

ATIVIDADE SÍSMICA DE BEBEDOURO, NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – OUTRO CASO DE SISMICIDADE INDUZIDA POR POÇOS TUBULARES?

Tereza Higashi Yamabe¹; Marcelo Assumpção²; Afonso E.V. Lopes²; José Roberto Barbosa²; Marcelo Bianchi²; Luiz Galhardo²; Dennis Schramm².

RESUMO

Tremores de terra têm ocorrido no município de Bebedouro, Nordeste da Bacia do Paraná. O primeiro enxame de eventos foi sentido de janeiro a julho de 2004 e o segundo, de dezembro de 2004 a abril de 2005. Estações sismográficas instaladas na região registraram centenas de sismos, que atingiram magnitudes de até 2,9. Cobrem a área sedimentos da Formação Adamantina e o basalto da Formação Serra Geral, onde ocorrem os tremores. Os epicentros estão localizados nas proximidades de poços tubulares de 120-220 m de profundidade, perfurados em 2003 e 2004, que exploram água das fraturas do basalto. A atividade sísmica tende a ocorrer nas estações chuvosas, quando os poços não são bombeados. É possível que exista uma relação entre sismos e poços, considerando a proximidade dos epicentros e as ocorrências cíclicas dos tremores. Entretanto, para confirmar essa possibilidade e melhorar a determinação epicentral, serão necessários outros levantamentos geofísicos como os sísmicos e as perfilagens de poço, incluindo a térmica. Um mecanismo possível para a indução de tremores é quando a perfuração permite comunicação entre o aquífero e fraturas secas. A pressão da água agindo sobre zonas fraturadas, previamente sob esforços, pode causar sismos. Dois casos comprovados de sismicidade induzida por poços ocorreram nas regiões nordeste e central da Bacia do Paraná, relacionados com poços de 200 m e 1.800 m, respectivamente.

Palavras-chave: Sismicidade Induzida, Poços Tubulares Profundos, Fraturas no Basalto.

¹ FCT-UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP. Rua Roberto Simonsen 305 - Presidente Prudente/SP - 19060-900. Tel: 18 - 229 5355, higashi@prudente.unesp.br

² IAG-USP, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP. Rua do Matão 1226, Cidade Universitária - São Paulo/SP. 05508-090. Tel. 11 – 30914760/66, marcelo@iag.usp.br

ABSTRACT

The first swarm of seismic events in Bebedouro municipality, NE Paraná Basin, Sao Paulo State, was felt from January to July 2004. In December 2004 the activity resumed with peak activity at the end of March 2005 with magnitudes up to 2.9. Ten seismic stations were installed and hundreds of events have been recorded. The area is covered by Cretaceous sandstone, overlying Serra Geral Formation basalt. The earthquakes are located in the basalt layer, with epicenters close to a few 120-220 m deep groundwater wells drilled in 2003 and 2004 most of them used for farm irrigation. The seismic activity tends to occur in the rainy seasons when the wells are not used. The proximity of the epicenters and the cyclic seismic occurrences can possibly indicate a relationship between seismic activity and some wells that exploit water from basalt fractures. In order to confirm this possibility and to improve epicenters determination other geophysical measurements such as temperature, geophysical well loggings and seismic refraction will be done. One possible mechanism for a well to induce earthquakes is when the drilling allows water to enter a previously dry fracture. Water pressure can then build up and reach pre-stressed fracture zones causing seismic events. Other two cases of induced seismicity have occurred in NE and Central part of Paraná Basin related to 200 m and 1,800 m deep wells.

Keywords: Induced Seismicity, Groundwater Deep Wells, Basalt Fractures.

1 - INTRODUÇÃO

Os primeiros tremores de terra no Distrito de Andes, município de Bebedouro, norte do Estado de São Paulo, foram sentidos a partir de janeiro de 2004, atingindo apenas algumas propriedades rurais numa área aproximada de 10 km². Inicialmente os moradores dessas propriedades pensaram tratar-se de explosões de pedreira, pois os abalos não eram muito fortes. Essa atividade inicial durou até o mês de maio, mas há relatos de sismos ocorridos também em julho de 2004. Não existe pedreira nas proximidades desses sítios.

Ao final de dezembro de 2004 os tremores voltaram a ocorrer. Considerando o aumento de frequência e magnitude dos eventos, a Prefeitura de Bebedouro solicitou ajuda ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP), que instalou uma rede de sismógrafos para estudar essa atividade sísmica. As estações sismográficas de Andes registraram um número bastante

alto de tremores, em alguns dias as contagens ultrapassaram 100 ou 200 eventos, dos quais cerca de 20 a 30 foram sentidos pelos moradores das propriedades localizadas na área epicentral, e os maiores foram percebidos num raio aproximado de 10 km. Alguns sismos de magnitudes Richter de 2,8 e 2,9 foram também registrados pelas Estações Sismográficas de Rio Claro, operada pela UNESP, e a de Valinhos da USP, localizadas cerca de 180 km e 287 km a SE de Bebedouro, respectivamente.

A Figura 1 mostra os principais sismos detectados entre 19/03 e 16/04/05, incluindo os dois mais fortes ocorridos até agora, onde é possível observar que, próximo da área epicentral, existem inúmeros poços tubulares. A maior parte desses poços, perfurada há mais de 20 anos, tem profundidades entre 50 e 80 metros, e não têm nenhuma história de sismos a eles associada.

Tremores de Andes, 19/03 a 16/04

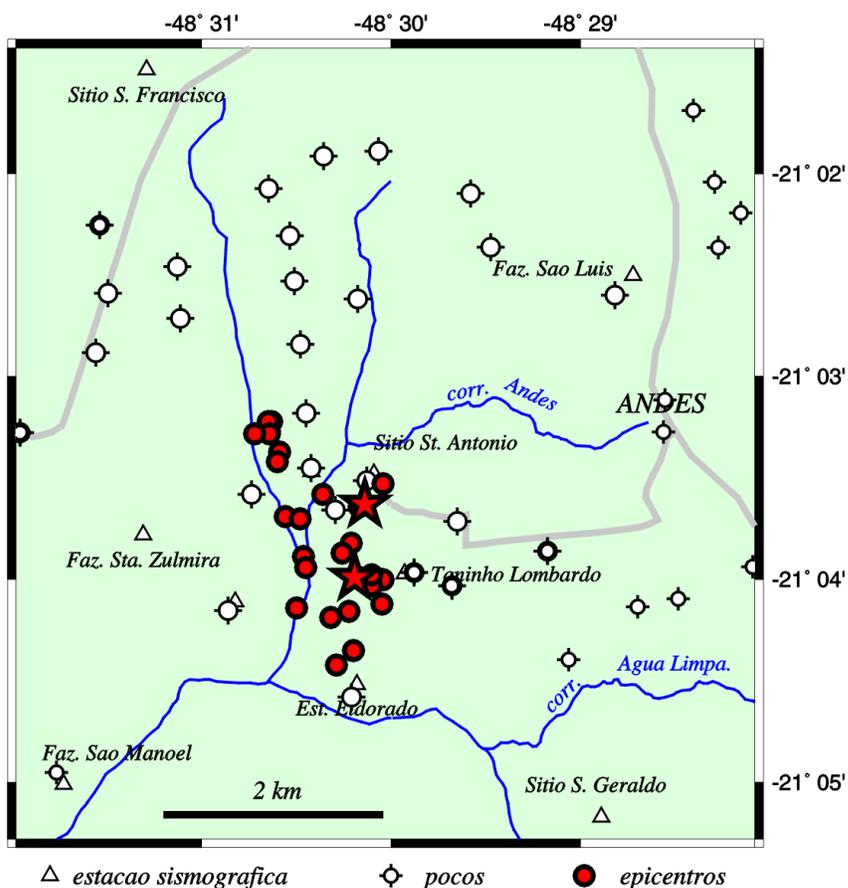


Figura 1. Amostra de epicentros (círculos vermelhos) dos tremores de Andes entre 19/03 e 16/04. Os dois eventos mais fortes (30/03 e 02/04) com magnitudes 2,9 e 2,8 estão indicados pelas estrelas. Triângulos brancos são estações sismográficas. Círculos brancos são poços cadastrados no DAEE ou visitados para esta pesquisa.

Há também dez poços com profundidades de 120 a 200 m, que exploram água das fraturas do basalto e que foram perfurados em 2003 (Fz. Aparecida) e 2004 (Fz. Santa Ana). A atividade sísmica

de Andes tende a ocorrer principalmente nas estações chuvosas, quando estes poços não são bombeados. A Figura 2 resume estas informações, mostrando o índice mensal de chuva registrado em Bebedouro durante os anos de 2003, 2004 e os primeiros meses de 2005, bem como os períodos de maior atividade sísmica sentida na área epicentral e o intervalo de tempo quando houve bombeamento contínuo dos poços que exploram as fraturas do basalto. Observe-se que os poços perfurados em 2003 foram bombeados continuamente apenas no segundo semestre de 2004, segundo informações dos proprietários.

É possível que exista uma relação entre os sismos e os poços tubulares de Andes, Bebedouro, considerando o que se mostra nas Figuras 1 e 2, especialmente a proximidade dos epicentros aos poços perfurados em 2003 e 2004.

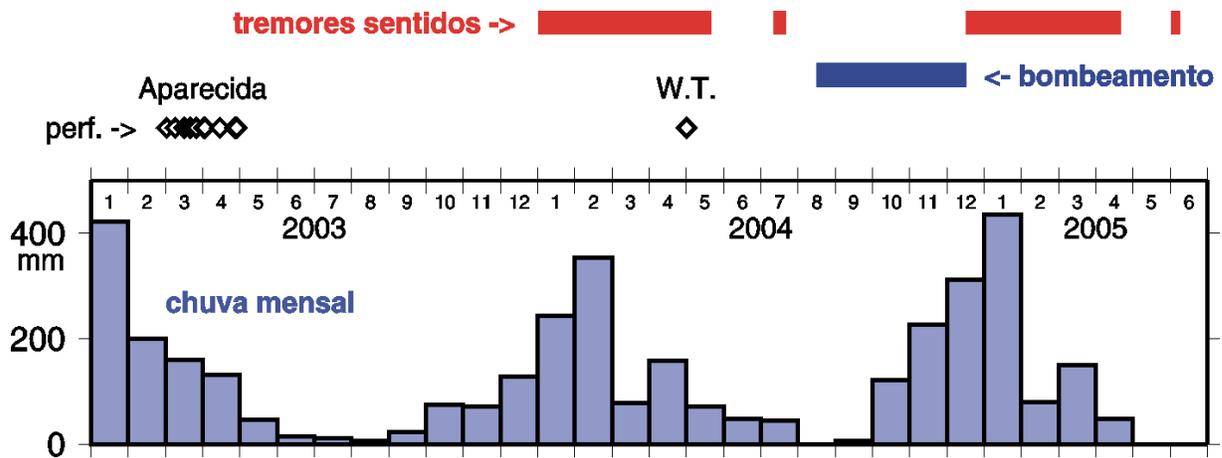


Figura 2. Períodos de maior atividade sísmica sentida, período do bombeamento contínuo dos poços e o índice de chuva registrado em Bebedouro.

São relativamente poucos os casos de abalos sísmicos relacionados com a perfuração e exploração de poços para água subterrânea na Bacia do Paraná, apesar do elevado número de poços tubulares perfurados. Contudo, alguns desses casos têm sido reportados desde a década de 50 no Estado de São Paulo e Norte do Estado do Paraná [1].

Estudos têm mostrado que esses sismos induzidos estão relacionados com características geológicas, específicas dos derrames de basalto, tais como camadas de arenito entre derrames e fraturas no basalto, de tal modo que a perfuração dos poços tubulares altera este ambiente, normalmente facilitando a conexão entre uma camada produtora de água e zonas fraturadas, através de camadas de basalto alterado ou de arenito inter-derrames. A pressão da água dentro das fraturas do basalto, somada aos esforços naturais previamente existentes, facilita a ocorrência de sismos. Ou seja, a presença de

água nas fraturas possibilita a movimentação de blocos de rocha, com a liberação de tensões acumuladas, na forma de pequenos abalos sísmicos [2].

Desde o final dos anos 60, sabe-se que algumas ações do homem, como a injeção de água em falhamentos de rocha, podem provocar sismos. O caso mais conhecido e documentado de atividade sísmica induzida relacionada com fluidos subterrâneos é o que ocorreu em Denver, U.S.A., quando líquidos químicos tóxicos foram injetados por pressão em um poço de 3.671m de profundidade. Vários autores, entre eles [3], mostraram a forte correlação entre a atividade sísmica e a quantidade injetada de fluidos.

Além desses, há casos de sismicidade relacionada com a exploração de petróleo, com a instalação de reservatórios de água para usinas hidrelétricas e também com o processo de retirada de vapores e re-injeção de água resfriada em usinas geotermiais. Na maioria deles, a alteração do ambiente geológico apenas antecipa a liberação de tensões que estavam localmente acumuladas [4], [5], ou seja, a sismicidade induzida, relacionada com movimentos de fluidos subterrâneos, ocorre somente em certas condições geológicas e tectônicas específicas. No Brasil, pelo menos 16 reservatórios hidrelétricos já induziram tremores de terra [6], como exemplo, podem ser citados os reservatórios de Volta Grande e de Marimbondo, ambos no Rio Grande (sismos de 1974 e 1978 na Tabela 1 e Figura 3).

Portanto, o objetivo deste trabalho é estudar e discutir, no Encontro de Perfuradores, a atividade sísmica de Bebedouro, possivelmente induzida por poços para água subterrânea, e, para que se possa melhor definir como ocorre a indução dos sismos, levantamentos estão sendo realizados sobre a sismicidade da região e dados dos poços existentes. Outros estudos geofísicos estão sendo planejados, como sondagens elétricas e sísmicas para a determinação do modelo estrutural e de velocidades sísmicas, perfisagens geofísicas de poço como as de temperatura, que poderão determinar as entradas e saídas de água dos poços.

2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ATIVIDADE SÍSMICA E A ÁREA DE ESTUDO.

2.1 – Contexto Geológico.

O município de Bebedouro está situado no norte da Bacia do Paraná, no limite nordeste dos depósitos fluviais da Formação Adamantina, do Grupo Bauru, que se sobrepõem aos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Está situado em terreno de altitude variável entre 530 e 650 m, no topo do divisor de águas das bacias do Rio Pardo a leste e Rio Turvo a oeste, ambos afluentes do Rio

Grande. Podem ser descritos na região rios e zona de contato das Formações Adamantina e Serra Geral, predominantemente de direção NW.

A análise dos sismos de Bebedouro tem indicado que os focos localizam-se no basalto, como ocorre também nos casos de sismicidade induzida tanto por poços como por represas hidrelétricas [7], [8]. Interessante destacar que os vários casos de sismicidade induzida por reservatórios de usinas hidrelétricas na Índia estão também relacionados com a pressão de fluidos em falhas no basalto ([9], H.K.Gupta, 1994, comunicação pessoal).

Devidas ao processo de resfriamento dos fluxos de lava que ocorreram na forma de derrames, algumas importantes características do basalto na Bacia do Paraná, são verificadas. Em cada derrame podem ser identificadas três zonas litologicamente distintas - o basalto vesículo-amigdaloidal no topo e na base, e compacto no centro [10]. Na parte basal de cada derrame, a rocha é cristalina, de cor preta, granulação fina e intensamente alterada, com fraturas horizontais e algumas verticais. No topo, os derrames são cinzentos ou avermelhados e, quase sempre, são mais alterados que na base. O basalto compacto na porção central dos fluxos é de cor escura com nuances verde ou vermelha causadas pelas alterações hidrotermais [11] e ocupa 2/3 da espessura total de derrames relativamente espessos [12].

É comumente aceito [13, 14] o conceito de faixas fraturadas no basalto, que ocorrem com extensão lateral de dezenas a centenas de metros, com direção sub-horizontal. O fraturamento no interior dessas faixas destaca blocos de forma tabular, muitas vezes terminando em cunha ou imbricados; em geral estes blocos apresentam faces alteradas ou oxidadas ou películas argilosas. As fraturas podem associar-se e constituir verdadeiras juntas-falhas e representam, no corpo do derrame, zonas de percolação preferencial.

Na região de Andes, Bebedouro, existem inúmeros poços tubulares perfurados para água subterrânea, explorando a camada superior de arenitos da Formação Adamantina, do Grupo Bauru. Contudo, há também um número considerável de poços que exploram fraturas do basalto da Formação Serra Geral, com dados cadastrados no DAEE, Departamento de Águas e Energia Elétrica. Nas proximidades da área epicentral há quatro poços na Fazenda Santa Therezinha, perfurados em 2002, com profundidades que variam de 150 a 180 m; dez poços na Fazenda Aparecida, perfurados em 2003, com profundidades entre 117 e 228 m, e um poço na Fazenda Santa Ana que foi aprofundado em 2004 para 170 m.

Na cidade de Bebedouro existem três poços tubulares profundos, com profundidades de 831 m (1), 924 m (2) e 1020 m (3). Esses poços tubulares da região, tanto os do Distrito de Andes quanto os profundos da cidade de Bebedouro, indicam perfil estratigráfico variável para o topo e base da Formação Adamantina e até mesmo para a Formação Serra Geral. Em geral os perfis estratigráficos

indicam solo arenoso de zero até 22 m (poço 3), arenito da Formação Adamantina até aproximadamente 122 m (poço 3), seguido por basalto. Apenas os poços profundos da cidade de Bebedouro atravessam o pacote completamente para explorar o Aquífero Guarani. Nestes, o topo do arenito Botucatu encontra-se entre 680 m (cota -120 m) no poço (1) e 794 m (cota - 204 m, poço 2).

O sistema de perfuração utilizado para a maioria dos poços da região, segundo informações de perfurador, é o roto-pneumático, que consiste na fragmentação da rocha através da combinação de percussão em alta frequência e rotação [15]. Esse método não possibilita observações detalhadas durante o processo de perfuração, não oferecendo informação confiável sobre possíveis cavernas ou sistema de fraturas. Entretanto, dos poucos dados de perfuração (DAEE) conhecidos até o presente, constam inter-derrames nas cotas aproximadas de 410 a 440 metros em cinco poços do Distrito de Andes, mostrando que esses poços atravessaram pelo menos os dois últimos derrames de basalto. Esses dados indicam também a presença de fraturas no basalto nas cotas 468 e 425 metros em um poço da Fazenda Aparecida e nas cotas 420 e 395 metros no poço da Fazenda Santa Ana (Figura 8).

De acordo com os dados do DAEE, em dois dos poços profundos de Bebedouro consta a existência de uma camada de arenito inter-derrame de quatro metros de espessura nas cotas 18 (poço 3) e -52 m (poço 1). Entretanto, no poço (2) há camada de 4 m de arenito a partir da cota 474 m, e outra de 20 m de espessura, na cota -120 m. As camadas de arenito nas cotas 18 m, -52 m e -120 m localizam-se entre os primeiros derrames, na base do pacote de basalto.

A presença de camadas de arenito, intercalando derrames de basalto, é comum na base do pacote de basalto, notadamente na região norte da Bacia do Paraná, indicando a persistência do ambiente desértico, responsável pelos depósitos eólicos da Formação Botucatu, que antecederam a extrusão do magma durante os primeiros derrames de lava. Entretanto, a presença de arenito inter-derrames no poço de Bebedouro, como o apontado aos 474 m, cota bastante próxima dos inter-derrames notados nos poços de Andes (410 a 440 m), é um indicativo de que houve um intervalo de tempo entre o derramamento dos últimos derrames de basalto, quando ocorreu esse depósito de sedimentos, que deverá ter sido comum a toda essa região. Portanto, nos poços de Andes também é possível que nos inter-derrames apontados haja uma camada de arenito entre o basalto vesicular, mesmo que com espessura menor.

Além desses arenitos inter-derrames, que podem ou não ser fontes de água, há ainda a possibilidade de se encontrar vazões compensadoras de água, da ordem de 30 a 40 m³/h, nas fraturas do basalto, como se constatou através dos dados do DAEE, no distrito de Andes. Entretanto, o que se observou também neste local, foi a ocorrência de fraturas que possibilitam vazões anômalas de água da

ordem de 150 a 190 m³/h, normalmente características de poços que exploram o aquífero Guarani, como é o caso de um dos poços profundos de Bebedouro, cuja vazão é de 120 m³/h.

Portanto, a presença de possíveis camadas de arenito inter-derrames e das fraturas maiores, aparentemente constantes na região norte do Estado de São Paulo, parece estar incentivando a perfuração no basalto nessa região, por serem indícios de compensadoras vazões de água subterrânea.

2.2 – Atividade Sísmica Regional.

Pequenos tremores de terra, com magnitudes até 4, são relativamente comuns no Brasil e podem ocorrer naturalmente em qualquer parte do País. A Figura 3 mostra os sismos ocorridos na parte norte do Estado de São Paulo, já incluindo os eventos de Bebedouro deste ano. A lista dos sismos desta figura está na Tabela 1. Podem ser adicionados a esta lista os eventos ocorridos em Marcondésia, no município de Monte Azul Paulista, em março deste ano, quando ocorria o pico de atividades em Bebedouro, e um tremor sentido nas localidades de Bady Bassit, Potirendaba e até em São José do Rio Preto, no dia 04 de maio de 2005.

Como é possível observar na Figura 3, o número de ocorrências sísmicas é considerável. Entretanto, não foi possível ainda determinar a origem da maioria desses sismos regionais. O presente trabalho tem em vista também contribuir nesta investigação.

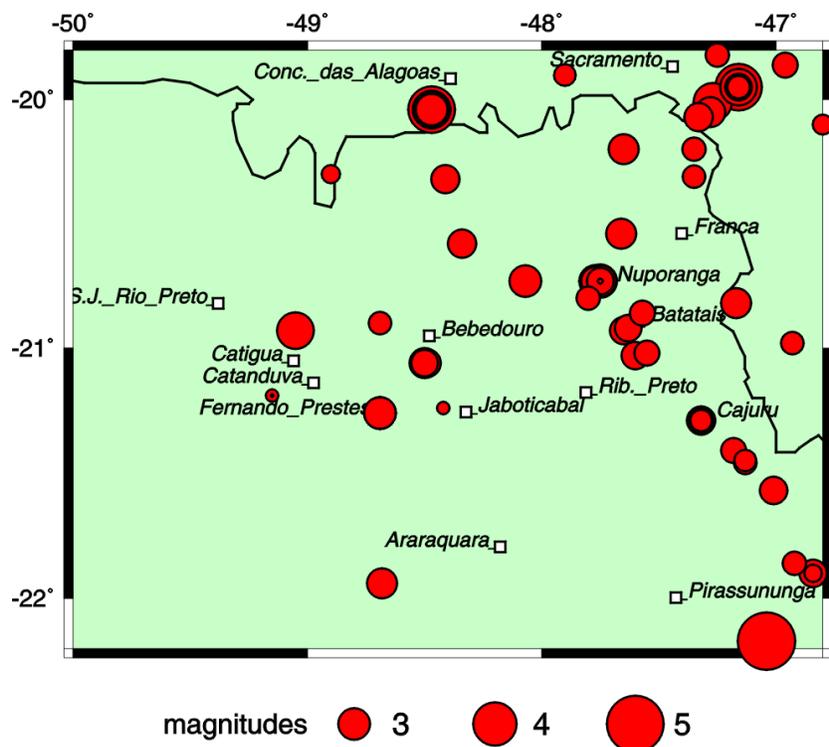


Figura 3. Círculos vermelhos são epicentros de sismos da parte norte do Estado de São Paulo (fonte: catálogo de sismos do IAG) de 1922 a 2005 (já incluindo os de Andes), conforme a Tabela 1.

2.3 – Determinação Epicentral dos Sismos.

Tendo em vista a atividade sísmica no Distrito de Andes, a rede de sismógrafos instalada pelo IAG/USP, para estudar essa atividade sísmica, está operando desde o início de março de 2005. Os sismógrafos trabalham com um computador de campo para armazenar dados que depois são copiados para um computador portátil. Para determinar o epicentro de um sismo, com precisão, são necessários registros de pelo menos três estações.

Inicialmente foram instaladas estações sismográficas no Sítio Santo Antônio, Fazenda São Luís, Sítio São Francisco, Estância Eldorado e Fazenda São Manoel (Figura 1). A determinação da área epicentral apontou que os sismos estavam concentrados ao sul do Sítio Santo Antônio, o que motivou a mudança de local de algumas estações para locais mais próximos da região epicentral. Considerando o aumento da frequência e também da magnitude dos tremores, outras estações foram instaladas, estas com sinal enviado por rádio a uma estação central, localizada no Sítio Lombardo.

No Sítio Santo Antônio (Figura1), foi instalado também um sismógrafo com registro direto no papel, que cobre um cilindro que fica girando 24 horas por dia. É interessante esse registro paralelo, pois é possível ‘ver’ que houve um abalo, assim que um tremor é sentido. Obviamente é também possível observar pequenos tremores não sentidos pelas pessoas, apenas os sinais são menores no registro.

Foi interessante o fato dos proprietários do Sítio Santo Antônio, onde os tremores têm sido mais sentidos, começarem a anotar a ocorrência dos abalos, a partir de 25 de fevereiro de 2005, quando os tremores aumentaram de intensidade. Nesta anotação constam data, o horário aproximado e as características do tremor, por exemplo, se foi forte ou fraco, se o tremor foi acompanhado de um ruído como trovão, se animais manifestaram-se, se houve queda de objetos, etc. Estes registros são importantes também para se ter uma idéia da atividade sísmica antes da instalação da rede sismográfica local [16].

As dez estações sismográficas de Andes registraram, desde a sua instalação, um número bastante alto de tremores, dezenas deles sentidos pelos moradores da área epicentral. Em geral os mais fortes fazem as casas ‘balançarem’, cachorros saem latindo, o chão e as venezianas vibram muito, quadros pendurados se deslocam e as pessoas saem correndo de dentro das casas. Há relatos de trincas em parede e piso de varanda. Observou-se também que moradores de outros sítios passaram a sentir os tremores e de maneira diferenciada entre os sítios, ou seja, os sismos estariam ocorrendo em diferentes localizações, o que pode ser observado nas Figuras 4, 5 e 6, que mostram os epicentros dos sismos registrados nos intervalos de 10 a 25/03/2005, de 26/03 a 10/04/2005 e de 10/05 a 08/06/2005, respectivamente.

0310 a 0325

NO=5 RMS=0.02

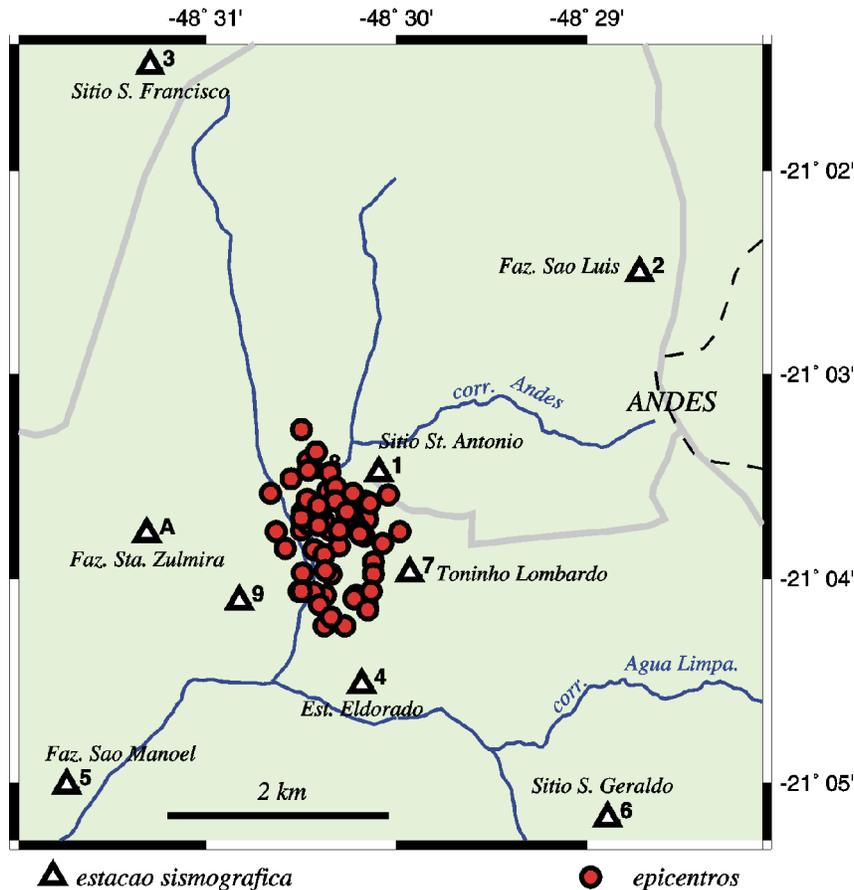


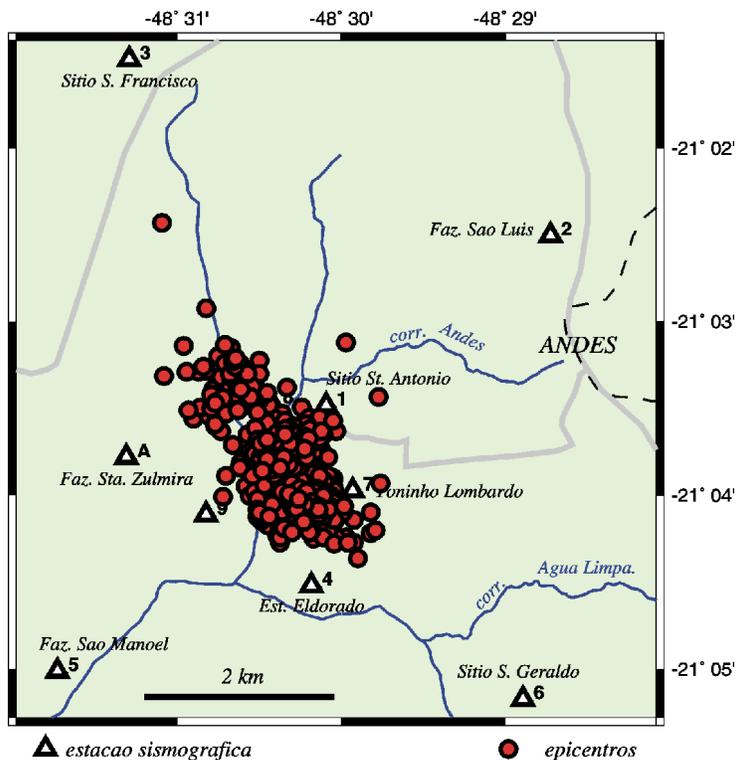
Figura 4. Epicentros (círculos vermelhos) dos tremores de Andes entre 10/03 e 25/03. Triângulos brancos são estações sismográficas.

Observe-se na Figura 4 que os sismos concentram-se, no início dos registros, na área próxima das estações 1, 7 e 8, e também dos poços de maior vazão extraída das fraturas do basalto. No período de maior frequência de sismos, mostrada na Figura 5, constam os de maior magnitude, ocorridos em 30.03.2005 e 02.04.2005. Observe-se nesta figura que há eventos mais distantes da área de concentração que, entretanto, ainda é a mesma do período anterior.

É possível observar na Figura 6 o decréscimo da atividade sísmica de Andes, e o distanciamento dos epicentros em relação à área de maior concentração do período anterior.

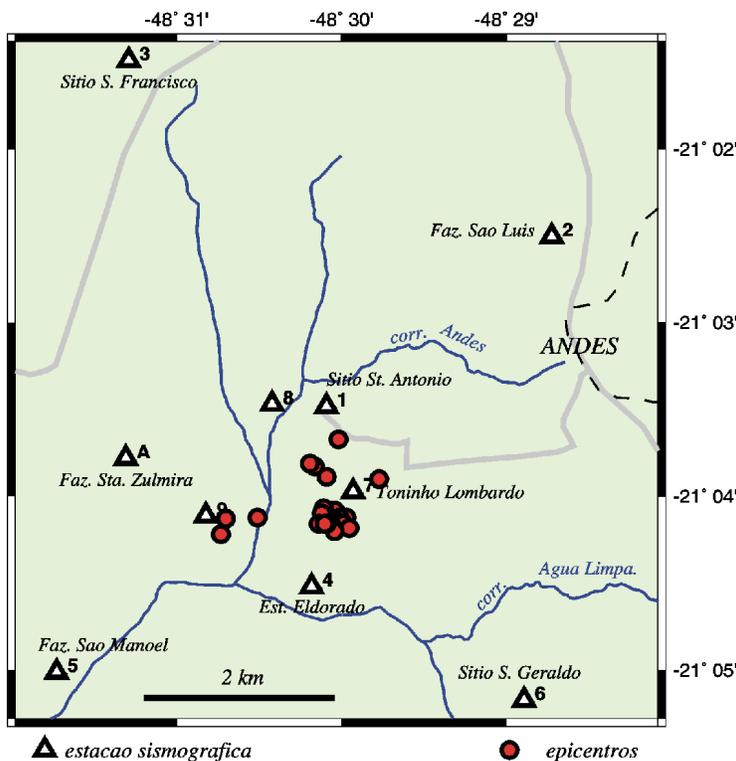
0326 a 0410

NO=5 RMS=0.02



0510 a 0608

NO=5 RMS=0.02



Figuras 5 e 6. Epicentros (círculos vermelhos) dos tremores de Andes entre 26/03 e 10/04; e entre 10/05 e 08/06. Triângulos brancos são estações sismográficas.

A Figura 7 mostra a distância dos epicentros aos dois poços de maior vazão bombeada das fraturas do basalto, localizados ao lado da estação sismográfica 8 (Figura 6). Observe-se que nos meses de maio e junho não há mais epicentros próximos daqueles poços.

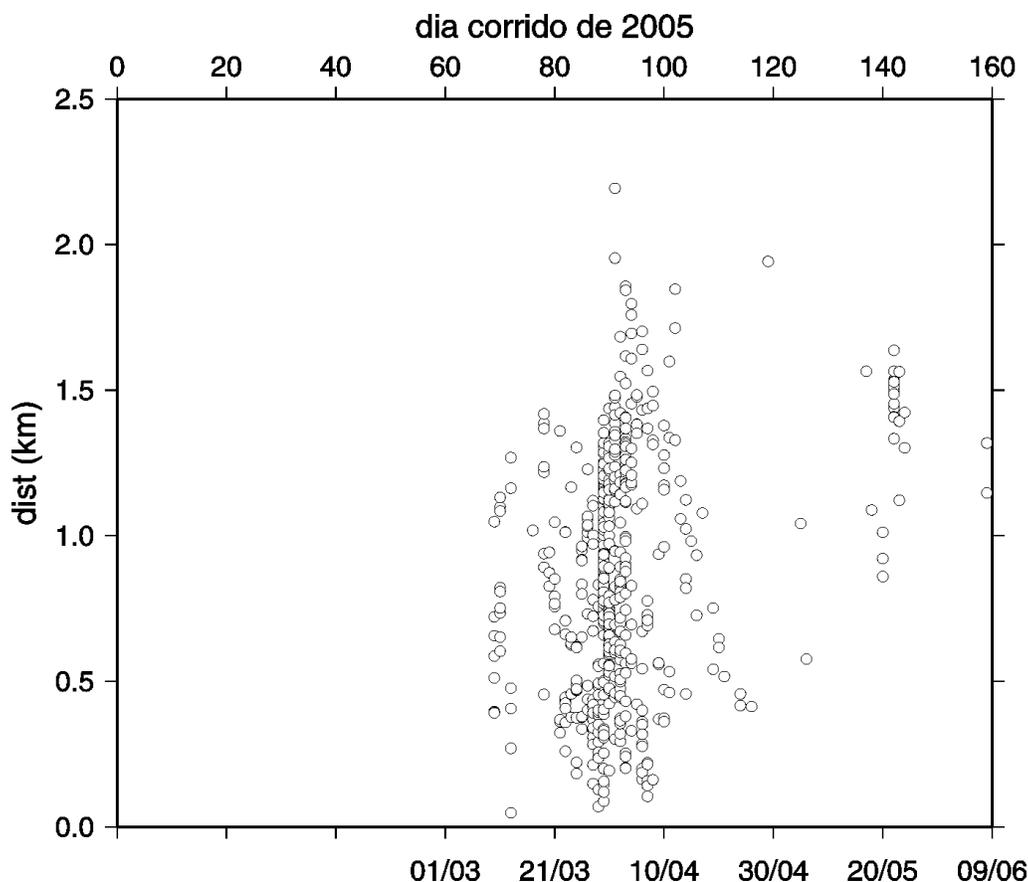


Figura 7. Distância dos epicentros com relação aos poços de maior vazão bombeada das fraturas do basalto (P07 e P10), desde o início dos registros dos sismos, em março, até junho de 2005.

2.4 - Possível Relação dos Sismos com os Poços Tubulares Profundos.

Os tremores de terra em Bebedouro foram sentidos pela primeira vez em dezembro de 2003 e essa atividade continuou, mesmo que com eventos esporádicos, até julho de 2004. Os sismos voltaram a ocorrer em dezembro de 2004 e aumentaram de frequência e intensidade nos primeiros meses de 2005. A análise dos sismogramas aponta que os sismos estão localizados no basalto, com epicentros distantes cerca de 1 km de poços tubulares de 120-220 m de profundidade, aproximadamente, que exploram fraturas do basalto. Alguns deles têm vazão anômala alta. Esses poços são bombeados continuamente na época da seca, em torno de agosto até o início de dezembro, e não são explorados durante o período de chuvas. Contrariamente ao que se poderia imaginar, os sismos têm ocorrido quando os poços não estão sendo bombeados.

A atividade sísmica em Nuporanga foi induzida pela movimentação de água dentro de um poço de 204 m de profundidade, que possibilitou a injeção de água, originada de um aquífero superior, em fraturas inferiores no basalto, através de uma cavidade existente em provável camada inter-derrame. Naquele caso a atividade sísmica também diminuía com o bombeamento contínuo de água do poço. O movimento de água e as respectivas profundidades de entrada e saída de água foram detectados através de medidas de temperatura ao longo do poço [17].

Considerando a hipótese de que os sismos de Bebedouro possam ser relacionados com os poços tubulares da região, uma busca de dados está sendo realizada nos arquivos do Departamento de Água e Energia Elétrica – DAEE de Araraquara. Esses dados têm permitido observar que os poços de vazão anômala encontram-se onde existem pequenas bacias ou depressões no topo do basalto, como pode ser observado na Figura 8.

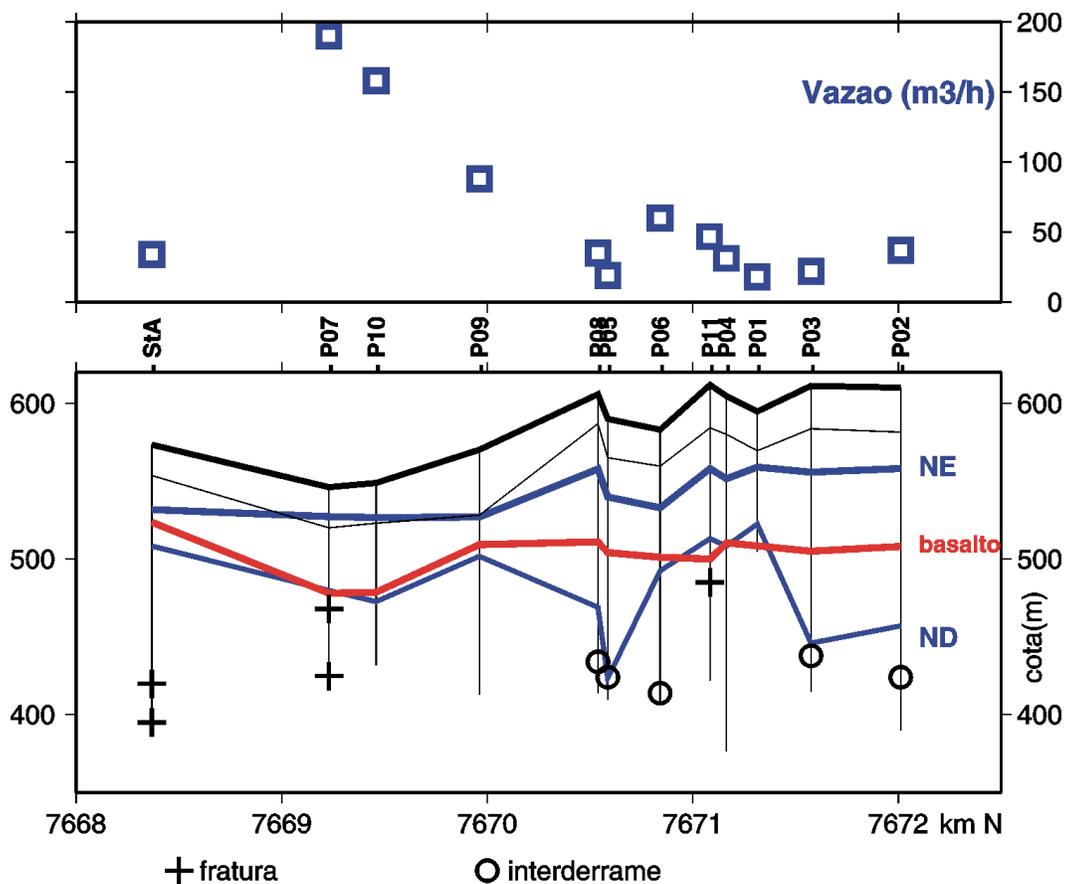


Figura 8. Vazão, cotas dos níveis estático (NE) e dinâmico (ND), topo do basalto e presença de fraturas e interderrames, dos poços da Fazenda Aparecida (P01 a P11) e da Fazenda Santa Ana (StA).

Tendo em vista a possibilidade de se obter indícios da origem da água proveniente das fraturas, considerando principalmente as vazões anômalas, a análise da água subterrânea de grande parte dos poços próximos à área epicentral, tanto os que exploram os sedimentos quanto um dos que exploram as

fraturas, está sendo efetuada. Foi interessante observar, nesta visita aos poços para a coleta de água, que, em alguns deles perfurados apenas até o topo do basalto, é possível ouvir o som de queda d'água, indicando movimento de água dentro do poço, e, portanto, a existência de transferência de água entre níveis.

Considerando o fato de que a maioria dos poços que apresentam tal movimento de água está em latitudes próximas dos poços com maior vazão de água, explorada das fraturas do basalto, e estes estão localizados na depressão do topo do basalto (Figura 8), é possível que uma parte considerável desta vazão se deva à contribuições da camada de arenito superior advindas desses movimentos descendentes de água.

Contudo, considerando ainda a extremamente alta vazão de alguns dos poços e também a informação, obtida de perfurador em comunicação pessoal, de que na região de Taiacú nas proximidades do Rio Turvo, cerca de 10 km ao sul da região epicentral de Andes, havia duas fontes de água alcalina, com pH alto, e quente, indicativos de água que provavelmente sobe através de fraturas, não se pode, de fato, descartar a possibilidade de outras origens para explicar a vazão de 150 a 190 m³/h. Ou seja, é bastante provável que haja, na área epicentral, um grande número de fraturas que possibilitam tanto a vazão alta de alguns poços através de algumas delas, como também a fuga de água em outras, provavelmente facilitada pela perfuração desses poços. Esta água, pressionando zonas fraturadas previamente sob esforços, causaria os sismos.

3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A ocorrência de tremores de terra tem sido freqüente no norte do Estado de São Paulo, como vista na Figura 3. Tem sido indicada a possibilidade das porções nordeste e sudoeste do Estado de São Paulo [1], delimitadas por importantes lineamentos estruturais e onde camadas de arenito inter-derrames são mais freqüentes, serem mais suscetíveis ao tipo de atividade sísmica induzida aqui discutida.

Em Nuporanga, a solução apresentada a partir dos estudos geofísicos, foi aplicada naturalmente pela necessidade de exploração contínua de água dos poços tubulares, principalmente aqueles que provocaram sismos logo após a perfuração. O bombeamento contínuo provavelmente evitou a fuga de água pelas fraturas do basalto, e não têm ocorrido mais tremores naquela localidade [18].

Em Presidente Prudente, após o fechamento da cavidade, detectada onde havia uma camada de 20 m de espessura de arenito inter-derrames, não vedada na época da perfuração do poço, com a utilização de 50 toneladas de concreto, o número de micro-tremores registrados pela estação

sismográfica local diminuiu drasticamente e desde então os sismos sentidos na região também diminuíram em número e magnitude [1]. Após a ocorrência do sismo maior de 1988, a vazão do poço, que explora o Aquífero Guarani, caiu para menos de 20 m³/h, de um potencial de vazão de 500 m³/h. O fechamento da cavidade possibilitou a recuperação da vazão e há mais de dez anos não ocorrem tremores naquela localidade [18].

No Distrito de Andes, Bebedouro, a atividade sísmica teve início após a perfuração de poços tubulares que exploram fraturas do basalto. Os sismos ocorrem durante o período do ano quando o índice de chuvas é mais alto e, portanto, quando não há bombeamento na maioria desses poços. Considerando esses fatos e, principalmente, a proximidade entre os poços e a área epicentral, pode-se dizer que há fortes indícios de que a sismicidade local seja igualmente relacionada com a movimentação de água subterrânea através de fraturas nas rochas. Possivelmente, essa movimentação de água não existia antes da perfuração de alguns dos poços tubulares, especialmente os que exploram água de fraturas.

Dados de perfuração indicam que os poços atravessaram material alterado inter-derrames e, possivelmente, camadas de arenito, que podem ser tanto camadas fontes de água, como podem ser caminhos através dos quais as águas dos poços alcancem fraturas, originalmente secas.

Como foi mostrado na Figura 7, após quatro meses de registros sísmicos os epicentros estão afastando-se dos poços que exploram as fraturas do basalto e também da área inicialmente de maior concentração epicentral (Figura 6), o que pode ser um indicativo de que a água que penetra as fraturas está alcançando distâncias cada vez maiores, como foi também observado em Presidente Prudente [1].

Os primeiros tremores de Andes foram percebidos pelos moradores cerca de oito meses após a perfuração dos poços (Figura 2), este atraso não é incomum e pode ser atribuído ao tempo necessário para que a água, percolando pelas fraturas do basalto, alcance pressões suficientes para provocar os sismos nas regiões originalmente instáveis. Em Nuporanga a atividade sísmica teve início logo após o término da perfuração, mas em Presidente Prudente os primeiros sismos ocorreram cinco anos após a perfuração do poço. Nos casos de sismicidade induzida por reservatórios hidrelétricos atrasos de vários meses são comuns [6].

Para a confirmação da hipótese de que os sismos de Bebedouro são induzidos pelos poços tubulares, será importante ampliar os estudos atuais sobre a movimentação de água na camada de basalto, realizando perfilagens térmicas e geofísicas dentro dos poços, que mostrariam a possível movimentação da água e a localização exata das fraturas. Contudo, para efetuar as perfilagens, será necessário retirar as bombas dos poços e, além disso, detectadas as possíveis fraturas de perda de água, poderia ser indicado o seu revestimento, e ambas as operações não são triviais pois demandam gastos.

Outra alternativa é aguardar que a Natureza se encarregue de estabilizar o meio natural que foi alterado pelas perfurações, e torcer para que a atividade sísmica diminua gradualmente.

Tendo em vista a auscultação da atividade sísmica na região de Bebedouro, as estações sismográficas do IAG/USP permanecerão em funcionamento durante um período de pelo menos um ano.

4 – AGRADECIMENTOS

Os autores expressam agradecimentos 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 geólogo José Luiz Spiller (Geominas) e ao Prof. H.K. Chang (UNESP) pelas profícuas discussões, à FCT/UNESP de Presidente Prudente pelo apoio, aos proprietários dos sítios onde as estações sismográficas foram ou ainda estão instaladas, aos meios de comunicação de Bebedouro e a 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.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yamabe, T. H. 1999. Estudos Geofísicos para Explicar a Sismicidade Induzida e Orientar a Exploração de Água Subterrânea em Nuporanga - SP. Tese de Doutorado, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [2] Yamabe, T. H.; Berrocal, J.; Leite, C. C. P.; Paula, B. Lima de. 2004. Por que alguns poços tubulares profundos provocam abalos sísmicos? I Simpósio de Geofísica, Regional Sul da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo. CD-ROM.
- [3] Evans, D.M. 1966. The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain arsenal disposal well. *Mountain Geologist*, v. 3, p. 23-6.
- [4] Bozovic, A. 1974. Review and appraisal of case histories related to seismic effects of reservoir impounding. *Engineering Geology*, 8: 9-29.
- [5] Brace, W.F. 1974. Experimental studies of seismic behavior of rocks under crustal conditions. *Engineering Geology*, 8: 109-27.
- [6] Assumpção, M.; Marza, V.; Barros, L.; Chimpliganond, C.; Soares, J.E.; Carvalho, J., Caixeta, D., Amorim, A. & Cabral, E. 2002. Reservoir induced seismicity in Brazil, *Pure Appl. Geophys.*, 159, 597-617.
- [7] Assumpção, M.; Freire, M. & Ribotta L.C. 1995. Sismicidade induzida no Reservatório de Capivara: resultados preliminares sobre localização de fraturas ativas. 4º Congresso Internacional da

Sociedade da Sociedade Brasileira de Geofísica, Resumos Expandidos. Rio de Janeiro (RJ), v. 2: 961-964.

[8] Yamabe, T.H. & Berrocal, J. 1991. A origem da atividade sísmica de Presidente Prudente (SP): induzida ou natural? 2º Congresso Internacional da Sociedade de Geofísica, Resumos Expandidos. Salvador (BA), Brasil, vol. 2: 521-528.

[9] Gupta, H.K. 1992. Reservoir - Induced Earthquakes. Elsevier.

[10] Barcha, S. F. & Arid, F. M. 1975. Origem das cachoeiras da Bacia do Alto Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 5, p. 120-135.

[11] Araújo, J. S. & Hasui, Y. 1985. Estruturas vulcânicas em basaltos no Vale do Rio Grande, São Paulo/Minas Gerais. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 5, 1985, São Paulo. Anais v. 1, p. 289-300.

[12] Guidicini, G. & Campos, J.O. 1968. Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, v. 17, p. 15-28.

[13] Giampá, C.E.Q. & Souza, J.C. 1982. Potencial aquífero dos basaltos da Formação Serra Geral no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2., 1982, Salvador. Anais. p. 13.

[14] Oliveira, A.M.S.; Silva, R.F. & Guidicini, G. 1976. Comportamento Hidrogeotécnico dos Basaltos em Fundações de Barragens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo : ABGE. v. 2, 413-429.

[15] Feitosa, F.A.C. & Manoel Filho, J. (Coords.). 2000. Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações, 2ª ed. CPRM/REFO, LABHID-UFPE.

[16] (<http://www.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro>)

[17] 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.

[18] Yamabe, T. H. & Berrocal, J. 2005. Seismic activity induced by deep water wells in Paraná Tectonic Province, Southeastern Brazil (em preparação).

Tabela 1. Catálogo de Sismos do IAG

Região: latitudes de -22.2 a -19.8; longitudes de -50.0 a -46.8

DATA	HORA (UT)	LAT	LONG	Localidade	Io	Raio	Magnitude	Comentários			
Ano	Mês	Dia	h	m	s	MM	km	mb			
1922	01	27	06	50	40	-22.17	-47.04	Mogi Guaçu SP VI	280	5.1	maior sismo do Sudeste
1959	05	25	23	08		-21.26	-48.69	Fern.Prestes SP IV-V		3.0	induzido poço artesiano?
1959	05	27	17	05		-21.26	-48.69	Fern.Prestes SP IV-V		3.0	induzido poço artesiano?
1959	05	29	06	55		-21.26	-48.69	Fern.Prestes SP IV-V		3.0	induzido poço artesiano?
1974	02	15				-20.04	-48.47	Conc.Alag. MG IV		3.0	induzido por reservatorio
1974	02	24	03	19	40	-20.04	-48.47	Conc.Alag. MG VI-VII	47	4.2	induzido por reservatorio
1974	02	27				-20.04	-48.47	Conc.Alag. MG V		3.5	induzido por reservatorio
1974	03	01	09			-20.04	-48.47	Conc.Alag. MG IV-V		3.2	induzido por reservatorio
1974	03	02	18	15		-20.04	-48.47	Conc.Alag. MG V		3.5	4 eventos
1977	09	04	15	45		-20.73	-47.77	Nuporanga SP III-IV		2.8	induzido poço artesiano
1978	03	17	20	45		-20.73	-47.77	Nuporanga SP IV		3.0	induzido poço artesiano
1978	03	18	01	30		-20.73	-47.77	Nuporanga SP IV		3.0	induzido poço artesiano
1978	07	25				-20.30	-48.90	Marimbondo SP		2.0	induzido por reservatorio
1980	07	03	22	10		-20.07	-47.33	Jaguara MG IV	4	2.8	(UnB/CEMIG)
1981	03	24	22	10	03	-20.58	-48.34	Barretos SP		2.8	(IAG,UnB)
1981	07	11	03	00		-20.80	-47.80	Orlandia SP		2.4	(IAG,UnB)
1983	12	27	17	03		-19.90	-47.90	Uberaba MG		2.2	(UnB)
1984	07	04	16	07	05	-20.20	-47.35	Estreito MG II		2.4	(UnB,IAG) sentido Faz.Pinhos
1986	02	07	01	40	48	-20.10	-46.80	S. Canastra MG		2.1	(UnB) explosao ?
1988	07	19	10	30		-20.73	-47.75	Nuporanga SP IV		3.0	(TV Globo, Rib.Preto)
1988	11	10	22	36	25	-20.31	-47.35	Franca SP		2.3	(UnB,IPT,IAG)explosão?
1989	05	23	22	57	58	-20.73	-47.75	Nuporanga SP IV-V	10	3.2	(IAG,UnB,IPT)
1989	06	01	21	40		-20.73	-48.07	Morro Agudo SP IV		3.0	(IAG)
1989	10	19	04	17		-20.73	-47.75	Nuporanga SP III		2.6	3 tremores (Pref.Mun.)
1989	12	18	11	46	26	-19.95	-47.16	Sacramento MG	IV	3.4	(IPT,UnB,IAG)
1990	01	19	22	05	15	-19.95	-47.16	Sacramento MG V-VI	40	4.2	(IPT,UnB,IAG,ON, UNESP)
1990	03	28	22	29	49	-21.90	-46.84	S.J.B. Vista SP		2.7	(IPT,IAG)
1990	03	29	02	05	05	-21.90	-46.84	S.J.B. Vista SP		1.9	(IPT,IAG)
1990	06	01	06	55	57	-19.95	-47.16	Sacramento MG II		2.6	(IAG,UnB,IPT)
1990	07	12	21	01	03	-21.86	-46.92	SJBoa Vista SP		2.4	(UnB, IPT, IAG)
1990	09	08	04	34	06	-20.90	-48.69	Monte Azul SP		2.3	(IAG, IPT, UNESP)
1991	09	06	03	35	47	-19.95	-47.16	Sacramento MG		2.3	(UnB,IAG)
1992	03	02	06	06	37	-20.01	-47.27	Sacramento MG IV		3.6	(IAG,UnB,IPT,UNESP)
1992	08	17	02	57	34	-20.98	-46.93	S.S. Paraiso MG IV		2.3	(IAG,IPT)
1992	09	13	01	10		-21.24	-48.42	Monte Alto SP IV		1.5	(IAG)
1992	10	01	15	05	53	-21.57	-47.01	S.J.R.Pardo SP		2.7	(IAG,IPT,UnB)
1993	09	01	10	40	05	-21.45	-47.13	StaRViterbo SP		2.2	(IAG,IPT) explosao ?
1993	09	01	10	43	24	-21.46	-47.13	StaRViterbo SP		2.3	(IAG,IPT) explosao ?
1993	09	17	09	58	40	-21.41	-47.18	StaRViterbo SP		2.5	(IAG,IPT) explosao ?
1994	07	07	21	22	13	-19.86	-46.96	Tapira MG		2.5	(UnB)
1995	05	26	19	43	44	-20.20	-47.65	Buritizal SP		2.9	(UnB)
1995	05	28	09	22	59	-20.93	-47.65	Batatais SP		2.7	(UnB)
1995	05	30	13	01	20	-20.92	-47.63	Nuporanga SP		2.6	(UnB, IAG)
1995	06	02	09	32	11	-20.54	-47.66	Sao Jose SP		2.9	(UnB)
1995	06	06	00	32	22	-20.32	-48.41	Guaira SP		2.8	(UnB,IPT,IAG)
1995	06	06	17	42	04	-21.02	-47.55	Altinopolis SP		2.5	(UnB)
1995	06	06	17	43	43	-21.03	-47.60	Altinopolis SP		2.7	(UnB)

1995 06 08 20 00 13	-20.86 -47.57	Batatais	SP		2.5	(UnB)
1996 02 23 23 27 08	-21.94 -48.68	Bariri	SP		2.9	(IPT,UNB,IAG,COPEL)
1996 03 25 17 45	-20.73 -47.75	Nuporanga	SP	V	0.9	(IAG,IPT)
1996 04 09 05 17	-21.29 -47.32	Cajuru	SP		2.8	(IPT)
1996 05 08 19 02 13	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	II	2.0	(IAG,IPT)
1996 05 09 05 17 02	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	IV	2.7	(IAG,IPT,UnB)
1996 05 10 15 11	-21.29 -47.32	Cajuru	SP		1.6	(IPT)
1996 06 06 20 32 59	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	III	1.4	(IAG,IPT)
1996 06 06 20 37 00	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	III	1.9	(IAG,IPT)
1996 06 22 18 20 32	-21.29 -47.32	Cajuru	SP		1.3	(IAG,IPT)
1996 06 28 14 20	-21.29 -47.32	Cajuru	SP		1.4	(IPT)
1996 10 28 22 02 48	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	IV	2.6	(IAG,IPT)
1996 12 20 03 20 02	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	III	2.2	(IAG)
1997 01 12 05 32 37	-21.29 -47.32	Cajuru	SP	IV-V	2.3	(IAG)
1997 02 10 04 13 39	-19.82 -47.25	Araxa	MG		2.4	(UnB)
1997 07 17 16 45 45	-20.82 -47.17	Antas	SP		2.9	(UnB)
1999 04 11 20 26 50	-20.05 -47.28	Jaguarinha	MG		2.9	(IAG,UnB,IPT)
2000 09 28 16 04 08	-20.93 -49.05	Catiguá	SP		3.4	(IAG,UnB)
2004 08 06 14 00	-21.19 -49.15	Marapoama	SP	IV	1.5	(IAG) varios eventos
2004 08 21 07 10 00	-21.19 -49.15	Marapoama	SP		0.7	(IAG) varios eventos
2005 03 11 05 38 26	-21.06 -48.50	Bebedouro	SP	IV	2.6	(IAG,UNESP-RC)
2005 03 30 11 41 14	-21.06 -48.50	Bebedouro	SP	V	2.9	H=001 (IAG,UNESP-RC)
2005 04 02 15 25 17	-21.06 -48.49	Bebedouro	SP	V	2.8	H=001 (IAG,UNESP-RC)

Io = intensidade máxima no epicentro, escala Mercalli Modificada

Raio = distância média (km) até onde o tremor foi sentido

magnitude mb = Magnitude Richter

Hora UT = horário local (Brasília) + 3 horas