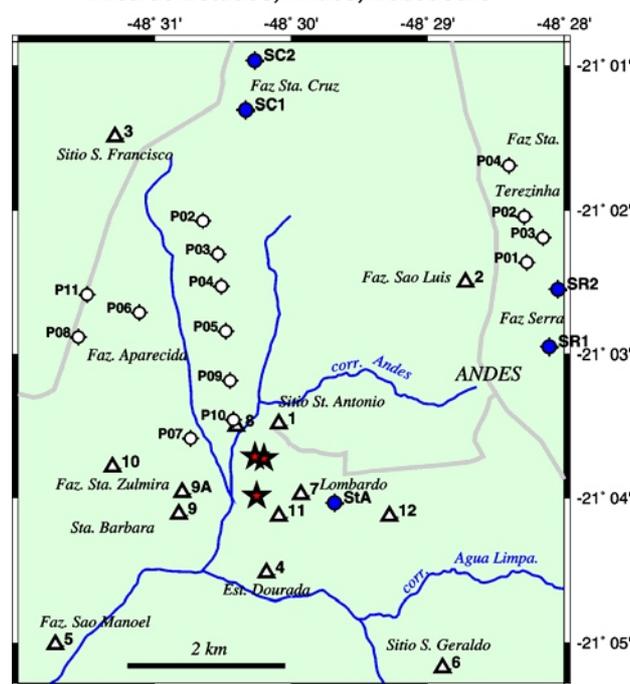
Sismicidade em Bebedouro (SP)

Desde o início de 2004, pequenos tremores de terra são sentidos por moradores do Distrito de Andes, município de Bebedouro, SP, (Fig. 1a). Esses tremores vêm sendo estudados sistematicamente desde março de 2005 (Assumpção & Yamabe, 2005). A Fig. 1b mostra os epicentros dos três maiores sismos ocorridos até junho de 2006 com magnitudes até 2,9. A atividade sísmica se estende por uma área 2km x 4km englobando alguns poços profundos com vazões superiores a 100 m³/h. Os estudos sugerem uma forte

correlação entre perfuração e bombeamento de poços profundos e a ocorrência dos tremores.



Area de Estudos, Andes, Bebedouro



▲ estação sismográfica ◆ poços perfilados ★ epicentros 2005

Figura 1. a) Faz. Retiro (Monte Azul) e Andes (Bebedouro). b) Localização dos poços de Andes que perfuraram a camada de basalto (círculo). Nos poços em azul foram feitas perfilagens térmicas. As estrelas são os três maiores sismos até maio de 2006, e triângulos são estações sismográficas.

As investigações geotérmicas foram iniciadas em setembro de 2005 para estudar a natureza dessa correlação, através de uma avaliação dos eventuais movimentos de água subterrânea propiciados pelas

perfurações de poços profundos. A escolha do método geotérmico deve-se à facilidade com que os vestígios das movimentações de água subterrânea podem ser identificados com medições simples de temperaturas em subsuperfície. Desta forma, o enfoque principal dos estudos geotérmicos foi a identificação dos sinais térmicos dos movimentos de água subterrânea, com perfilagens térmicas de poços tubulares. As investigações geotérmicas foram realizadas em seis poços da região: um na Fazenda Retiro no município de Monte Azul Paulista (Fig. 1a) e cinco em Andes, Bebedouro, (Fig. 1b).

Contexto Hidrogeológico

As formações geológicas que afloram na região (Adamantina e Serra Geral) repousam sobre a Formação Botucatu (Jurássico-Eocretáceo) da Bacia do Paraná. A Formação Adamantina (Cretáceo) é constituída predominantemente por arenitos argilosos. A Formação Serra Geral (Eocretáceo) é composta de basaltos.

Estudos hidrogeológicos indicam que o basalto é caracterizado por valores relativamente baixos de porosidade e de permeabilidade. Nesse meio a água encontra-se em fraturas, de distribuição heterogênea pelo aquífero. Assim, de acordo com Feitosa e Manoel F^o (2000), em um mesmo maciço podem existir zonas de porosidade nula onde não ocorre nenhuma fratura e outras de porosidade relativamente alta onde há uma concentração de fraturas. Cálculos de porosidade têm indicado valores médios de 2 a 12% para o basalto. Por outro lado, a permeabilidade ou a facilidade de movimentação da água pela rocha e também o armazenamento da água de um aquífero fissural dependem, ainda segundo aqueles autores, de várias características das fissuras, tais como seu comprimento, abertura, forma e rugosidade das paredes, orientação e posição, preenchimento, etc.

A grande variabilidade das vazões dos poços tubulares da área estudada, entre 20-30m³/h (P05, P02 e StA) a 150-190m³/h (P10 e P07) (ver Fig. 1b), indicam a variação existente das características das fissuras do aquífero local.

A camada logo abaixo da Formação Serra Geral, constituída de arenitos eólicos da Formação Botucatu, possui porosidade e permeabilidade relativamente elevadas e é considerada como o aquífero principal da Bacia do Paraná (Aquífero Guarani), mas não é explorado no distrito de Andes por estar a mais de 500m de profundidade. Em geral o pacote de derrames de basalto atua como uma barreira quase impermeável entre o aquífero Guarani e as camadas superiores.

Esta descrição das características hidrogeológicas da área de estudo é de caráter genérico, sendo que em escala local ocorrem particularidades que diferem deste quadro geral. Por exemplo, as seqüências litológicas da região Nordeste Paulista são um pouco mais complexas, pois há locais onde existem depósitos lenticulares de arenito intercalados na parte basal da formação Serra Geral. Denominados arenitos inter-trapes, pois ocorrem entre os derrames de basalto, esses corpos podem atuar como aquíferos locais de pequeno porte.

Características dos Poços Tubulares em Bebedouro

Os poços perfurados na região de Bebedouro, até a década de 1990, eram relativamente rasos, com profundidades não superiores a 100 metros. Estes poços captam água da Formação Adamantina. No entanto, nos últimos anos iniciou-se uma nova fase de perfurações mais profundas, principalmente para fins de citricultura regional. As novas perfurações, com até cerca de 200m, extraem água subterrânea de aquíferos fissurais do basalto localizados, geralmente, em camadas/fraturas interderrames.

A maioria dos poços da região é revestida apenas nas suas partes superiores, com tubulação menor que 20 metros. A ausência de revestimentos em profundidades maiores parece ter propiciado a movimentação de água no interior dos poços. É possível ouvir som de queda de água, em quatro dos seis poços perfilados, indicando que água de níveis rasos entra continuamente para dentro dos poços, formando verdadeiras "cachoeiras internas". Nota-se que a possibilidade de se ouvir o som de cachoeira no interior de poços tubulares ocorre somente quando o nível d'água do aquífero profundo está abaixo da camada portadora das águas superficiais.

Método Geotérmico e as Perfilagens Térmicas

O campo térmico do subsolo, em profundidades de até algumas dezenas de metros, sofre efeito das variações diurnas e sazonais das temperaturas da superfície. Em profundidades maiores as temperaturas são menos afetadas pelas variações de curta duração da superfície e a temperatura aumenta linearmente com a profundidade, devido ao fluxo de calor proveniente do interior da Terra. A taxa de variação da temperatura com a profundidade depende do fluxo de calor do interior da Terra e das propriedades térmicas das formações geológicas locais. O valor médio do gradiente geotérmico para o Estado de São Paulo é de 20 a 30°C/km (Hamza et al., 1979; Hamza, 1982; Santos et al., 1986; Hurter & Pollack, 1996). Contudo, os movimentos de água subterrânea através das camadas permeáveis ou do sistema de fraturas induzem modificações locais na distribuição de temperaturas (e.g., Hamza, 2000). Geralmente fluxos de água subterrânea nas formações geológicas permeáveis induzem alterações no campo térmico em escala regional. Em alguns casos específicos perfurações também podem propiciar fluxo de água no interior de poços, induzindo desta forma alterações localizadas no campo térmico.

Todos os seis poços perfilados neste trabalho foram perfurados em 2004 e, aparentemente, atravessam pelo menos os dois últimos derrames do basalto. As medições foram efetuadas em intervalos de dois metros, durante as operações de descida da sonda térmica. No caso do poço Santa Ana foram efetuadas duas perfilagens térmicas, que mostraram coerência nas medidas. O perfilaror térmico utilizado em Andes possui uma precisão relativa de $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$, permitindo identificação de pequenas variações de temperatura, indicativas de entradas ou saídas de água no poço, através de fraturas ou de material alterado da rocha.

A Fig. 2 apresenta os perfis térmicos dos 5 poços de Andes, e a Fig. 3 o perfil do poço da Fazenda

Retiro em Monte Azul. Os perfis revelam mudanças abruptas na distribuição vertical de temperaturas. Comparações com os perfis térmicos obtidos por Hamza et al (1979) e Santos et al (1986) indicam que essas características são atípicas do campo térmico da região noroeste do Estado de São Paulo. De acordo com Hamza (2000, 2001) perfis desta natureza indicam regimes térmicos transientes. Assim, análises detalhadas desses perfis térmicos são fundamentais no estudo do mecanismo responsável pela atividade sísmica.

Os perfis térmicos em Andes são muito semelhantes entre si. São constituídos de três segmentos distintos, designados aqui como superior, intermediário e inferior. O segmento superior, que se estende desde a superfície até cerca de 40m de profundidade, sofre influência direta das variações de temperatura do ar na superfície. É a consequência de baixos níveis de águas subterrâneas nesta região, o que permite circulação de ar atmosférico na parte superior dos poços.

Os segmentos intermediários dos perfis térmicos, situados entre cerca de 40 e 130m, são caracterizados por variações relativamente pequenas de temperatura. Na maioria dos perfis as temperaturas destes segmentos são praticamente constantes (gradientes inferiores a $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$). As distribuições de temperatura desta natureza indicam fluxo descendente de águas relativamente frias. As zonas onde ocorrem fluxos desta natureza estão designadas pela sigla ZTC (Zona de Temperatura Constante).

Logo abaixo da ZTC as temperaturas aumentam rapidamente com a profundidade. Nesta Zona de Gradiente térmico Alto (designada aqui por ZGA) a taxa de aumento da temperatura é de 46 a $84^{\circ}\text{C}/\text{km}$. No poço da Fazenda Retiro (Fig. 3) este gradiente foi em torno de $190^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Além disso, na ZGA os valores dos gradientes térmicos diminuem com a profundidade e os formatos dos perfis térmicos indicam tendências de aproximação da temperatura para valores não perturbados em profundidades maiores. As simulações computacionais indicam que os formatos dos perfis térmicos desta zona apresentam semelhanças notáveis com as curvas de esfriamento condutivo progressivo, conforme mostrado abaixo. Conclui-se, portanto, que as variações de temperatura na ZGA são resultantes do esfriamento ocorrido na camada ZTC. Cálculos preliminares indicam que os períodos de esfriamento são da mesma ordem de grandeza dos tempos decorridos após a abertura dos poços.

A Tabela 1 apresenta as diferentes zonas identificadas nos seis poços perfilados. Estão relacionados os intervalos onde ocorrem as cachoeiras internas, bem como as camadas onde há movimento descendente de água e a temperatura é constante (ZTC), e onde a água permanece parada na parte inferior do poço e o gradiente térmico é alto (ZGA). Todos esses dados foram inferidos a partir dos perfis térmicos das Figuras 2 e 3.

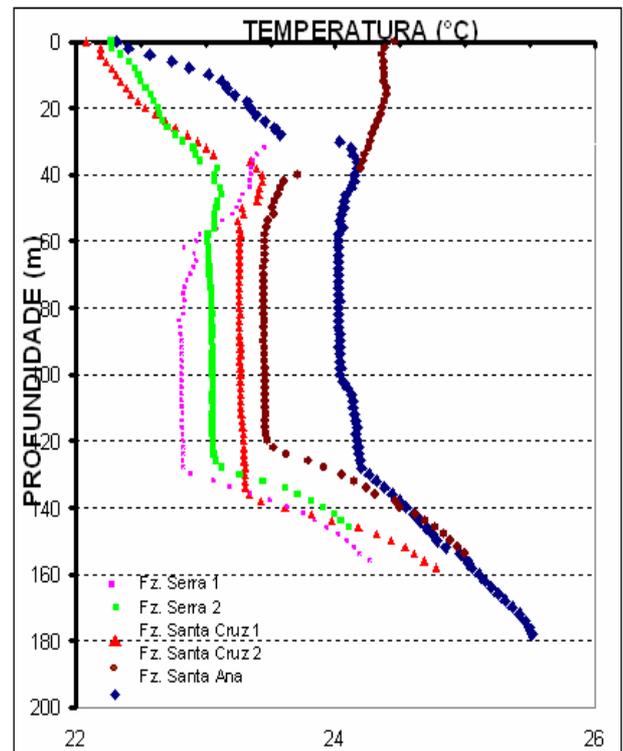


Figura 2. Distribuições verticais de temperaturas nos poços no distrito de Andes, Bebedouro (SP).

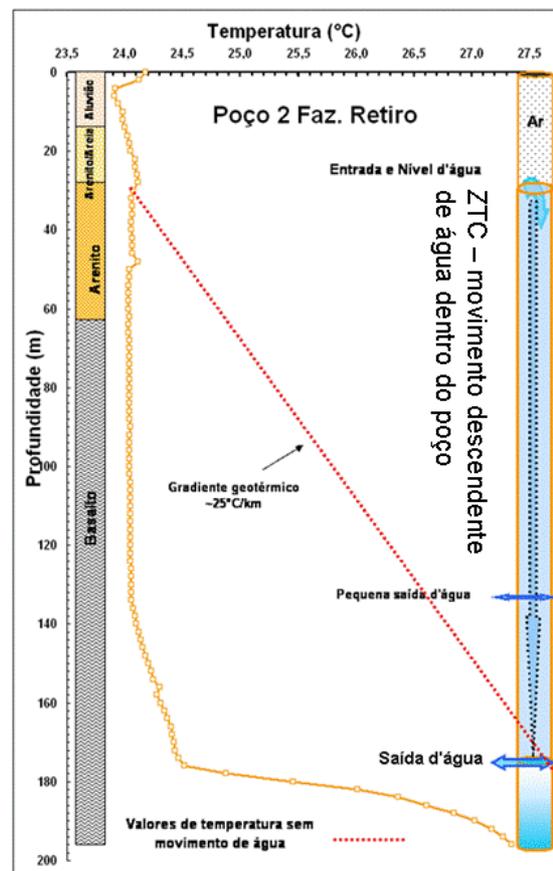


Figura 3. Litologia, temperaturas e interpretação de movimentação de água no poço da Faz. Retiro (Monte Azul).

Tabela 1. Profundidades das zonas identificadas nos poços. ZTC – Zona de temperatura constante. ZGA – Zona de gradiente térmico alto.

Poço	Zona de Cachoeira (m)	ZTC (m)	ZGA (m)
Santa Cruz 1	36 - 50	50 - 134	136-160
Santa Cruz 2	40 - 52	54 - 120	122-154
Serra 1	32 - 62	64 - 128	130-156
Serra 2	38 - 58	58 - 126	128-146
Santa Ana	30 - 58	58 - 128	128 -176
Retiro	–	30 - 174	176-196

Segmento Intermediário (ZTC) e fluxo descendente de água dentro do poço

A distribuição de temperaturas no segmento intermediário (ZTC) é indicativa de um regime térmico atípico. No presente contexto, o único processo capaz de manter temperaturas constantes neste intervalo é a advecção, ou seja, um fluxo descendente de águas relativamente frias. Podemos então afirmar que na zona de temperatura constante (ZTC) ocorre um equilíbrio dinâmico entre o fluxo condutivo de calor proveniente do interior da Terra e o transporte de energia térmica associada à advecção. O aumento rápido da temperatura no segmento inferior (ZGA) implica que está ocorrendo fuga lateral de água na base do segmento intermediário.

A distribuição de temperatura no segmento intermediário permite inferências sobre a magnitude de fluxo de água subterrânea no interior do poço. Uma formulação quantitativa deste processo pode ser efetuada com base na análise do balanço térmico entre o fluido na parte interior do poço e o meio circunvizinho. A solução para temperaturas no interior do poço é dada por (Ramey, 1962):

$$T(z,t) = T_0 + \Gamma z - \Gamma A + [T_f(t) + \Gamma A - T_0] e^{-z/A} \quad (1)$$

em que T_0 é a temperatura da superfície, Γ o gradiente geotérmico, A um parâmetro relacionado com o transporte advectivo de calor e $T_f(t)$ temperatura do fluido no local da sua entrada no poço. Para o fluxo de água no interior do poço, a resistência térmica de contato na parede do poço é geralmente pequena e o coeficiente de transferência de calor elevado. Neste caso, o parâmetro A pode ser representado pela relação:

$$A \approx \frac{r_1^2 v \rho c f(t)}{2 \lambda} \quad (2)$$

em que r é raio do poço, v a velocidade de fluidos no interior do poço, ρc é a capacidade calorífica, λ a condutividade térmica e $f(t)$ uma função adimensional de tempo de circulação de fluidos.

Geralmente, a variação da $T_f(t)$ é pequena e a sua magnitude é aproximadamente igual a T_0 . Neste caso, a equação (1) simplifica para:

$$T(z,t) = T_0 + \Gamma z - \Gamma A \left[1 - e^{-z/A} \right] \quad (3)$$

Conforme sugerido por Ramey (1962), o lado direito da equação (2) é função do parâmetro de fluxo (A). Assim, é possível gerar curvas teóricas para diversos valores de A e comparar com as temperaturas observadas. A curva que fornece o melhor ajuste permite a determinação do parâmetro A , como ilustrado

na Figura 4 para o poço Santa Ana. Neste caso, os dados observados (triângulos na figura) estão no intervalo entre as curvas teóricas com valores de A entre 100 e 1000. Para o caso ilustrado na Figura 4 aplicam-se os seguintes valores:

$$r = 15 \text{ cm}; \rho c = 4.175 \text{ kJ m}^{-3}\text{C}^{-1}; \text{ e } \lambda = 3 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$$

O valor $f(t)$ estaria no intervalo de 2 a 5 e portanto as velocidades estão na faixa de 2 a 8 m/h. Consequentemente, os fluxos correspondentes de água teriam valores no intervalo de 2 – 10m³/h, compatível com o fato da cachoeira ter origem no aquífero superior. Simulações numéricas com os demais poços indicaram valores de fluxo na mesma faixa de 2 – 10m³/h. É provável que existam diferenças nos fluxos dos poços perfilados, mas as limitações e precisão dos dados experimentais não permitem determinação de vazão com maior exatidão.

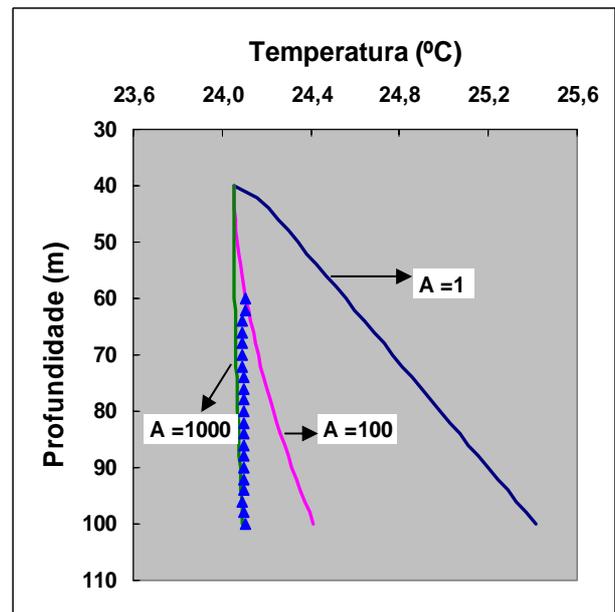


Figura 4. Ajuste do modelo de fluxo intrapoco e determinação da magnitude do fluxo de água no poço Santa Ana. Os triângulos são os dados de perfuração térmica.

Segmento Inferior e Idade dos eventos sísmicos

A distribuição de temperaturas no segmento inferior (ZGA) indica que os valores dos gradientes térmicos diminuem com a profundidade. Ainda, os formatos dos perfis térmicos indicam tendências de aproximação para valores das temperaturas não perturbadas em profundidades maiores. No presente contexto, há apenas dois mecanismos capazes de gerar as curvaturas observadas no segmento inferior (ZGA) dos perfis térmicos:

- 1- Transporte advectivo de calor associado ao fluxo ascendente de águas provenientes das camadas inferiores; e
- 2- Regime térmico transiente resultante do processo de esfriamento induzido pelo fluxo de águas no segmento superior (ZTC).

Desses, o primeiro mecanismo é considerado improvável pois a extrapolação para cima (com base no valor observada no topo da ZGA e do gradiente térmico) levaria a uma temperatura da superfície muito abaixo do valor típico da região noroeste do Estado de

São Paulo. Limitamos por tanto a discussão para o segundo mecanismo que é de esfriamento condutivo do topo da ZGA.

A distribuição de temperaturas no segmento inferior (ZGA) permite estimativas da idade de esfriamento induzido pelo fluxo lateral de água fria na base do segmento intermediário (ZTC). Uma formulação quantitativa deste processo pode ser efetuada com base na solução da equação de condução de calor com condições de contornos apropriadas. Supondo que o fluxo de calor é somente na direção vertical a equação diferencial que rege a evolução de temperatura (T) com tempo (t) na profundidade (z) é:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 0 < z < \infty \quad (4)$$

onde (ρc) é a capacidade calorífica e λ a condutividade térmica. A equação (3) representa balanço de energia térmica no processo de esfriamento. Impondo a condição de que a temperatura da água descendente é T_0 e temperatura inicial (isto é: não perturbada) do topo da ZGA é T_i a solução da equação (4) é (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$\frac{T - T_0}{T_i - T_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{4 \kappa t}} \right) \quad (5)$$

Na equação (5) t representa o tempo decorrido após o início de episódio de esfriamento, κ a difusividade térmica do meio ($\kappa = \lambda/(\rho c)$) e erf a função erro. Assim, é possível gerar curvas teóricas para diversos valores de t e comparar com as temperaturas observadas. A curva que fornece melhor ajuste permite a determinação do período de esfriamento. Um exemplo deste procedimento é ilustrado na Figura 5 para os dados de perfilagem térmica do poço Serra-2. Neste caso, os dados observados (triângulos na figura) estão no intervalo entre as curvas teóricas com valores de 0,8 e 1,2 anos para o parâmetro t . Essa estimativa do período de esfriamento é da mesma ordem de grandeza do tempo decorrido após a abertura do poço.

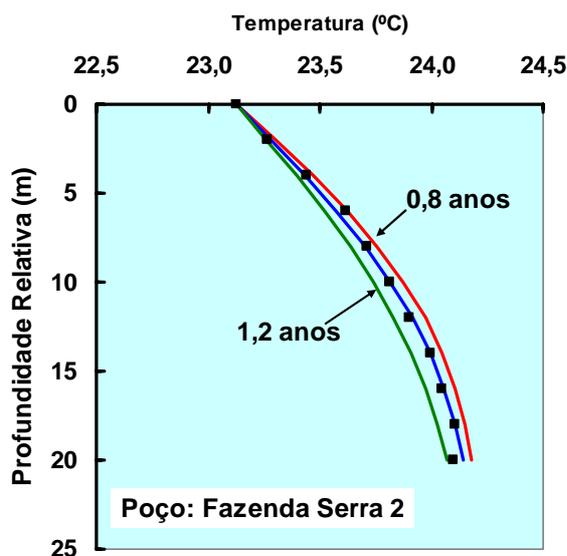


Figura 5. Exemplo do procedimento para determinação do período de esfriamento ocorrido no segmento inferior do poço Fazenda Serra-2.

A Tabela 2 apresenta os períodos de esfriamento calculado com base no procedimento acima descrito para os demais poços.

Tabela 2. Estimativas mínimas (t_{MIN}) e máximas (t_{MAX}) dos períodos de esfriamentos. T é a magnitude de esfriamento.

Poço	T (°C)	Tempo de Esfriamento (anos)		
		t_{MIN}	t_{MAX}	Melhor Ajuste
Santa Cruz - 1	1,4	0,8	1,2	1,0
Santa Cruz - 2	1,6	0,4	1,0	0,7
Serra - 1	1,4	0,8	1,2	1,0
Serra - 2	1,1	0,8	1,2	1,0
Santa Ana	1,4	6	10	14

Perfilagem Gama e Imagens Acústicas (BHTV)

Para complementar as informações dos métodos geotérmicos no poço da Fazenda Santa Ana também foram realizadas neste poço perfilagem gama e perfil acústico. Este trabalho foi realizado por técnicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.

A perfilagem gama registra a intensidade de radiação gama natural no interior do poço e é utilizada geralmente para localizar e correlacionar suas formações geológicas. Considerando que cada tipo de rocha apresenta um valor médio típico de radiação é possível localizar ou correlacionar diferentes formações ou material alterado dentro de uma mesma formação.

A perfilagem conhecida como BHTV (Borehole Televiwer), utiliza um sistema sonar que permite uma visão ponto a ponto bi-dimensional do seu interior. O BHTV fornece imagens de alta resolução das paredes do furo e é, portanto, considerado um dos métodos mais efetivos de detecção de fraturas em furos (Martinez et al.).

Os resultados dessas perfilagens permitiram também a verificação das variações no diâmetro interno do poço Santa Ana pelo perfil Caliper e o estado físico das suas paredes. O BHTV mostrou uma zona de basalto bastante alterado entre 120 e 130 m, coincidente com o limite entre a ZTC e a ZGA. Este intervalo de profundidades é interpretado como uma camada interderrame constituindo o aquífero fraturado.

Discussão e Conclusão

As perfilagens térmicas mostraram que os poços no distrito de Andes estão agindo como sifões naturais, transferindo água das camadas de solo e arenito para fraturas em profundidades maiores.

Apesar dos gradientes térmicos nas ZTC indicarem valores baixos, menores do que 5°C/km, cálculos preliminares mostram que o fluxo descendente de água dentro dos poços é relativamente baixo, compatível com as vazões máximas do aquífero superior. A grande vazão potencial destes poços profundos deve-se, naturalmente, ao aquífero mais profundo das fraturas do basalto.

As simulações computacionais indicam que os formatos dos perfis térmicos da ZGA apresentam semelhanças notáveis com as curvas de esfriamento condutivo progressivo. Isto permite concluir que as variações de temperatura na zona ZGA são resultantes do esfriamento ocorrido na base da camada ZTC, desde a abertura dos poços. Portanto, mesmo valores anômalos de gradiente térmico como o de 190°C/km,

são devidos ao resfriamento transiente da rocha provocado pela descida de água fria nas camadas acima da ZGA .

Importantes inferências sobre as seqüências litológicas encontradas no poço Santa Ana, com base nos perfis gama e BHTV, foram correlacionadas com as observações térmicas. Por exemplo, prováveis entradas e saídas de água dos poços, apontadas pelas medidas de temperatura, ocorrem onde as outras perfilagens indicam zonas de basalto alterado ou fraturado.

Como todos os seis poços perfilados mostraram movimento descendente de água, é de se supor que esta seja uma característica geral de todos os poços profundos no distrito de Andes, inclusive dos poços P07 e P10 (Fazenda Aparecida, Fig. 1b) que têm vazões muito elevadas.

Quando esses poços não estão sendo bombeados, água é transportada das camadas superiores de arenito para o aquífero fraturado do basalto. Nestas condições, o nível estático do poço é maior do que ele teria sem a contribuição da água do aquífero superior. É possível que esta pressão adicional seja transmitida através do aquífero fraturado por várias centenas de metros até atingir pequenas falhas, previamente sujeitas a grandes esforços, facilitando deslocamentos sísmicos. Assim, a pressão adicional da água do arenito pode estar provocando os tremores.

Agradecimentos

Agradecemos à Prefeitura Municipal de Bebedouro pelo apoio aos trabalhos de campo, ao DAEE de São Paulo e Araraquara pela colaboração e acesso ao arquivo de dados, ao Prof. Ricardo Hirata (IGc/USP) e Dra. Amélia João Fernandes (IG/SMA) pelas profícuas discussões, aos proprietários dos sítios onde as perfilagens térmicas foram realizadas, à população em geral do Distrito de Andes. Especial agradecimento aos proprietários do Sítio Santo Antonio, José e Didier Cagnin, pelo apoio fundamental aos trabalhos de campo. Os levantamentos geotérmicos foram custeados pelo Observatório Nacional – ON/MCT.

Referências

Assumpção, M. & Yamabe, T.H. 2005. Atividade Sísmica no Distrito de Andes, Bebedouro, e a Possível Relação com Perfuração de Poços Tubulares. (relatório não publicado www.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro)

Berrocal et al., 1984. Sísmicidade do Brasil. Editor: IAG/USP - CNEN, 320pp.

Carlsaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959. Conduction of heat in Solids. Clarendon Press, Oxford.

Feitosa, F.A.C. & Manoel F°, J. (Coords.), 2000. Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. 2ª ed., CPRM/REFO, LABHID-UFPE, Fortaleza, Brasil.

Hamza, V.M., 1978, Geothermal investigations in a well which provoked seismic activity (Abstract). *Fifth Annual Meeting of the Canadian Geophysical Union*, London (Ontario), p.15.

Hamza, V.M., 1982, Pesquisas de medições de temperatura subsuperficial: Importância para a hidrogeologia. *Revista de Águas Subterrâneas*, 5, 65-99.

Hamza, V.M., 2000, Thermal Signatures of Tectonic Fluid Flows. *Bulletin Seismological Association of Far East*, 4(1), 4-31.

Hamza, V.M., 2001, Tectonic leakage of fault bounded aquifers subject to non-isothermal recharge: A mechanism generating thermal precursors to seismic events. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126, 163-177.

Hamza, V.M., Eston, S.M. & Araújo, R.L.C., 1979, Geothermal energy prospects in Brazil: A preliminary analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 117(1/2), 180-195.

Hurter, S. & Pollack, H., 1996. Terrestrial heat flow in the Paraná Basin, SE Brazil. *J. Geophysical Res.*, 101 (84), 8659-8671.

Martinez, L.P.; Hughe, R.G. & Wiggins, M.L. Identification and Characterization of Naturally Fractured Reservoirs using Conventional Well Logs. <http://coecs.ou.edu/Richard.G.Hughes/Papers/NFR-008.pdf>

Ramey, H.J., 1962. Well bore heat transmission. *J. Petroleum Technology*, 14, 427-35.

Santos, J., Hamza, V.M. & Shen, P.Y., 1986, A method for determining terrestrial heat flow density in water wells. *Rev. Bras. Geofísica*, 4, 45-53.

Yamabe, T.H., 1999. Estudos geofísicos para explicar a sísmicidade induzida e orientar a exploração de água subterrânea em Nuporanga-SP. *Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, São Paulo.*

Yamabe, T.H. & Hamza, V.M., 1996. Geothermal Investigation in an area of induced seismic activity, Northern São Paulo State, Brazil. *Tectonophysics*, 253, 209-225.

