



Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Os tremores de terra de Monte Alto e Pirangi, SP, de 2023

Relatório do Centro de Sismologia da USP



**Centro de Sismologia da
Universidade de São Paulo**

11 de Abril de 2023



Sumário

Pequenos tremores de terra foram sentidos em Março/2023 em Pirangi e também em Monte Alto, região NW do estado de São Paulo. As magnitudes não passaram de 2.3 na escala Richter. Pequenos tremores de terra já haviam sido sentidos nestas duas localidades em anos anteriores. Tremores com magnitude ~ 2 podem ocorrer em qualquer local do Brasil e não representam risco de danos mais sérios. Magnitudes abaixo de 4 na escala Richter raramente apresentam risco de algum dano significativo. A máxima intensidade (classificação dos efeitos observados pelos moradores) não passou de IV na escala Mercalli Modificada, correspondendo a barulho de portas, telhas e janelas vibrando, sem nenhuma observação de trinca.

A grande maioria dos tremores de terra no Brasil são causados pelas pressões geológicas atuando na parte superior da crosta terrestre (da superfície até ~ 5 ou 10 km de profundidade) e são ditos sismos "naturais". A região NW do estado tem um nível bastante baixo de tremores de terra naturais, raramente passando de magnitude 4.

Em alguns casos muito raros, tremores podem ser causados pela perfuração de um poço profundo para exploração de água de aquíferos fraturados e confinados nas camadas de basalto da formação Serra Geral. Esse fenômeno já ocorreu em pelo menos sete (7) outras localidades do NW paulista. Em nenhum destes casos anteriores de sismicidade induzida por poços, as magnitudes ultrapassaram ~ 3.5 na escala Richter, e em nenhum caso se observou dano significativo em casas ou quaisquer construções.

Não se sabe se estes tremores de Pirangi e Monte Alto têm causas "naturais" (o mais provável) ou se poderiam ter sido induzidos pela abertura de algum poço profundo (hipótese pouco provável). Só mesmo uma investigação mais detalhada, incluindo instalação de uma rede sismográfica junto com pesquisas sobre perfuração recente de poços profundos, permitiria saber se os tremores de Pirangi e Monte Alto foram induzidos. No caso de sismos induzidos por poços, é comum que os tremores ocorram preferencialmente logo após a estação das chuvas quando água do aquífero superior (solo ou arenito) alimenta o aquífero confinado inferior, aumentando a pressão de poro.

Tremores de terra são imprevisíveis. Não se pode prever como eles evoluem. Tremores em outras localidades na Bacia do Paraná, relacionados com perfuração de poços, duraram entre alguns meses a vários anos. Mas nenhum caso de dano sério foi registrado. É comum uma diminuição da quantidade e intensidade dos tremores ao longo dos meses, com alguns pequenos surtos ocasionais.

1. Introdução

Tremores de terra em Monte Alto e em Pirangi têm sido sentidos, e relatados ao Centro de Sismologia da USP, desde 2018 e 2020, respectivamente. As Tabelas 1 e 2 mostram a lista dos tremores conhecidos, seja pelo relato dos moradores à USP (através da ferramenta "Sentiu Aí?" do Centro de Sismologia: <https://www.sismo.iag.usp.br/eq/dyfi>), seja através dos registros das estações regionais da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR).

A estação da RSBR mais próxima (BB19B, Bebedouro) está a 14 km e 24 km de Pirangi e de Monte Alto, respectivamente. Devido às baixas magnitudes (com registros bem fracos) e às grandes distâncias das outras estações sismográficas permanentes da RSBR, não é possível determinar os epicentros com boa precisão. Normalmente os registros sismográficos dão incertezas de +- 5km, em média, no epicentro (Tabelas 1 e 2). Por este motivo, as informações e relatos de como os moradores sentiram os tremores são importantes e ajudam a melhorar as localizações epicentrais. A Fig. 1 mostra todos os locais relatados pelos moradores ao nosso sistema "Sentiu Aí?", desde 2018 até 10 de Abril de 2023.

Em Monte Alto, segundo informações da Secretaria de Meio Ambiente, os tremores de abril/2023 foram sentidos em alguns pontos da área rural: logo a NW da cidade e também 7 km a SW da cidade.

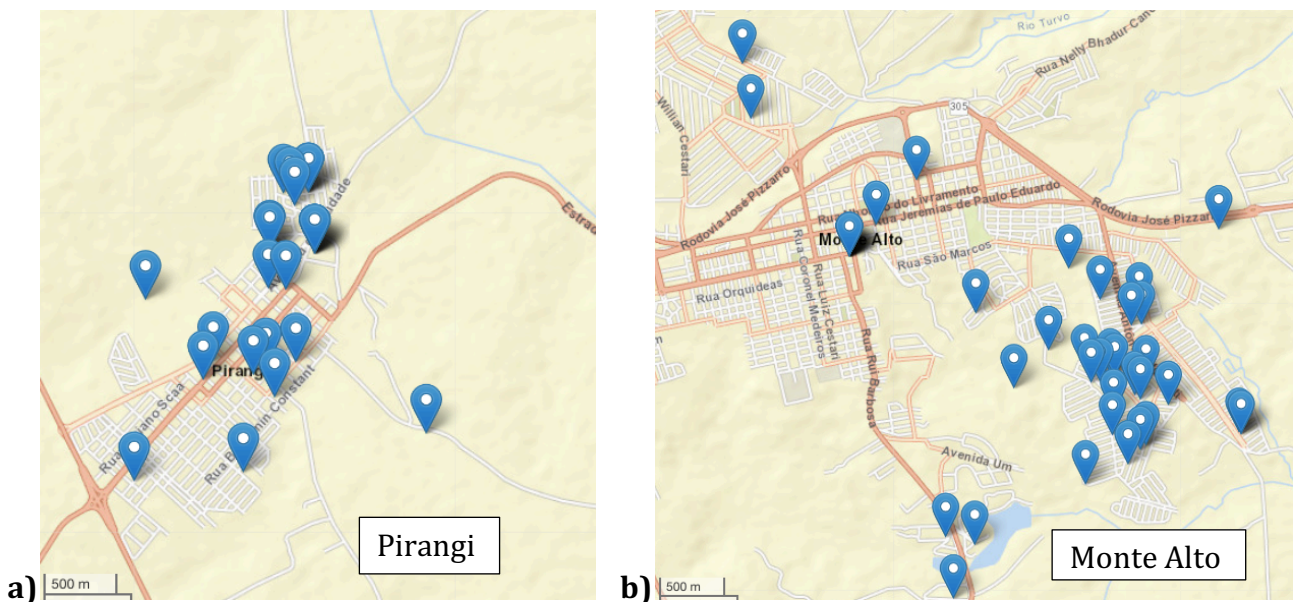


Fig. 1. Locais indicados por moradores onde os sismos foram sentidos, enviados à USP pelo sistema "Sentiu Aí?". a) relatos de 2020 a 2023-04-10 em Pirangi. b) relatos de 2018 até 2023-04-10 em Monte Alto.



Tabela 1. Sismos de **Monte Alto** cadastrados no catálogo do Centro de Sismologia da USP. A hora de ocorrência está em UTC (Hora Universal = Hora Local + 3hs). Os epicentros (Latitude e Longitude) são os determinados pelas estações regionais e têm incertezas ("erro") de 5 km pelo menos. O epicentro médio mais provável (baseado nos relatos das pessoas de Monte Alto) é: latitude -21.28 , longitude -48.48. "Tipo" é o modo de cálculo da magnitude Richter. "Io" é a intensidade máxima conforme os efeitos observados pelos moradores.

Ano-MM-DD	hh:mm:ss (UT)	Latitude	Longitude	erro (km)	Mag	Tipo	Io (MM)	USP ID
2018-06-04	04:00:00	-	-	-	1.0	ML	3	-
2020-03-09	02:18:36	-21.29	-48.43	5	2.0	mR	-	usp2020euku
2020-03-11	00:32:49	-21.31	-48.46	5	2.1	mR	-	usp2020exyh
2020-04-24	22:35:27	-21.28	-48.45	5	1.7	ML	4	usp2020icab
2020-06-25	01:02:57	-21.19	-48.45	5	2.0	mR	-	usp2020mjqq
2021-04-26	05:02:12	-21.35	-48.46	20	1.9	mR	-	usp2021icmv
2023-03-14	06:46:21	-21.31	-48.49	5	2.2	mR	4	usp2023fcbq
2023-03-14	06:47:20	-21.29	-48.51	5	2.0	mR	3	usp2023fcbr
2023-03-24	02:26:07	-21.28	-48.48	5	2.1	ML	4	usp2023fuab
2023-04-05	18:27:54	-21.25	-48.52	10	2.3	mR	3	usp2023grdv
2023-04-05	22:11:04	-21.31	-48.54	10	2.1	mR	4	usp2023grlf
2023-04-06	06:24:19	-21.34	-48.51	10	1.7	mR	3	usp2023gsbm

Tabela 2. Sismos de **Pirangi** cadastrados no Centro de Sismologia da USP. Os epicentros (Latitude e Longitude) são os determinados pelas estações regionais e têm incertezas ("erro") de 5 km pelo menos. O epicentro médio mais provável (baseado nos relatos das pessoas de Pirangi) é: latitude -21.09, longitude -48.66

Ano-MM-DD	hh:mm:ss (UT)	Latitude	Longitude	erro (km)	Mag	Tipo	Io (MM)	USP ID
2020-01-24	19:08:37	-21.08	-48.66	2	2.2	mR	-	usp2020brmm
2020-02-26	03:31:15	-21.09	-48.67	2	1.4	mR	-	usp2020dypd
2020-03-08	15:33:43	-21.09	-48.69	2	1.3	ML	2	usp2020etpn
2020-03-23	05:19:58	-21.07	-48.65	5	1.1	ML	3	usp2020fufu
2020-03-23	07:43:47	-21.08	-48.69	5	1.2	ML	4	usp2020fuko
2020-03-23	15:30	-	-	10	1.0	ML	3	Sentiu Aí
2020-03-23	16:23:44	-21.08	-48.68	5	2.4	mR	4-5	usp2020fvbs
2020-03-23	16:33:23	-21.07	-48.72	5	1.9	ML	3-4	usp2020fvcb
2020-03-25	08:20	-	-	10	1.0	ML	3	Sentiu Aí
2022-02-07	14:57	-	-	10	1.0	ML	3	Sentiu Aí
2022-03-16	22:47:51	-21.09	-48.69	10	2.1	mR	-	usp2022fgyj
2022-03-26	03:40:39	-21.09	-48.68	2	2.5	mR	-	usp2022fxtn
2022-03-26	14:04:03	-21.09	-48.67	2	1.3	ML	-	usp2022fyoc
2023-03-04	01:35	-	-	10	1.0	ML	3	Sentiu Aí
2023-03-14	08:34:12	-21.09	-48.66	5	0.8	MLv	3	usp2023fcfe
2023-03-14	14:57:18	-21.06	-48.67	5	2.2	mR	3	usp2023fcrv

2. Os tremores de Monte Alto de Março/2023

Vários tremores foram sentidos em Monte Alto em 2023, principalmente nos dias 14/03 (03:46 Hora Local) e 23/03 (23:26 Hora Local). A Fig. 2 mostra as datas e horas dos relatos recebidos pela USP e as datas dos sismos mais fortes correspondentes. A Fig. 3 mostra os locais mais afetados pelos dois tremores principais de Março/2023.

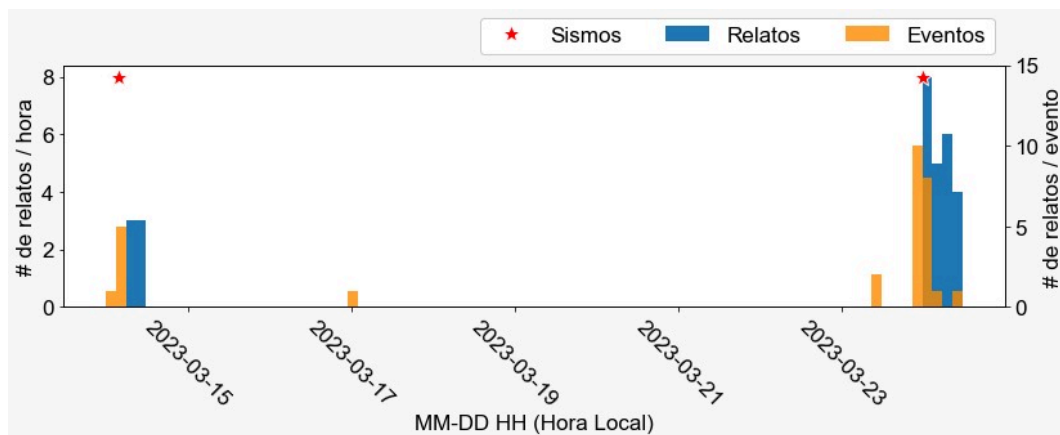


Fig. 2. Histograma dos relatos dos principais tremores de 14 e 23-Março-2023. Barras azuis mostram as horas de envio dos relatos; barras laranja indicam as horas de ocorrência indicadas pelos "sismonautas"; as estrelas vermelhas são as horas de ocorrência dos dois sismos principais conforme registro nas estações sismográficas.



Fig. 3. Locais dos relatos dos sismos de 14 e 24/03 (balões vermelhos) com as intensidades estimadas. Pinos amarelos são os bairros mais afetados de acordo com os relatos e a midia. Círculo azul no canto inferior direito é o Poço da SABESP aberto em 2020.



3. Análise dos Registros de Monte Alto

A Fig. 4a mostra os registros em Bebedouro das ondas sísmicas filtradas na faixa de 1 a 4 Hz para realçar as ondas de superfície (ondas Rayleigh). Os traços estão alinhados pela onda de superfície, e a barra vertical indica a chegada da primeira onda (onda P). Nota-se que os sismogramas são muito parecidos, mas não são todos idênticos. Isso significa que os epicentros estão todos próximos, mas não estão na mesma fratura. Nota-se que os sismogramas de cada ano são mais parecidos entre si. Aparentemente, os epicentros mudam ligeiramente a cada ano de atividade.

A Fig. 4b mostra a chegada das ondas P e S, usando-se filtros de 10-20 Hz, alinhadas pela chegada das ondas P (mesma marca anotada na Fig. 4a).

As diferenças de tempo de chegada entre a onda P e as de superfície dão uma ideia aproximada das diferenças de localização dos epicentros em cada surto anual. Os dados da Fig. 4 indicam que as diferenças entre os vários epicentros não passam de ~5 km. Os epicentros dos sismos de 2020-03-09 e de 2020-06-25 devem estar ~5 km mais longe de Bebedouro quando comparado com os epicentros dos outros tremores.

4. Causa dos tremores de terra

4.1 Tremores "naturais"

Todo tremor de terra é um deslizamento (ou "escorregão" repentino) entre blocos de rocha, ocorrendo em alguma falha ou fratura geológica. A grande maioria dos tremores no Brasil têm causas naturais, i.e., o deslizamento de blocos resulta das grandes pressões geológicas atuando crosta terrestre. A Fig. 5 mostra a atividade sísmica do Brasil, e pode-se ver que tremores bem mais fortes do que os observados em Pirangi e Monte Alto são bastante comuns em outras partes do Brasil. Na região Sudeste, o maior tremor de que se tem notícia ocorreu em 1922 com epicentro em Mogi-Guaçu / Sto. Antônio do Pinhal e magnitude 5.1. Foi sentido em boa parte do estado de São Paulo, Sul de Minas Gerais e até no Rio de Janeiro. As vibrações no epicentro de um sismo de magnitude 5 são ~500 vezes mais fortes do que um de magnitude 2. A Fig. 5 mostra que o Estado de São Paulo é uma das regiões de menor atividade sísmica do país.

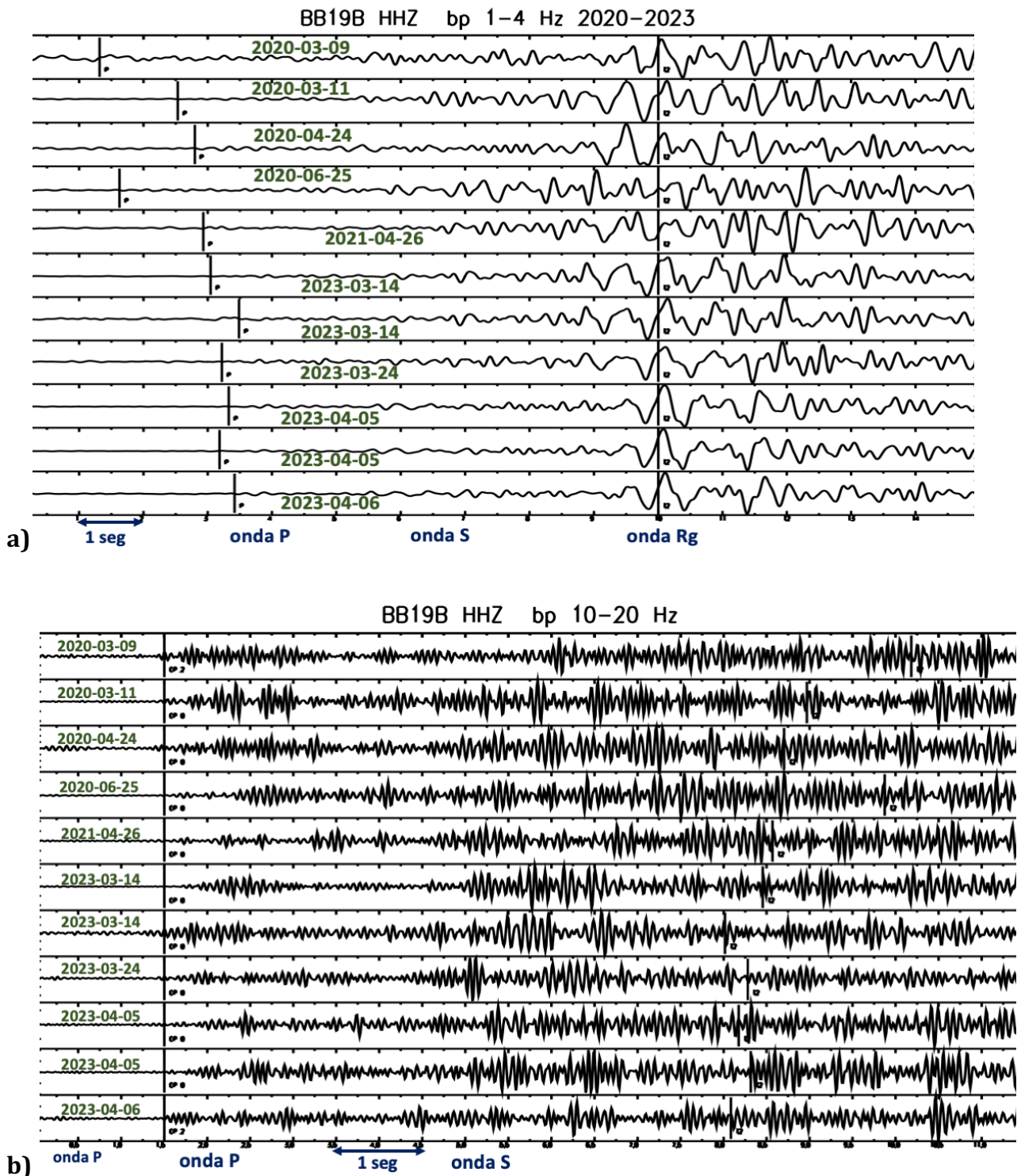


Fig. 4. Registro (componente vertical) dos tremores de Monte Alto de 2020 a 2023 (Tabela 1) na estação de Bebedouro (BB19B). **a)** traços filtrados na faixa de 1-4Hz e alinhados pelas ondas de superfície. A marca vertical é a chegada das ondas P (lidas com outro filtro). **b)** Traços alinhados pela chegada da primeira onda (onda P) e filtrados na faixa de 10 a 20 Hz.

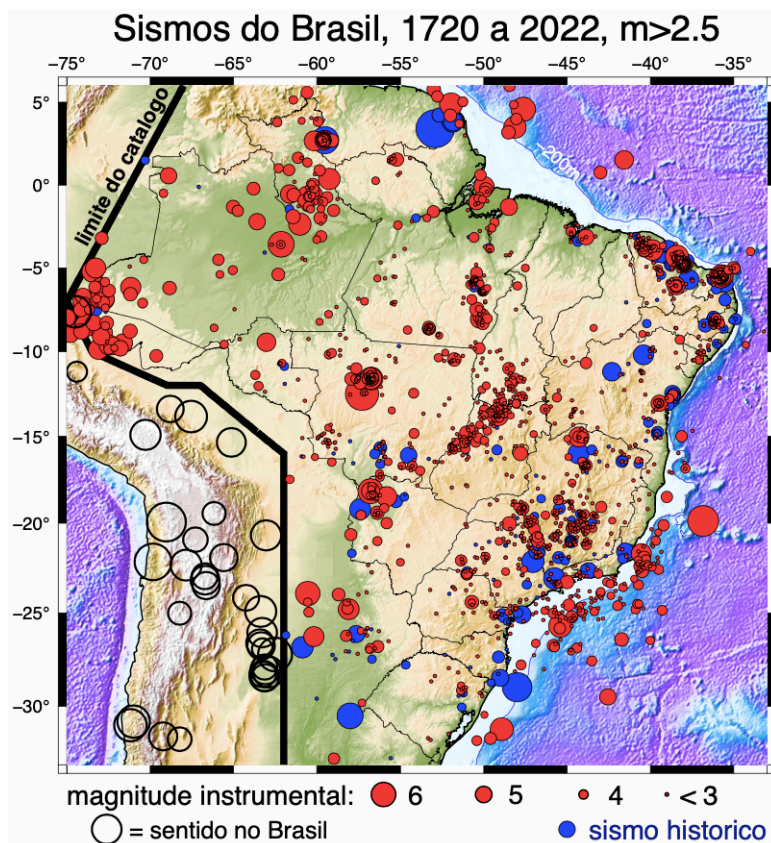


Fig. 5. Epicentros do catálogo de sismos do Centro de Sismologia da USP. Apenas magnitudes > 2.5 são mostrados. Círculos azuis são sismos antigos estudados pelos efeitos relatados em jornais, círculos vermelhos são epicentros determinados por estações sismográficas.

4.2 Tremores "Induzidos"

Em alguns casos muito raros, esse deslizamento (ou "escorregão") pode ser facilitado por alguma atividade humana, como construção de uma barragem alta com um grande reservatório hidrelétrico, ou pela perfuração de algum poço profundo. A esses tremores se dá o nome de "induzidos". No Brasil mais de 20 casos de reservatórios já provocaram tremores induzidos (Assumpção et al., 2002; Barros et al., 2018).

No NW do estado de São Paulo, diversos casos de tremores induzidos por poços já ocorreram: Fernando Prestes (1959); Nuporanga (1977-1978; 1989); Bebedouro (2004-2009), Jurupema/Taquaritinga (2016-2019), e Sales Oliveira (2019-2020 e 2023), estudados respectivamente por Berrocal et al. (1984), Yamabe e Hamza (1996), Assumpção et al. (2009, 2010), Assumpção et al. (2022), e Fresneda-Hincapie (2022). A Fig. 6 mostra esses locais.

Em todos os casos, explorava-se o aquífero fraturado e confinado nas camadas da formação Serra Geral. Os tremores ocorrem quando o poço interliga o aquífero livre (solo ou camada sedimentar do Grupo Bauru) com o aquífero profundo. Isso permite que água do aquífero raso entre no aquífero profundo aumentando a pressão da água em alguma fratura ou falha geológica, "lubrificando" a superfície de contato entre os blocos (ou diminuindo seu

coeficiente de atrito). Esse pequeno aumento de pressão do aquífero confinado pode ser suficiente para provocar tremores se a região já tiver tensões geológicas altas. Esse mecanismo foi bem demonstrado por Assumpção et al. (2010) com os tremores de Bebedouro de 2004 a 2009, usando várias técnicas geofísicas e sismológicas.

As principais características dos tremores causados pela abertura de um poço profundo são:

- os tremores se iniciam logo após a abertura do poço, entre poucos dias e algumas semanas.
- nos casos em que os poços não são cimentados na parte do aquífero livre superior, e não são bombeados durante a estação chuvosa, pode haver recorrência da atividade sísmica por alguns anos logo após cada estação das chuvas.
- os epicentros dos tremores não costumam se concentrar em uma única fratura ou falha geológica, mas geralmente ocorrem dispersos por uma área de vários km. Os epicentros iniciais costumam estar a menos de ~ 1 km do poço, com tendência de aumento da área de atividade.

As magnitudes dos sismos induzidos por poços muito raramente passam de 3.0 na escala Richter e nenhum dano sério foi constatado até agora. A Fig. 7 mostra um esquema explicativo do mecanismo de indução de tremores pela abertura de um poço novo.

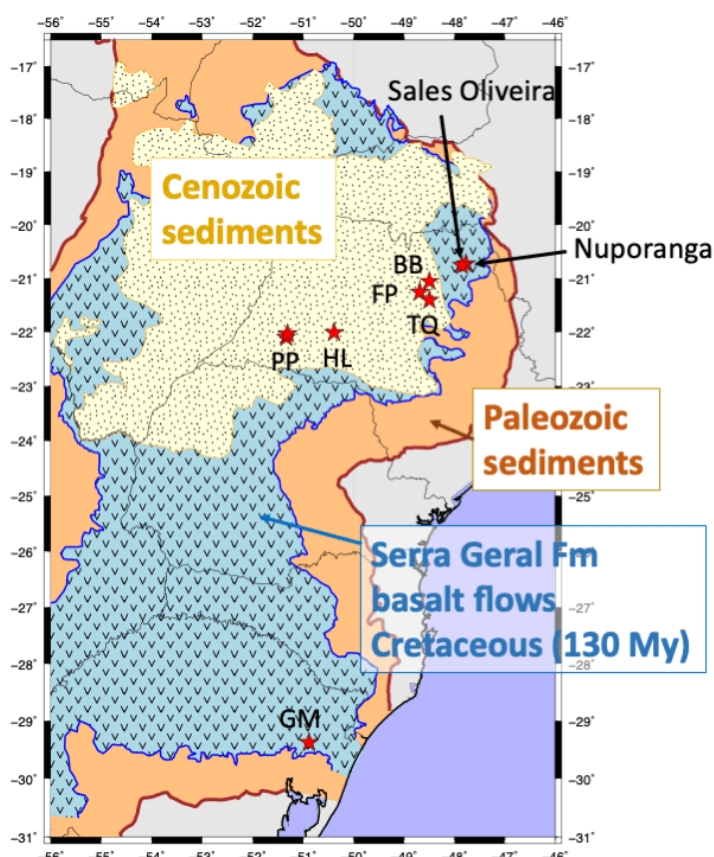


Fig. 6. Casos conhecidos de tremores induzidos pela abertura de poços profundos na Bacia do Paraná. BB = Bebedouro, FP = Fernando Prestes, TQ = Taquaritinga, HL = Herculândia, PP = Presidente Prudente, GM = Gramado, RS. (ref. Assumpção *et al.*, 2022).

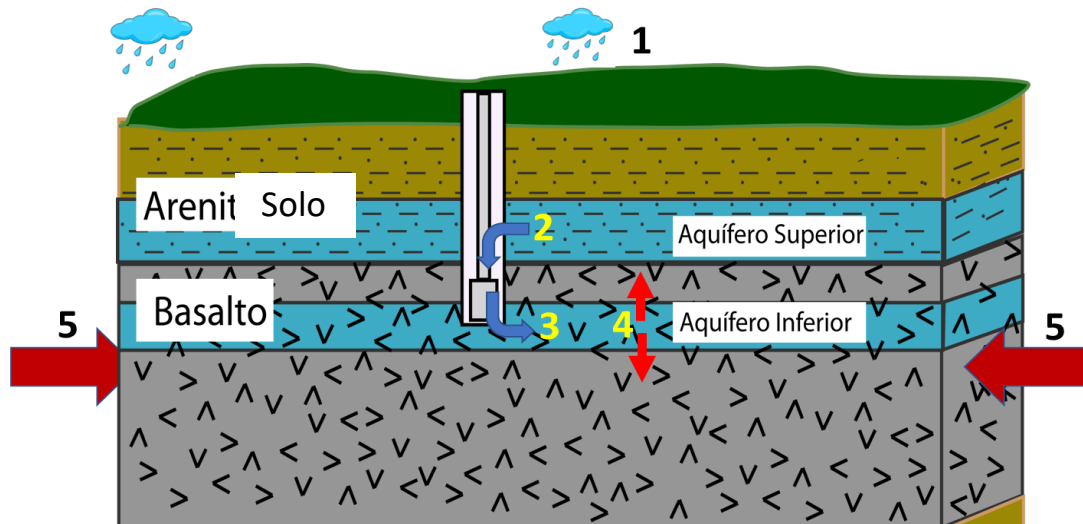


Fig. 7. Possível mecanismo de geração dos tremores: 1) a chuva recarrega o aquífero livre superior na camada de Solo ou Arenito. 2 e 3) a perfuração do poço permite que água do aquífero superior alimente o aquífero confinado inferior. 4) mais água no aquífero inferior aumenta a pressão da água ("pressão de poro") que tende a abrir as fraturas. 5) as tensões geológicas pré-existentes (setas vermelhas) já eram altas e geram deslizamento de blocos (tremores) facilitado pela maior pressão (4) da água.

5. Os tremores de Pirangi e de Monte Alto foram induzidos por poços ?

A grande maioria dos tremores de terra têm origem natural. Considerando que centenas de poços profundos são perfurados anualmente sem acarretar nenhum tremor perceptível, casos induzidos por poços são fenômenos raríssimos. Apenas nos casos em que as pressões geológicas já estejam em situação muito crítica e próximas do deslizamento, é que ocorrem tremores de terra. Somente uma investigação mais detalhada com sismógrafos locais, junto com mais informações sobre a perfuração e operação de poços recentes em Pirangi e em Monte Alto, permitiriam uma conclusão mais segura.

Os únicos fatores que favorecem a hipótese de indução por poços são:

- Os tremores têm sido recorrentes, geralmente logo após o pico da estação chuvosa (geralmente em Março ou Abril),
- Os epicentros parecem estar distribuídos em várias fraturas ou pequenas falhas próximas e não apenas numa única falha geológica, padrão mais comum em sismos naturais recorrentes.
- Pirangi e Monte Alto estão próximas de Fernando Prestes, Bebedouro e Taquaritinga, locais onde tremores induzidos por poços já ocorreram antes.



Por outro lado, os fatores desfavoráveis à hipótese de indução são:

- a) Não temos ainda informações sobre poços profundos próximos aos epicentros e que tenham sido perfurados recentemente, tanto em Pirangi como em Monte Alto. Ou mesmo poços perfurados algumas semanas ou poucos meses antes de cada surto anual de sismicidade.
- b) O poço P-15 da Sabesp em Monte Alto (mostrado na Fig. 3) terminou de ser perfurado em 19-Março-2020. Como foi cimentado na parte do arenito (primeiros 103.5m), não deveria permitir que água do aquífero livre entrasse no aquífero inferior confinado, mesmo quando não estivesse sendo bombeado.
- c) Os tremores de 2020 e de 2023 parecem muito longe do poço (Fig. 1b e Fig. 3). Não há informações sobre tremores sentidos na zona rural mais próxima do poço P-15.

6. Conclusão

Os tremores de Pirangi e Monte Alto ocorridos nos últimos anos tiveram magnitudes bem pequenas, não ultrapassando 2.5 na escala Richter. Essas baixas magnitudes não causam danos sério em construções normais. Não é possível saber se essas séries de tremores foram induzidas por poços profundos pela falta de informações mais detalhadas. A causa mais provável é que os tremores sejam "naturais", i.e., deslizamentos em pequenas fraturas na crosta superior causadas por pressões geológicas regionais.

Mesmo que os tremores tenham relação com perfuração de poços (hipótese pouco provável), o histórico deste tipo de tremor no Estado de São Paulo indica que a chance de danos mais sérios (trincas ou rachaduras em casas normais) é muito pequena.

Agradecimentos

Agradecemos à Secretaria de Meio Ambiente de Monte Alto pelas informações sobre o Poço P-15 da SABESP.



Centro de Sismologia da
Universidade de São Paulo

11/04/2023



Referências

- Assumpção, M., V. Mârza, L. Barros, C. Chimpliganond, J.E. Soares, J. Carvalho, D. Caixeta, A. Amorim & E. Cabral, 2002. Reservoir induced seismicity in Brazil, *Pure Appl. Geophys.*, 159, 597-617. DOI: [10.1007/PL00001266](https://doi.org/10.1007/PL00001266)
- Assumpção, M., T.H. Yamabe & J.R. Barbosa, 2009. Sismos induzidos por poços de água na Bacia do Paraná. *Boletim da SBGf 2009*, N1, p 15-18.
- Assumpção, M., T. H. Yamabe, J. R. Barbosa, V. Hamza, A. E. V. Lopes, L. Balancin, & M. B. Bianchi, 2010. Seismic activity triggered by water wells in the Paraná Basin, Brazil, *Water Resour. Res.*, 46, W07527, doi:10.1029/2009WR008048.
- Assumpção, M., J. Convers, A. Hincapie-Fresneda, J.R. Barbosa, D. Rosa, L. Galhardo & J. Calhau, 2022. Seismicity induced by the opening of water wells in the Paraná Basin, SE Brazil: a Common occurrence. *IV Regional LACSC Assembly (Latin American and Caribbean Seismological Commission)*, Quito, October, 2022. Abstract.
- Barros, L.V., Assumpção, M., Ribotta, L.C., Ferreira, V.M., de Carvalho, J.M., Bowen, B.M. and Albuquerque, D.F., 2018. Reservoir-triggered seismicity in Brazil: Statistical characteristics in a midplate environment. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 108(5B), 3046-3061. Doi: [10.1785/0120170364](https://doi.org/10.1785/0120170364)
- Berrocal, J., M. Assumpção, R. Antezana, C.M. Dias Neto, R. Ortega, H. França & J. Veloso, 1984. Sismicidade do Brasil. *IAG-USP/CNEN*, São Paulo, 320 pp.
- Fresneda-Hincapie, A., 2022. Estudo da sismicidade em Sales Oliveira, SP. *Dissertação de Mestrado*, IAG-USP, Março, 2022.
- Yamabe, T.H. & Hamza, V.M., 1996. Geothermal investigations in an area of induced seismic activity, northern São Paulo State, Brazil. *Tectonophysics*, 253(3-4), pp.209-225.