

**Estudos Geotérmicos em Bebedouro:
Implicações para Ocorrência das Atividades Sísmicas**

**Relatório informativo das perfilagens geofísicas
realizadas em setembro/2005**

**Marcelo Assumpção – IAG/USP – São Paulo
Tereza Higashi Yamabe – FCT/UNESP – Presidente Prudente
Valiya Hamza – Observatório Nacional – Rio de Janeiro**

São Paulo, 14 de dezembro de 2006.

Índice Geral

Resumo	3
1- Introdução	3
2- Contexto Hidrogeológico	4
3. Características dos Poços Tubulares no Distrito de Andes	5
4. Princípio do Método Geotérmico	8
5. Metodologia Experimental	9
6. Resultados das Perfilagens Térmicas	10
7. Perfilagens Gama e Imagens Acústicas (BHTV)	13
8. Conclusões	14
9. Agradecimentos	16
10. Bibliografia	16
Anexo 1 - Resultados das perfilagens térmicas em poços tubulares de Andes/Bebedouro	17

Resumo

Perfis de temperatura foram obtidos em cinco poços do Distrito de Andes (Bebedouro) e um em Monte Azul Paulista, para estudo da movimentação de água dentro dos poços. Estas perfilagens foram motivadas pelos indícios de correlação entre a atividade sísmica de Andes e a abertura recente de poços profundos. Em todos os seis poços foi observada movimentação descendente de água dentro do poço a partir de 30-40m até 120-170 m de profundidade. Esta água proveniente do aquífero livre (sedimento da Formação Adamantina) desce pelo poço até, provavelmente, o aquífero fissural na camada de basalto. Desta maneira, constatou-se que a abertura de novos poços na região faz com que o aquífero superficial do arenito seja uma recarga local para o aquífero fraturado do basalto, quando os poços não estão sendo bombeados.

1. Introdução

As ocorrências de tremores de terra no Distrito de Andes, Bebedouro (SP), têm sido alvo de estudos sismológicos sistemáticos desde março de 2005 (Assumpção & Yamabe, 2005). As investigações complementares com métodos geotérmicos foram feitas em setembro de 2005 ao se constatar indícios de uma correlação entre perfuração de poços tubulares profundos e a ocorrência de atividade sísmica. A escolha do método geotérmico se deve à facilidade de identificar as movimentações de água subterrânea através de medições simples de temperatura dentro do poço. Desta forma, o enfoque principal desta investigação foi a identificação dos sinais térmicos dos movimentos de água subterrânea, com base nas perfilagens térmicas de poços tubulares.

Apresentamos neste relatório breve descrição do contexto geológico da região de Bebedouro, das características dos poços tubulares recentes no distrito de Andes, o princípio básico e a técnica experimental do método geotérmico e análise dos resultados, junto com as conclusões principais. Os detalhes dos dados levantados e dos perfis térmicos são apresentados em Anexo a este relatório.

2. 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 rochas vulcânicas (derrames de basalto).

O basalto é caracterizado por valores muito baixos de porosidade e de permeabilidade. Nesse meio a água encontra-se em espaços representados por fissuras, fraturas, juntas ou falhas. Conseqüentemente, no aquífero fissural, como é conhecido, a porosidade é função das fissuras, que não se distribuem homogêneamente pelo aquífero. Assim, de acordo com Feitosa e Manoel F^o (2000), em um mesmo maciço há zonas de porosidade nula 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, ou seja, ocorre grande variabilidade. 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 sua amplitude, 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 para a maioria deles e 150-190m³/h (P10 e P7) (ver Fig. 1b), mostram a grande variação existente das características do aquífero de fissuras do basalto.

A camada logo abaixo da Formação Serra Geral, constituída de arenitos eólicos da Formação Botucatu, possui porosidade e permeabilidade relativamente elevadas e é 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 do arenito e do basalto é de caráter genérico, sendo que podem ocorrer 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 inferior da formação Serra Geral. Denominados arenitos inter-trapes, que ocorrem entre os derrames de basalto, esses corpos podem atuar como aquíferos locais de pequeno porte.

Alguns poços apresentam condições favoráveis para movimentos descendentes de água, ou de recarga vertical. Nessas condições, as perfurações que atravessam as camadas confinantes, poderão atuar como condutos de infiltração das águas superficiais para os aquíferos mais profundos, ou propiciar também a infiltração de água em fratura ou fendas do basalto. Este processo torna-se significativo quando os poços não são revestidos.

Os casos de sismicidade induzida por poços tubulares em Nuporanga (Yamabe & Hamza, 1996) e Presidente Prudente (Yamabe, 1999) estão relacionados com camadas de arenito entre derrames de basalto. Em ambos os casos a infiltração de água dos poços em fraturas ou fendas do basalto, a partir das camadas intertraps, propiciada pela perfuração dos poços, parece ter sido a origem dos sismos.

3. Características dos Poços Tubulares no Município de 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, constituída principalmente de arenitos argilosos. No entanto, nos últimos anos iniciou-se uma nova fase de perfurações mais profundas, principalmente para fins de citricultura regional. As novas perfurações extraem água subterrânea de aquíferos fissurais do basalto localizados, geralmente, em camadas/fraturas interderrames.

Neste relatório apresentam-se os resultados das perfilagens térmicas realizadas em seis poços perfurados no basalto. Desses, dois se encontram na Fazenda Santa Cruz, dois na Fazenda Serra e um na Fazenda Santa Ana. As perfurações de quatro desses poços foram concluídas no segundo semestre de 2004, mas não havia sido instalado neles o equipamento de bombeamento, o que permitiu a realização das operações de perfilagens térmicas. No poço da Fazenda Santa Ana, cuja perfuração no basalto se deu em maio de 2004, o proprietário retirou a bomba especificamente para as medições. Também foram medidas as temperaturas em um poço da Fazenda Retiro, no município vizinho de Monte Azul Paulista. A localização desses poços é indicada nos mapas da Figura 1.

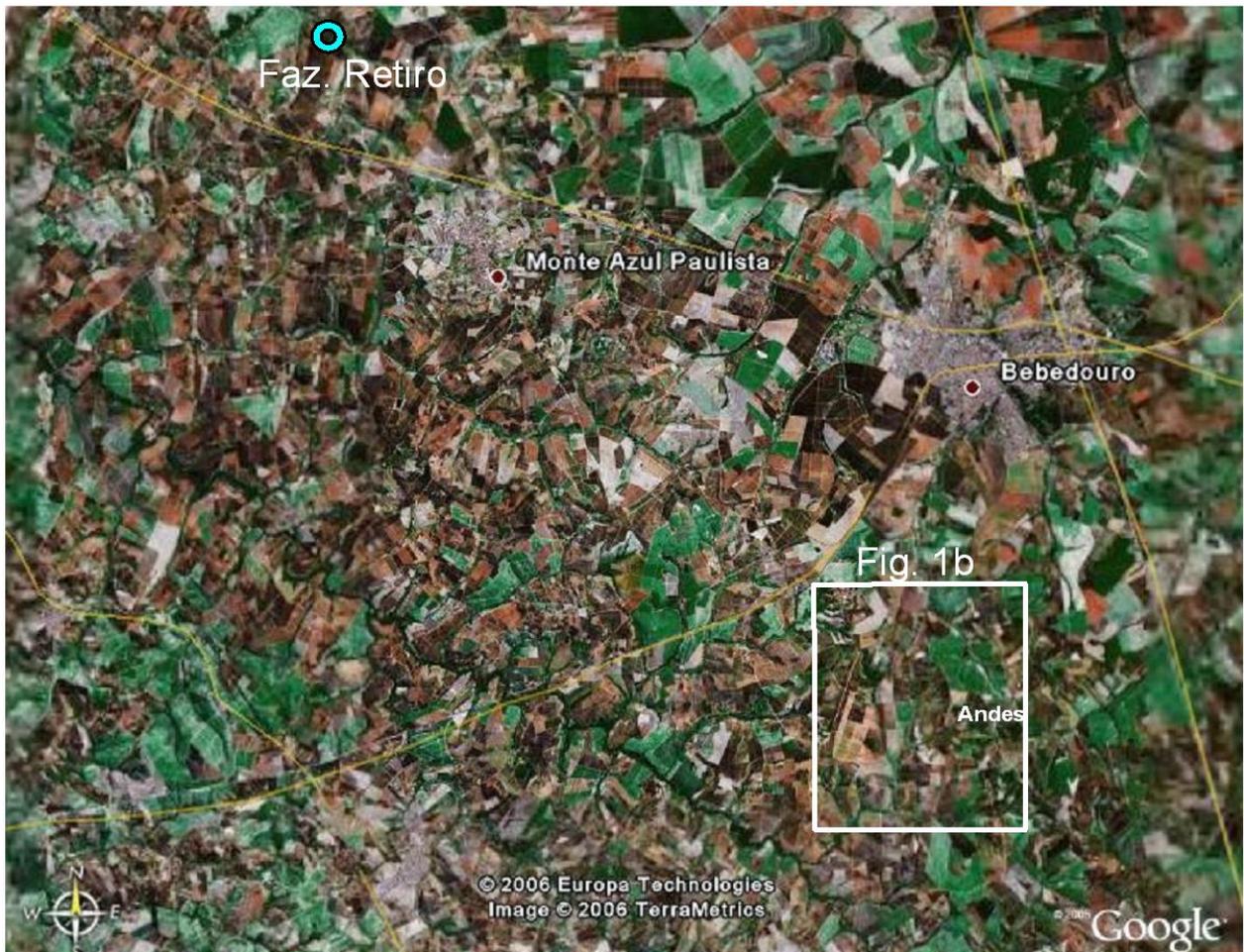
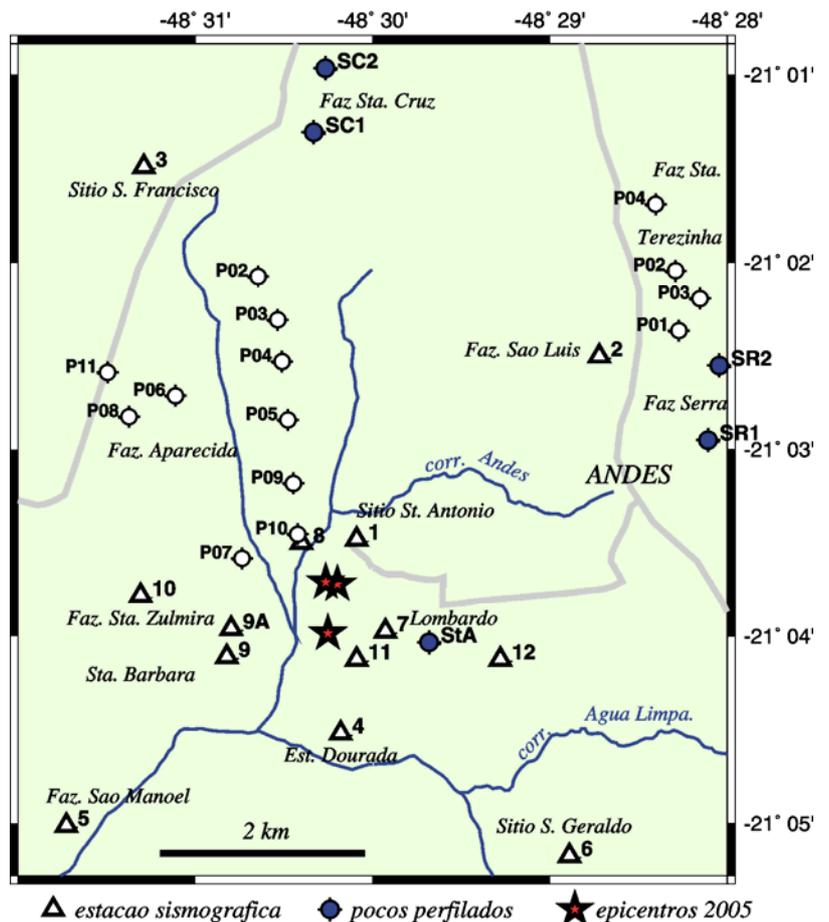


Figura 1. a) Faz. Retiro (Monte Azul) e Andes (Bebedouro).

b) Localização dos poços de Andes que perfuraram a camada de basalto (círculo).

Nos poços em azul foram corridas perfilagens térmicas.

As estrelas são os três maiores sismos até maio de 2006, e triângulos são estações sismográficas.



Levantamentos complementares realizados incluem informações sobre as coordenadas geográficas, altitude, níveis estáticos e dinâmicos de águas, vazão e seqüências litológicas desses poços. As coordenadas geográficas e as altitudes foram determinadas utilizando instrumentos portáteis do sistema de posicionamento global (GPS), e têm precisão de 10m. Os dados sobre os níveis estáticos e dinâmicos das águas nos poços e as informações sobre as seqüências litológicas encontradas nas perfurações foram obtidos junto ao setor de hidrogeologia do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo. Um resumo dos dados coletados é apresentado nas Tabelas 1 e 2.

De acordo com as informações disponíveis a maioria dos poços da região é revestida apenas nas suas partes superiores, com tubulação de comprimento menor que 20 metros. A ausência de revestimentos em profundidades maiores permite ocorrência de fluxo de água no interior dos poços. Durante visitas realizadas, foi possível ouvir som de queda de água, em quatro dos seis poços acima citados. É a indicação de que a água de níveis rasos entra continuamente para dentro dos poços, formando verdadeiras “cachoeiras internas”. Concluiu-se que os poços no distrito de Andes estão agindo como sifões naturais, transferindo água das camadas de solo para fraturas ou falhas em profundidades maiores. Nota-se que a possibilidade de se ouvir o som de cachoeira no interior de poços tubulares ocorre somente em casos onde o nível estático do aquífero profundo está abaixo da camada portadora das águas superficiais.

Tabela 1. Localização dos poços perfilados.

Poço	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	Profundidade total (m)	Data da perfuração	Data e Hora Perfilagem
Santa Cruz - 1	21° 01' 18,3" S 48° 30' 19,9" W	612	160	Maio/2004	21.09.05 9:20h
Santa Cruz - 2	21° 00' 57,9" S 48° 30' 16,0" W	610	160 (154)	Maio/2004	21.09.05 11:00h
Serra - 1	21° 02' 57,0" S 48° 28' 06,5" W	621	154	25.10.04	21.09.05 16:20h
Serra - 2	21° 02' 33,02" S 48° 28' 02,7" W	650	148	27.10.04	21.09.05 18:00h
Santa Ana	21° 04' 02,1" S 48° 29' 42,1" W	563	60* (176,6)	>20 anos (17.05.04)	23.09.05 9:00h
Retiro	20° 50' 40,1" S 48° 41' 10,0" W	508	196	11.11.04	22.09.05 10:35h

* Poço originalmente com 60m, foi aprofundado para 176,6 m em 17.05.2004.

Tabela 2. Perfil litológico e intervalo de profundidades, segundo informações da Perfuradora. Números em () são as espessuras das camadas.

Litologia	Santa Cruz 1	Santa Cruz 2	Serra 1	Serra 2	Santa Ana	Retiro
Aluvião	0 – 34 (34)	0 – 53 (53)	0 - 16,5 (16,5)	-	0 - 20 (20)	0 - 14,5 (14,5)
Arenito/areia	-	-	16,5 – 40 (23,5)	0 - 28,5 (28,5)	-	14,5 – 28 (13,5)
Arenito	34 – 104 (70)	53 – 105 (52)	40 – 125 (85)	28,5 – 137 (108,5)	20 – 50 (30)	28 – 63 (35)
Basalto	104 – 160 (56)	105 – 160 (55)	125 – 154 (29)	137 – 148 (11)	50 – 170 (120)	63 – 196 (133)

4. Princípio do Método Geotérmico

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 que ocorrem na superfície, e aumentam linearmente com a profundidade devido ao fluxo de calor proveniente do interior da Terra (por exemplo, linha verde na Fig. 2). A taxa de variação da temperatura com a profundidade, conhecida como gradiente geotérmico, 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 (Hurter & Pollack, 1996), ou seja, a temperatura da rocha aumenta de 2° a 3°C a cada 100 metros de profundidade.

Contudo, os movimentos de água subterrânea através das camadas permeáveis ou do sistema de fraturas podem induzir modificações locais na distribuição de temperaturas determinada pelo gradiente geotérmico. 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.

A Figura 2 ilustra as distribuições de temperatura resultantes de movimentações ascendentes (linha vermelha) e descendentes (linha azul) de água nos poços tubulares. Assim, a linha verde indica a variação de temperatura na ausência de movimentação de água dentro do poço. Esta variação linear representa o gradiente térmico esperado na região. A seta azul, por exemplo, indica como seria o perfil de temperatura se água fria estivesse entrando no poço na profundidade de 30m e

percorrendo o seu interior até a profundidade de 80m. Fluxos descendentes desta natureza esfriam as paredes do poço. Conseqüentemente, formam-se zonas de temperaturas com valores abaixo daquelas determinadas pelo gradiente térmico local. A reta azul será mais vertical ou inclinada, dependendo tanto da quantidade quanto da velocidade da água que desce dentro do poço (Kappelmeyer & Haenel, 1974). Assim, fluxos maiores contribuem para formação de zonas onde as temperaturas são quase constantes denominadas aqui como ZTC (Zona de Temperatura Constante).

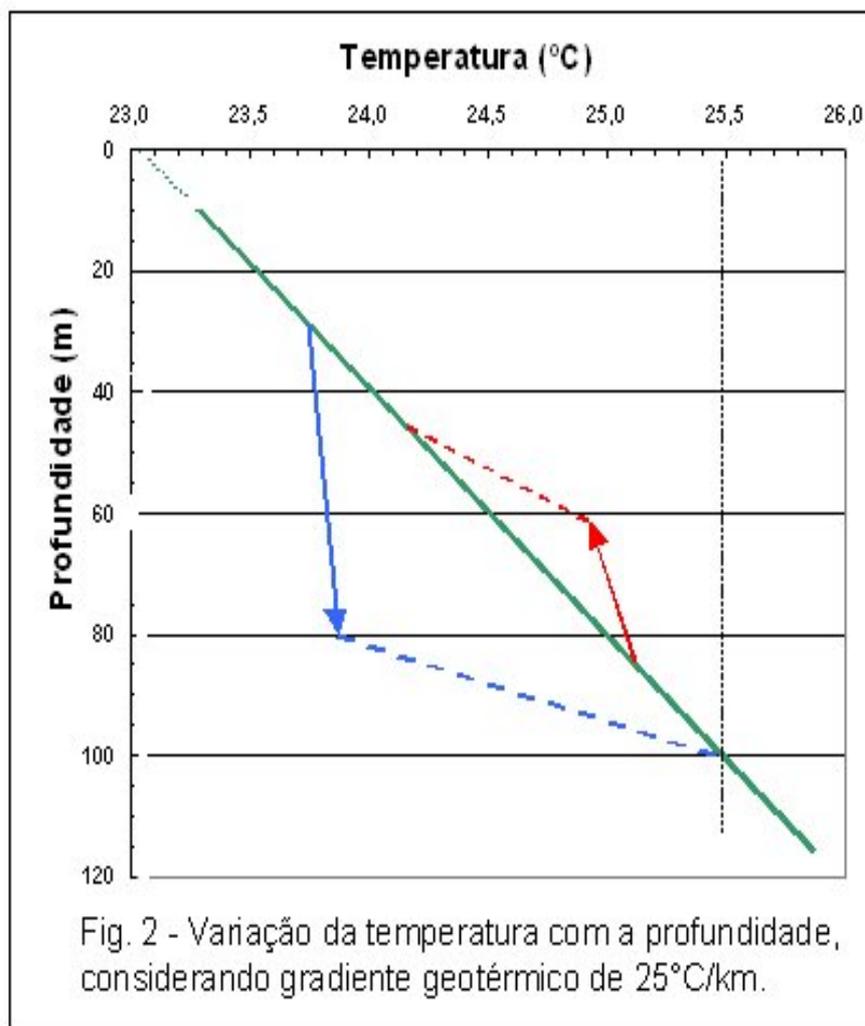
Na base da ZTC ocorre a fuga lateral da água. Ausência de fluxo de água, abaixo da ZTC, atenua o transporte advectivo de calor e, conseqüentemente, ocorre o retorno aos valores não perturbados de temperatura. Na Figura 2 este retorno é indicado pela linha azul pontilhada. Obviamente, o intervalo onde ocorre este retorno é caracterizado por gradientes térmicos elevados (ZGA ou Zona de Gradiente de temperatura Alto).

No caso de fluxo ascendente a situação é oposta: a água do poço estaria com temperaturas maiores do que o normal, já que a água proveniente de profundidades maiores tem temperaturas mais elevadas. Os gradientes térmicos elevados (linha vermelha tracejada na Figura 2) ocorrem acima da zona de movimentação de fluidos.

Os movimentos de água subterrânea também podem ocorrer nas próprias formações geológicas e as alterações nos perfis de temperaturas são semelhantes aos da Figura 2.

5. Metodologia Experimental

A metodologia experimental adotada nas medições de temperatura em poços tubulares é denominada de perfilagem térmica. Consiste em introduzir uma sonda térmica no interior do poço, conectada à extremidade de um cabo elétrico multi condutor. Um medidor conectado à outra extremidade do cabo permite leituras das temperaturas da sonda. O perfilador térmico utilizado nas medições em Andes possui uma precisão relativa de $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$. Isso permite identificação de pequenas variações de temperatura indicativas de entradas ou saídas de água no poço, através de fraturas, fendas ou de material alterado da rocha. As medições podem ser realizadas em quaisquer intervalos de profundidade. Convém notar que as operações de perfilagem térmica são viáveis somente em poços livres, ou seja, que não possuem tubulações ou bombas submersas instaladas.



6. Resultados das Perfilagens Térmicas

As perfilagens térmicas foram efetuadas no período de 21 a 23 de setembro de 2005. As medições foram efetuadas em intervalos de dois metros, durante as operações de descida da sonda térmica. As distribuições verticais de temperaturas estão ilustradas na Figura 3. No caso do poço Santa Ana foram efetuadas duas perfilagem térmicas, nos dias 22 e 23 de setembro de 2005. A concordância entre os resultados dessas duas perfilagens foi considerada como indicativa da confiabilidade da resposta do equipamento utilizado nos trabalhos de campo.

De modo geral, os perfis térmicos de todos os poços apresentam características semelhantes entre si. Os perfis parecem ser constituídos de três segmentos distintos, designados aqui como superior, intermediário e inferior. O segmento superior, desde a superfície até cerca de 40 metros de profundidade, sofre influência direta das variações de temperatura do ar na superfície. É consequência dos níveis estáticos baixos 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 130 metros, são caracterizados por variações relativamente pequenas de temperatura. Na maioria dos perfis as temperaturas destes segmentos são praticamente constantes, com gradientes térmicos inferiores a $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Conforme descrições apresentadas no item 2 deste relatório, as distribuições de temperatura desta natureza indicam fluxo descendente de água relativamente fria. Conclui-se, portanto, que ocorrem movimentos descendentes de água nesses intervalos. As zonas onde ocorrem fluxos desta natureza são designadas neste trabalho pela sigla ZTC.

Logo abaixo da ZTC (ou seja, do segmento intermediário) as temperaturas aumentam rapidamente com a profundidade. Esta zona de gradiente térmico alto é designada aqui pela sigla ZGA e as taxas de variação de temperatura estão no intervalo de 46 a $84^{\circ}\text{C}/\text{km}$. No poço da Fazenda Retiro este valor foi de $190^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Por outro lado, os valores dos gradientes térmicos diminuem com a profundidade e os formatos dos perfis térmicos indicam tendências de aproximação para valores das temperaturas não perturbadas em profundidades maiores. Ainda, os resultados de simulações computacionais utilizando dados de Bebedouro indicam que os formatos dos perfis térmicos desta zona apresentam semelhanças notáveis com as curvas de esfriamento condutivo progressivo. 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. Apresenta-se na Tabela 3 as diferentes zonas identificadas nos seis poços perfilados. A superior corresponde ao intervalo do poço sem água, acima da entrada de água da zona de cachoeira. Estão relacionados também os intervalos onde ocorrem as cachoeiras internas, bem como as camadas onde há movimento vertical 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. Maiores detalhes sobre a identificação das zonas ZTC e ZGA dos poços perfilados são apresentados no Anexo deste relatório.

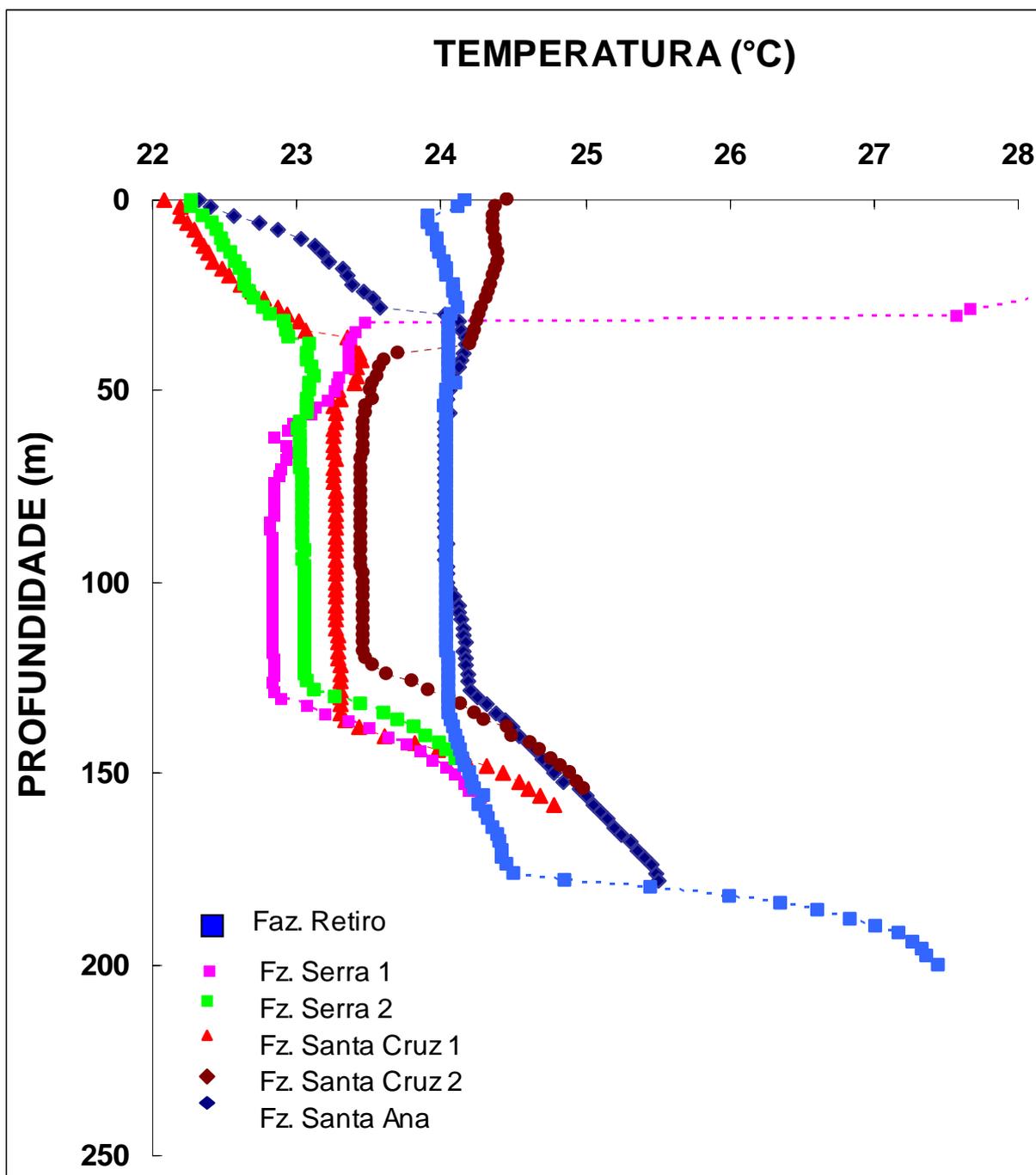


Figura 3. Perfilagens térmicas em poços de Andes e Monte Azul Paulista. Note que todos os poços apresentam uma zona de temperatura constante de 30-60m até 120-130m de profundidade, indicativa de movimentação descendente de água dentro do poço.

Tabela 3. Profundidades das zonas identificadas nos poços.

ZTC – Zona de Temperatura Constante, com movimento descendente de água; o nível estático é a base da cachoeira, ou topo da ZTC.

ZGA – Zona de Gradiente Alto, com pouca ou nenhuma movimentação de água.

Poço	Zona Superior (m)	Zona de Cachoeira (m)	ZTC (m)	ZGA (m)
Santa Cruz 1	0 - 36	36 - 50	50 – 134	136-160
Santa Cruz 2	0 – 40	40 - 52	52 – 120	122-154
Serra 1	0 – 32	32 –74	74 – 128	130-142
Serra 2	0 – 38	38 – 58	58 – 126	128-134
Santa Ana	0 – 38	38 – 58	58 – 128	128 -174
Retiro	0 - 28	--	30 – 174	174-192

7. Perfilagem Gama e Imagens Acústicas (BHTV)

Para complementar as informações dos métodos geotérmicos, no poço da Fazenda Santa Ana também foram realizadas perfilagem gama e perfil acústico que gera imagens. 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. Esta técnica é utilizada geralmente para localizar e correlacionar formações geológicas em poços. Nos sedimentos a perfilagem gama indica principalmente o conteúdo de folhelho (rocha sedimentar com tendência a dividir-se em folhas), pois os minerais contendo os elementos radioativos tendem a se concentrar em argilas. 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 (abreviação em língua inglesa para Borehole Televierer, ou “visor do furo”), utiliza um sistema sonar que permite uma visão ponto a ponto da parede interior do poço. 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.).

No presente caso, os resultados das perfilagens gama e de BHTV permitiram a verificação das variações no diâmetro interno do poço Santa Ana e o estado físico das suas paredes. As inferências sobre as seqüências litológicas encontradas no poço Santa Ana, com base nos perfis gama e BHTV, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. - Informações adicionais sobre as paredes do poço Santa Ana, obtidas a partir de perfis gama e imagens acústicas (BHTV) e correlação com os perfis térmicos

Profundidade (m)	Característica da seqüência litológica	Correlação com perfil térmico
57,2	Nível Estático	Topo da ZTC
84	Basalto alterado	
87 a 90	Basalto alterado	
88 a 91 93 a 94	Basalto alterado	Pequenas alterações na temperatura
102 a 107	Basalto alterado	Pequena saída de água
122 a 128,5	Basalto bastante alterado	Saída d'água do poço, na base deste intervalo (base da ZTC).
154 a 156	Fratura (?) (Perfil Gama)	Pequena entrada d'água
140,4 a 165	Basalto vesicular fraturado	

8. Conclusões

A análise dos dados dos estudos anteriores (Hamza, 1982; Yamabe & Hamza, 1996) e os resultados das perfilagens dos poços no presente trabalho permitem as seguintes conclusões:

- 1- Foi constatada a existência de cachoeiras internas em quatro dos seis poços perfilados;
- 2- Os perfis térmicos dos poços revelam feições atípicas, diferindo muito do comportamento padrão das distribuições verticais de temperaturas do campo térmico condutivo nas demais regiões do Estado de São Paulo;
- 3- As características dos perfis térmicos dos poços são indicativas de movimentação descendente de água nas zonas intermediárias dos seis poços, situadas geralmente de 50 a 130 metros;
- 4- As fugas laterais de água ocorrem geralmente na parte superior do basalto, situada nas profundidades de 120 a 174 metros;
- 5- Simulações computacionais indicam que os formatos dos perfis térmicos na parte inferior dos poços (ZGA) são características de esfriamento condutivo da

base da zona de movimentação de água. Os períodos de esfriamento das partes inferiores dos poços são compatíveis com o tempo decorrido após a perfuração.

- 6- Todas as perfilagens térmicas com ZTC e ZGA são características de poços que exploram aquíferos de fraturas no basalto.

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

Apesar dos gradientes térmicos nas ZTC indicarem valores baixos, menores do que $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, cálculos preliminares mostram que o fluxo descendente de água dentro dos poços é relativamente baixo, compatível com a vazão do aquífero do arenito. A grande vazão potencial destes poços é devida, portanto, 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 camada ZTC, desde a abertura dos poços. Portanto, mesmo valores anômalos de gradiente térmico como o de $190^{\circ}\text{C}/\text{km}$, são devidos ao resfriamento transiente da rocha provocado pela movimentação 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.

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.

9. 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 das fazendas onde as perfilagens térmicas foram realizadas e, em especial ao Sr. Waldir Turco que retirou a bomba hidráulica do poço especialmente para nossas medições. Agradecemos também à população do Distrito de Andes, e especialmente ao Sr. José e Dna. Didier Cagnin, do Sítio Santo Antonio, pelo apoio fundamental aos trabalhos de campo. As perfilagens gama e BHTV foram feitas pelo geólogo Carlos Birelli, IPT-SP por colaboração com o IAG-USP.

10. Bibliografia

Assumpção, M. & Yamabe, T.H., *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). 2005.

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

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

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

Kappelmeyer, O. & Haenel, R., *Geothermics with special reference to application*. *Geoexploration Monographs, Series 1 – n. 4*. 1974.

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>

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

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

Anexo ao Relatório sobre os Estudos Geotérmicos em Bebedouro: Resultados das perfilagens térmicas em poços tubulares.

A.1 Fazenda Santa Cruz

Nesta fazenda (proprietária Patrícia Matarazzo) as perfilagens térmicas foram efetuadas em dois poços designados aqui como *Santa Cruz 1 (Sede)* e *Santa Cruz 2 (Divisa)*. Ambos se encontram na cota de 610 a 612 metros.

Poço Santa Cruz 1 (Sede): Este poço foi perfurado em maio de 2004. O diâmetro da parte superior é de 12,5 polegadas, que é reduzido para oito polegadas na profundidade de 34 metros. A seqüência litológica encontrada é constituída de aluvião (0-34m), arenito (34-104m) e basalto (104-160m). Estes e outros dados referentes ao poço Santa Cruz 1 estão resumidos na Tabela A1. As características de som proveniente da tubulação deste poço apontam para a existência de uma queda de água (cachoeira) no seu interior. Considerando que o poço não estava sendo bombeado, a existência de cachoeira contínua indica que há perda de água do poço para as rochas circunvizinhas.

O perfil térmico neste poço alcançou a profundidade de 160 metros (figura A1). Os resultados indicam características anormais de mudanças nas temperaturas em profundidades de 36m e 50m. No intervalo entre 50m e 134m, a variação de temperatura é pequena, com o gradiente térmico de apenas 0,4°C/km, confirmando a existência de movimento descendente de água dentro do poço, neste intervalo.

Entre 136 e 146m as temperaturas aumentam rapidamente, com os gradientes térmicos acima dos valores normais (isto é: >30°C/km). No intervalo de 146 a 160 metros há uma queda contínua nos valores de gradientes térmicos, de 84°C/km na parte superior para 24°C/km na parte inferior deste intervalo. Esta curvatura do perfil térmico, tendendo a temperaturas não perturbadas em profundidades maiores que 160 metros, indica uma zona de aquecimento condutivo.

Essas características do perfil térmico permitem as seguintes inferências ilustradas na Fig. A1, onde a linha tracejada, em vermelho, mostra como seriam as temperaturas considerando um gradiente geotérmico normal de 25°C/km, onde não há movimentação de água dentro ou fora do poço.

A entrada de água, ou seja, a fonte da cachoeira se encontra aos 36 metros de profundidade. Isso implica que a água da cachoeira é proveniente da camada superior de solo/aluvião, próximo ao limite aluvião/arenito (34m). O intervalo da queda d'água é,

portanto, de 14 metros, considerando que o nível da água encontra-se aos 50m. Na base da zona de temperatura constante, aos 134-136m, deve ocorrer a saída de água do poço. É possível também que, entre 112 e 114m, haja uma pequena saída de água diminuindo o fluxo de água descendente abaixo de 114m, o que causaria um pequeno aumento do gradiente de temperatura de 0,4°C/km para 1,25°C/km entre 114m e 134m.

Tabela A1. Poço Santa Cruz 1 (Sede) – Perfuradora Hidromap.

Diâmetro (intervalo)	Coordenadas Geográficas	Perfil Litológico (Hidromap)	Dados da Perfuração	Data e hora da Perfilagem Térmica
12,5" (0 – 34m)	Latitude: 21° 01' 18,3" S	Aluvião 0 – 34m	Maio de 2004	21.09.2005
8" (34 - 160m)	Longitude 48° 30'19,9" W Elevação do terreno: 612m	Arenito 34 – 104m Basalto 104 – 160m	Vazão : 47m ³ /h NE: 47m ND: 97m	9:20h Tempo Bom Temperatura do ar: 22°C

Poço Santa Cruz 2 (Divisa): Este poço foi perfurado em 2004. O diâmetro da parte superior é de 12,5 polegadas, reduzido para oito polegadas na profundidade de 53m. A seqüência litológica é constituída de aluvião (0-53m), arenito (53-105m) e basalto (105-160m), segundo informações do perfurador (Tabela A2). Não foi possível ouvir o som de cachoeira no interior deste poço, mas como pôde se constatar pelas medidas de temperatura, neste poço também há movimento vertical de água.

A distribuição de temperaturas e o esquema de circulação de água no interior deste poço estão ilustrados na Fig. (A2). Na parte superior do poço o perfil térmico é caracterizado por uma mudança significativa de temperatura (0,5°C) na profundidade de 38-40 metros, indicando a mudança entre ar e água, e uma pequena perturbação na profundidade de 54 metros. Deduz-se que o nível da água se encontra provavelmente nesta profundidade de 54m. Entre 54m e 120m, a variação de temperatura é pequena, com o gradiente térmico de apenas 0,2°C/km, resultante de movimento descendente de água dentro do poço. Entre 120 e 154m de profundidade as temperaturas aumentam rapidamente, sendo que o gradiente térmico de 46°C/km neste intervalo de profundidade está acima dos valores normais (25°C/km indicado pela linha vermelha pontilhada).

A entrada de água se encontra aos 40m, ou seja, a água é proveniente da camada superior de aluvião. Considerando que não se ouve som de queda d'água, mas ocorre movimento descendente de água no intervalo de 40 a 120metros, depreendido das características do perfil térmico, é possível que o nível da água esteja aos 40m ou a água desce silenciosamente pelas paredes do poço. A saída de água do poço deve estar na base da zona de temperatura constante, na profundidade de 120 metros.

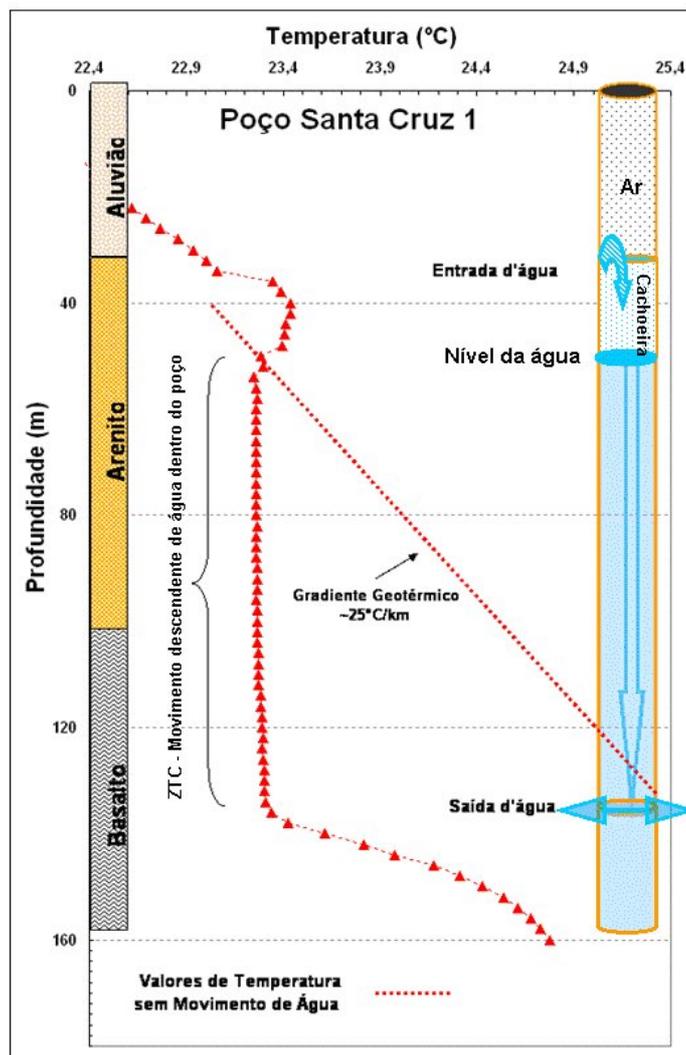


Figura A1. Perfil térmico e esquema inferido de circulação de águas no poço Santa Cruz 1.

Tabela A2. Poço Santa Cruz 2 (Divisa) – Perfuradora Hidromap.

Diâmetro (intervalo)	Coordenadas Geográficas	Perfil Litológico	Dados da Perfuração	Data e hora da Perfilagem Térmica
12,5" (0 – 53 m)	Latitude: 21° 00' 57,9" S	Aluvião 0 – 53 m	Maio de 2004	21.09.2005
8" (53 - 160m)	Longitude 48° 30'16,0" W	Arenito 53 – 105m	Vazão : 54m ³ /h	11:00h
	Elevação do terreno: 610 m	Basalto 105 – 160m	NE: 40m ND: 70m	Tempo Bom Temperatura do ar: 24,5°C

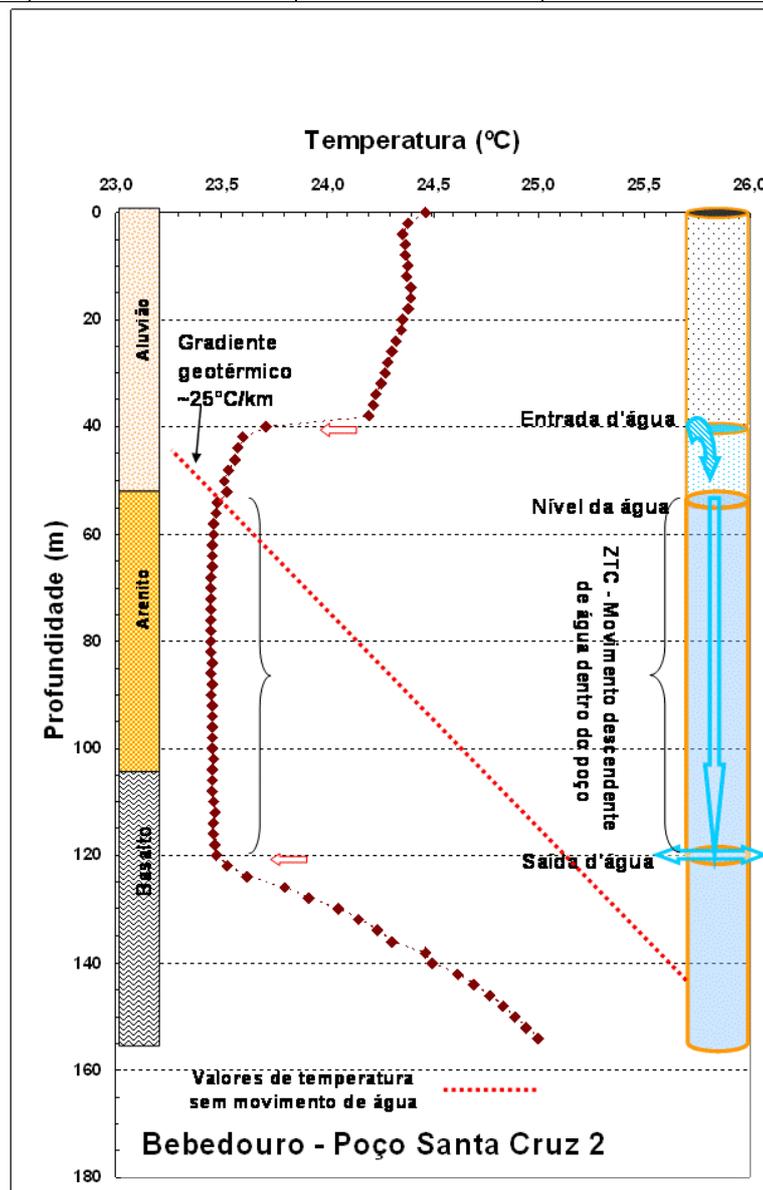


Figura A2. Perfil térmico e esquema inferido de circulação de águas no poço Santa Cruz-2.

A.2 Fazenda Serra

Nesta fazenda (proprietários Guilherme e Cláudio Novaes Fonseca) as perfilagens térmicas foram efetuadas em dois poços, designados aqui como *Serra 1* e *Serra 2*. Eles se encontram nas cotas de 621m e 650m, respectivamente.

Poço Serra 1: Este poço foi perfurado em 2004. O diâmetro da parte superior do poço é de 12,5 polegadas, que é reduzido para oito polegadas na profundidade de 124m. A seqüência litológica (Tabela A2) é constituída de sedimentos (0-16,5m), arenito/areia (16,5-40m), arenito (40-125m) e basalto (125-154m). As características de som proveniente da tubulação deste poço apontam para a existência de uma forte queda de água (cachoeira) no seu interior.

O esquema de circulação de águas no interior deste poço foi inferido com base na distribuição de temperaturas, que estão ilustrados na Fig. (A3).

Na parte superior o perfil térmico é caracterizado por uma mudança significativa de temperatura, passando de 31,15°C na superfície para 27,56°C aos 30m (pontos fora do gráfico da Fig. A3) e caindo para 23,46°C em 32m. Deduz-se pela natureza desta variação (com magnitude de cerca de quatro graus centígrados) que a entrada da água da cachoeira se encontra nesta profundidade de 32m. O som forte de cachoeira se deve à queda da água, entre as profundidades 32 e 74m, onde se encontra o nível da água.

Tabela A3. Poço Serra 1 – Perfuradora Hidromap.

Diâmetro (intervalo)	Coordenadas Geográficas	Perfil Litológico (Sr. Cláudio)	Data da Perfuração	Data e hora da Perfilagem Térmica
12,5" (0 – 125 m)	Latitude: 21° 02' 57,0" S	Sedimento 0 – 16,5 m	25.10.2004	21.09.2005
8" (125 – 154m)	Longitude 48° 28' 06,5" W Elevação do terreno: 621 m	Arenito/Areia 16,5 – 40m Arenito 40 – 125m Basalto 125 – 154m	Vazão estimada: ##	16:20h Tempo Bom Temperatura do ar: 31°C

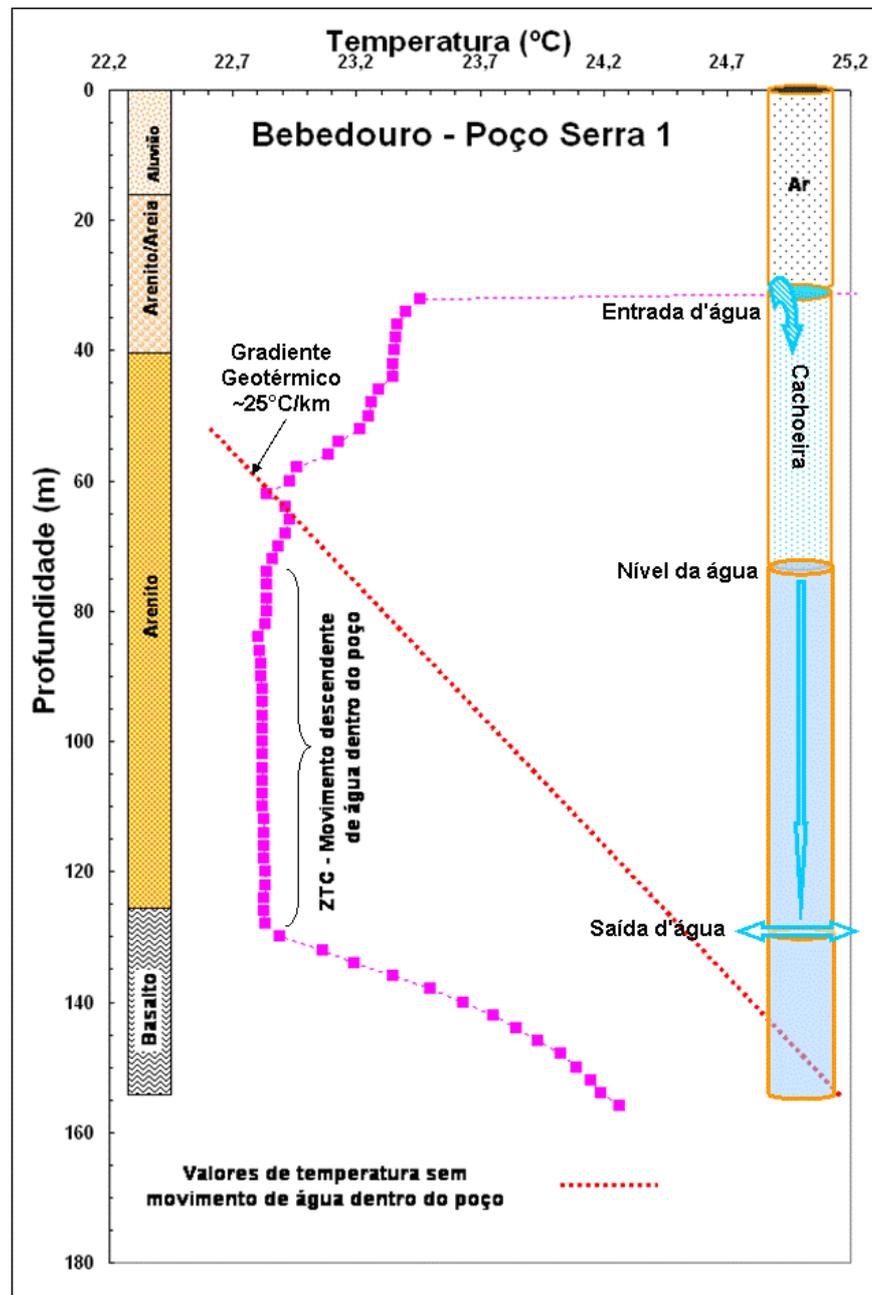


Figura A3. Perfil térmico e esquema inferido de circulação de águas no poço Serra - 1.

No intervalo de 74m a 128m, a variação de temperatura é muito pequena, com gradiente de apenas 0,2°C/km, ou seja, neste poço também há movimento descendente de água neste intervalo. Entre 130 e 156m de profundidade as temperaturas aumentam rapidamente, com gradientes térmicos muito acima dos valores normais.

Na base da zona de temperatura constante em 128m, deve ocorrer saída de água do poço, através de uma possível fratura no basalto ou no limite arenito/basalto (125m). Considerando o alto valor do gradiente de temperatura, abaixo dos 130m, de cerca de 72°C/km entre 130 e 142m, e a curvatura abaixo dos 148m, pode-se inferir que a água, abaixo dos 130m, está recuperando o gradiente térmico Inatural da região.

Poço Serra 2: Ouve-se forte som de queda d'água. Observa-se que entre 58m e 126m a temperatura é quase constante, com gradiente térmico de 0,9°C/km indicando movimento descendente de água dentro do poço (Fig. A4). Aparentemente a entrada de água ou a fonte da cachoeira se encontra aos 38 metros de profundidade, ou seja, a água é proveniente da camada de arenito. A queda d'água é de 20 metros, pois o nível da água encontra-se aos 58m de profundidade.

A zona de temperatura constante, indicativa de movimento descendente de água dentro do poço, localiza-se entre 58 e 126m. Na base dessa camada, entre 126 e 128m, deve ocorrer a saída de água do poço, possivelmente na interface arenito-basalto. Entre 128 e 134m o gradiente de temperatura é de ~81°C/km, indicando que a rocha, abaixo dos 128m, está recuperando a temperatura natural. Considerando gradiente térmico regional médio de 25°C/km e levando-se em conta a temperatura no topo da coluna d'água aos 58m, a temperatura provável aos 140 m de profundidade seria de ~25,0°C, 1° a mais do que a temperatura medida nessa profundidade, o que indica que nesta profundidade ainda predomina a influência da água fria descendente na zona de temperatura constante.

Tabela A4. Poço Serra 2 – Perfuradora Hidromap.

Diâmetro (intervalo)	Coordenadas Geográficas	Perfil Litológico (Sr. Cláudio)	Data da Perfuração	Data e hora da Perfilagem Térmica
12,5" (0 – 137m)	Latitude: 21° 02' 33,02" S	Arenito/Areia 0 – 28,5 m	27.10.2004	21.09.2005
8" (137 – 148m)	Longitude 48° 28'02,7" W Elevação do terreno: 650 m	Arenito 28,5 – 137m Basalto 137 – 148m	Vazão estimada: ##	18:00h Tempo Bom Temperatura do ar : 22°C

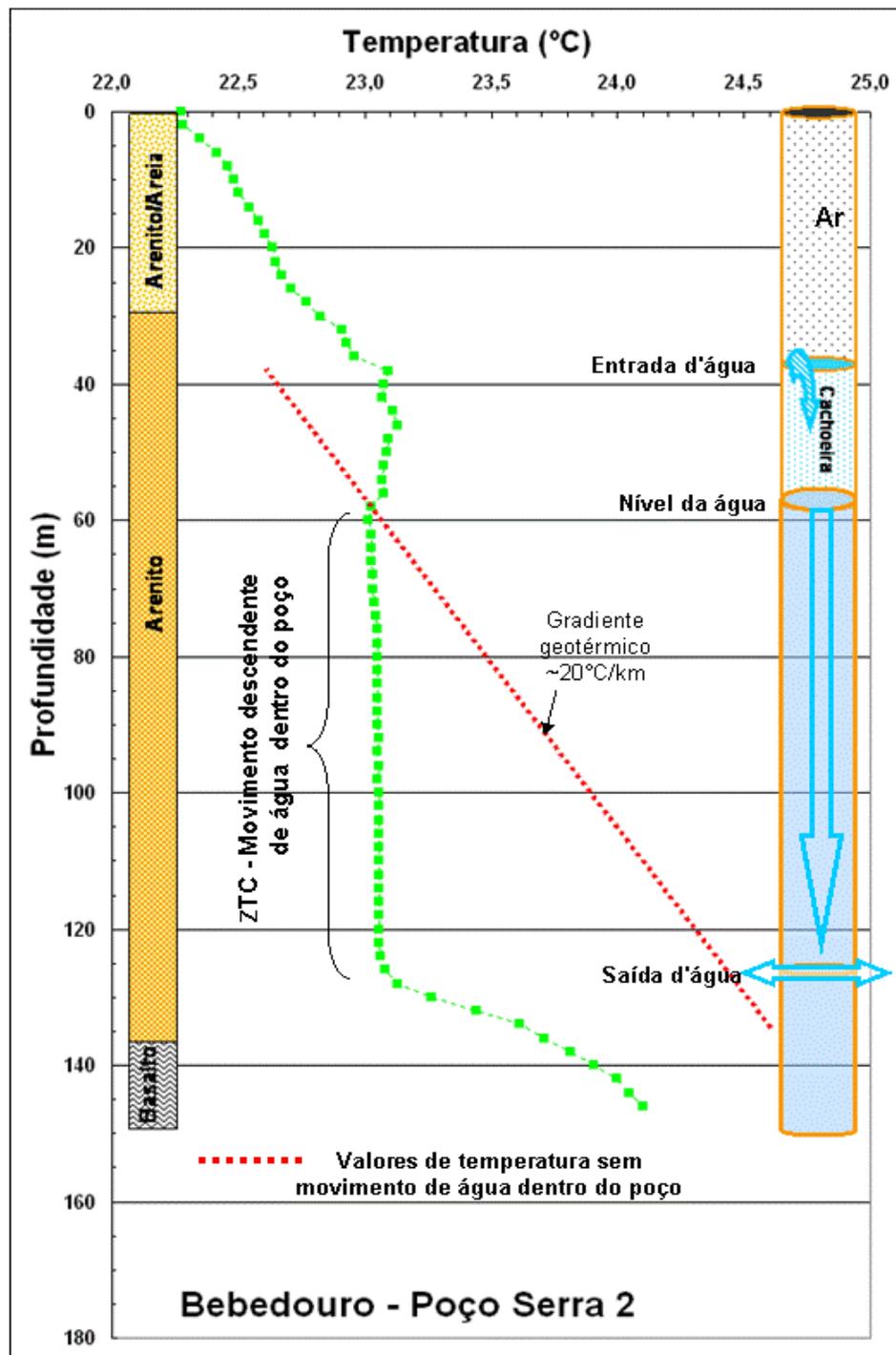


Figura A4. Perfil térmico e esquema inferido de circulação de águas no poço Serra - 2.

A.3 Fazenda Santa Ana – Proprietário Waldir Turco.

Poço originalmente com 60m, foi aprofundado em 17.05.2004 para 176,6 m. Segundo informação do perfurador, foi constatado basalto vesicular fraturado, de 140,4m a 165m. De acordo com a informação fornecida pelo proprietário e pelo Sr. Luiz, o caseiro, durante a perfuração a água foi detectada na profundidade de 140m, logo após ocorrência de “pedra amarelada”. Apesar da vazão medida deste poço ter sido de 34 m³/h, a bomba atual, instalada aos 106m (?), retira apenas 4 m³/h.

Tabela A5. Poço Santa Ana – Perfuradora Hidromap.

Diâmetro (intervalo) dados IPT	Coordenadas Geográficas	Perfil Litológico (DAEE)	Data da Perfuração	Data e hora da Perfilagem Térmica
08” (0 – 61m)	Latitude: 21° 04’ 02,1” S	Solo 0 – 20m	17.05.2004	22.09.2005
6” (61 – 176,6m)	Longitude 48° 29’42,1” W Elevação do terreno: 563m	Arenito 20 – 50m Basalto 50 – 176m	Vazão : 34 m ³ /h	09:00h Tempo Bom Temperatura do ar : 22,3°C

perfilagem térmica

Duas perfilagens térmicas foram realizadas neste poço, a primeira em 21.09.2005 às 15:00h. Os dados mostrados aqui são os da segunda perfilagem, do dia 22.09.2005 (Figura A5), quase idêntica ao da primeira perfilagem.

Ouve-se forte som de queda d’água. A partir da perfilagem térmica observa-se que entre 58m e 100m a temperatura é quase constante, com gradiente térmico de 0,36°C/km, indicando movimento descendente de água dentro do poço, neste intervalo de profundidade. De acordo com a perfilagem gama, realizada pelo IPT, o nível da água está aos 57,3m, confirmando a profundidade de 58m obtido pela perfilagem térmica. Aparentemente a entrada de água ou a fonte da cachoeira se encontra aos 30m de profundidade. Ou seja, a água é também proveniente do arenito. O som de cachoeira se deve ao intervalo de 28 metros de queda d’água, entre 30m e 58m. É possível que haja também uma pequena entrada de água em torno de 86m, o que provoca aumento local de temperatura.

Na base da zona de temperatura constante, aos 102-106m, deve ocorrer uma primeira saída de água do poço, através de uma fratura no basalto ou num possível limite entre derrames de basalto, na faixa de basalto alterado detectado pelas perfilagens Gama e BHTV. Conseqüentemente, esta primeira saída da água do poço provoca um pequeno aumento do gradiente térmico ($\sim 15,2^{\circ}\text{C}/\text{km}$) e diminuição do fluxo de água, que continua em movimento descendente até a saída da água do poço aos 128m. Entre 122 e 128m foi detectada, pelas perfilagens Gama e BHTV, uma faixa de basalto bastante alterado, onde deve se encontrar o aquífero de onde provém a água quando o poço é bombeado. A observação de “pedra amarelada” durante a perfuração do poço deve corresponder à zona de basalto alterada entre 122 e 128m. A ocorrência de água “perto dos 140m” deve corresponder ao aquífero localizado na base desta camada alterada. A diferença entre o valor de 128m, detectado tanto pela perfilagem BHTV como pelo perfil de temperatura, e o de “140m” observado na perfuração pode ser atribuída às incertezas das profundidades estimadas durante a perfuração.

É provável que haja uma pequena entrada de água entre 152 e 154m, onde a temperatura sofre um aumento e onde o perfil gama acusa pequena alteração na rocha.

Entre 128 e 154m o gradiente térmico é de $27^{\circ}\text{C}/\text{km}$ e de 154 a 174m é de $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$, ou seja, valores próximos do GT regional, mas a rocha está resfriada neste intervalo de profundidade, como conseqüência da perda de água fria do poço para a rocha circunvizinha. Considerando um gradiente térmico regional médio de $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$, a temperatura provável aos 174m de profundidade seria de $26,9^{\circ}\text{C}$ (reta pontilhada em vermelho na Fig. 8). A temperatura medida nessa profundidade foi de $25,46^{\circ}\text{C}$.

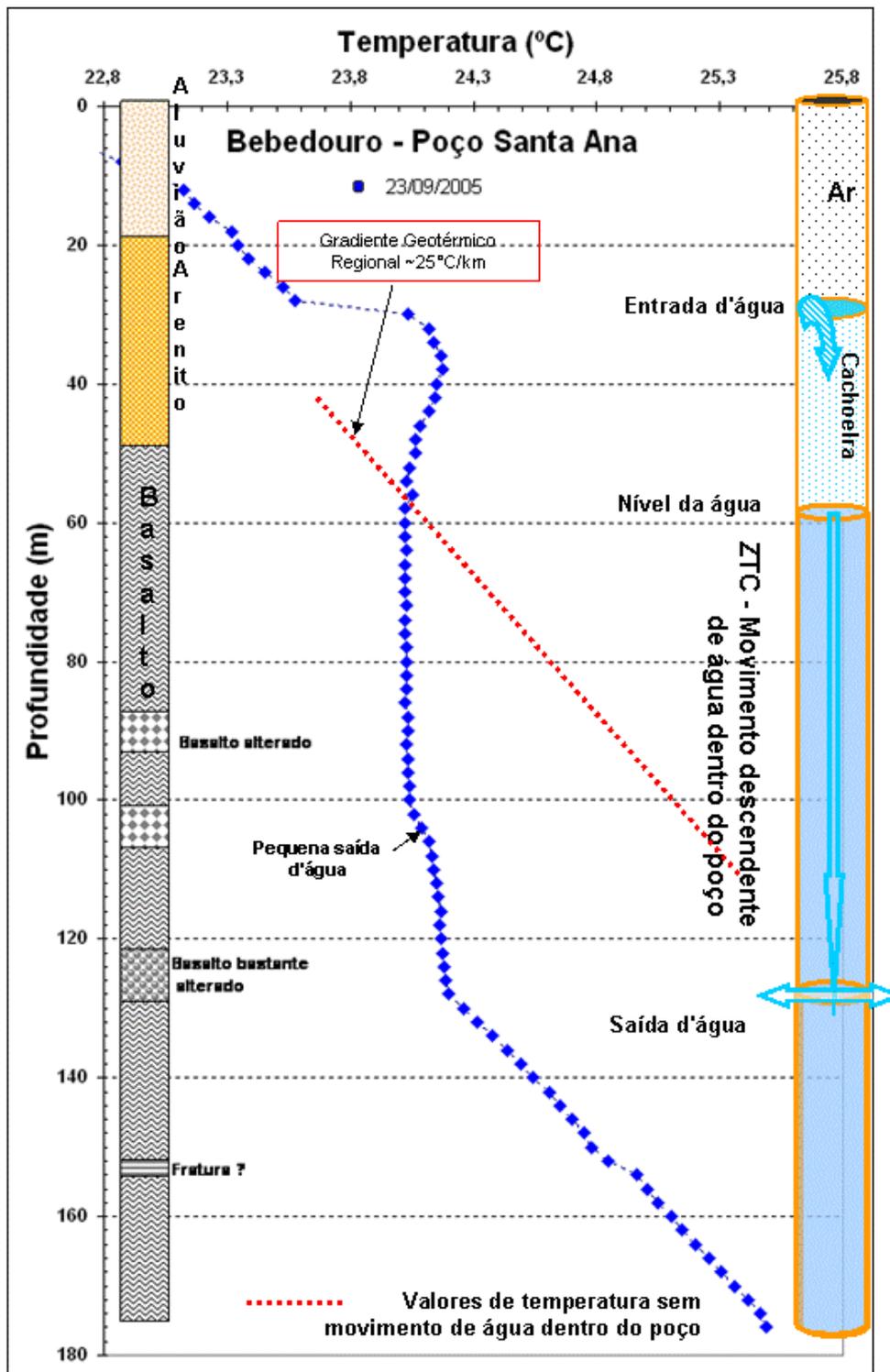


Figura A5. Perfil térmico e esquema inferido de circulação de águas no poço Santa Ana.

A.4 Fazenda Retiro, Monte Azul Paulista – Proprietário Francisco J. Junqueira.

Tabela A6. Poço 2 Fazenda Retiro – Perfuradora Hidromap.

Diâmetro (intervalo) dados IPT	Coordenadas Geográficas	Perfil Litológico (DAEE)	Data da Perfuração	Data e hora da Perfilagem Térmica
08" (0 – 196m)	Latitude: 20° 50' 40,1" S Longitude 48° 41' 10,0" W Elevação do terreno: 508m	Solo 0 – 14,5m Arenito/Areia 14,5 – 28m Arenito 28 – 63m Basalto 63 – 196m	10 e 11.05.2004 Vazão : 54 m ³ /h NE – 15m ND – 105m	22.09.2005 10:35h Tempo Bom Temperatura do ar : 24,18°C

Foram perfurados três poços nesta fazenda, apenas o poço 2 não estava sendo ainda utilizado. Não se ouve som de queda d'água. Entretanto, observa-se (Figura A6) que, entre aproximadamente 30m e 134m, a temperatura é quase constante, com gradiente térmico de 0,23°C/km (considerando a temperatura do topo da zona de temperatura constante aos 50m) indicando movimento descendente de água dentro do poço. O fato de não se ouvir o som de cachoeira indica que o nível estático da água está acima ou na mesma profundidade da entrada de água. É possível que a entrada de água ou a fonte da cachoeira se encontra aos 30 metros de profundidade, na interface areia/arenito (28m). É possível também que haja uma pequena entrada de água em torno de 48m, indicada pelo pequeno aumento da temperatura nessa profundidade.

Aparentemente na base da zona de temperatura constante, aos 134m, deve ocorrer uma primeira saída de água do poço, através de uma possível fratura ou fenda no basalto ou ainda camada interderrames. A diminuição do fluxo de água provoca um aumento do gradiente térmico entre 134 e 174m, para aproximadamente 10°C/km. Uma segunda e principal saída de água do poço para a rocha ocorre em 174m de profundidade, abaixo da qual o alto gradiente térmico de 190°C/km é indicativo de que a rocha em profundidades maiores está com suas temperaturas bastante perturbadas. Contudo, sem a movimentação vertical a água dentro do poço na camada inferior recebe normalmente o calor da rocha e sua temperatura tende a alcançar valores normais. Aos 196m de profundidade o valor medido de 27,34°C é bastante próximo do

esperado para essa profundidade. De fato, supondo um GT regional de $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$, a temperatura em 196m seria de $28,22^{\circ}\text{C}$.

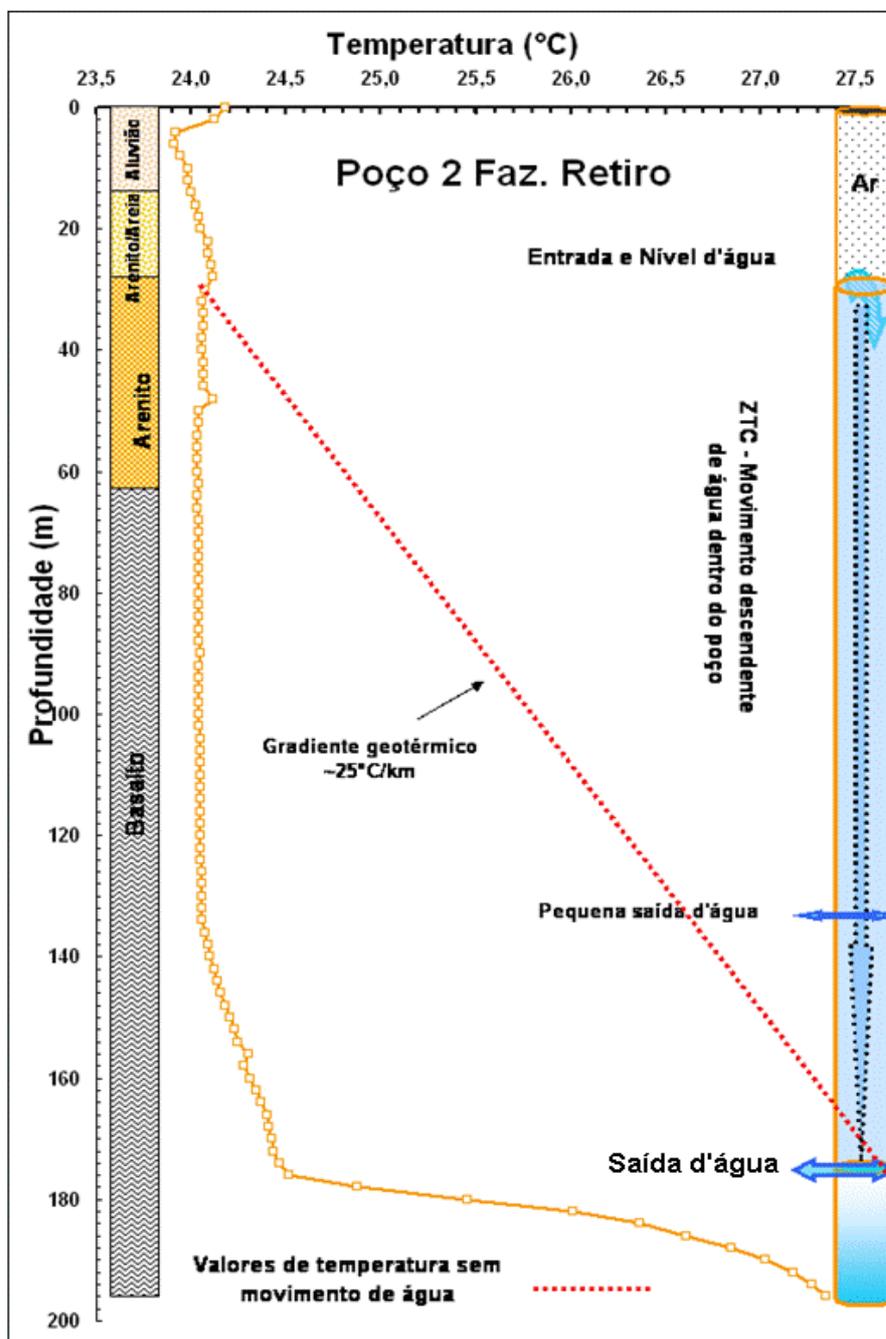


Figura A6. Perfil térmico e esquema inferido de circulação de águas no poço na Fazenda Retiro, município de Monte Azul Paulista.