

MARCAS DE TERREMOTOS PRÉ-HISTÓRICOS NA REGIÃO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO*PREHISTORICAL EARTHQUAKES RECORD IN THE WESTERN PORTION OF THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL*

Mario Lincoln De Carlos ETCHEBEHERE¹; Antonio Roberto SAAD^{1,2}; Fabio da Costa CASADO¹;
Ivan Cláudio GUEDES³

Resumo: Sabe-se que o território brasileiro, mercê de sua posição na placa tectônica da América do Sul, apresenta eventos sísmicos de baixa frequência e pequena magnitude, o que não implica dizer que o País seja infenso a riscos dessa natureza. Tendo em conta este quadro e o fato de a ocupação do interior datar de poucas décadas, há que se buscar no registro geológico, as evidências que permitam estabelecer se ocorreram sismos expressivos, qual o porte desses eventos e quais as áreas afetadas. Isso compete à Paleossismologia, ramo das Geociências que se ocupa do estudo dos terremotos pré-registros instrumentais. O registro geológico, em especial os sedimentos e as rochas sedimentares cenozóicas, pode guardar estruturas que possibilitam análises paleossismológicas, dentre as quais as chamadas estruturas de liquefação ou sismitos correspondentes a intrusões e extrusões de areia e/ou silte. O potencial desse tipo de análise pode ser avaliado com base em informações auferidas no vale do Rio do Peixe, região ocidental paulista, onde o estudo da tipologia, porte e distribuição de diques, *sills* e vulcões de areia em depósitos de terraços aluviais neoplestocenos possibilitou definir a incidência de 3 grandes sismos na região, entre 34 ka. e 10 ka. AP, todos com magnitude superior a 5,5. O maior evento, designado “B-M”, teria alcançado magnitude 6,4, similar às maiores manifestações sísmicas conhecidas em território brasileiro. A abordagem paleossismológica pode ser uma ferramenta muito útil na avaliação de riscos sísmicos no território brasileiro, em especial por ser aplicada a eventos de magnitude mais expressivas, com maior potencial de infligir danos e perdas à Sociedade.

Palavras-chave: Paleossismologia. Estruturas de liquefação. Sismitos. Planalto Ocidental Paulista. Cenozóico. Terremotos.

Abstract: The Brazilian territory is characterized by a low magnitude and a low frequency seismic activity, due to, mainly, its position in the South-American tectonic plate. In spite of this, our territory is not avoided of seismic risk. The seismic knowledge about Brazil is very poor yet, especially because the interior territorial occupation dates no more than a few decades. Fortunately, strong earthquakes often print geologic impressions in the Cenozoic sedimentary record, and these evidences, herein referred as seismites, might be investigated. The study of this past ground effects from “fossil” earthquakes is pertinent to a branch of the Geosciences know as Paleoseismology. Among the seismites, one can includes features derived from seismic shake liquefaction, that encompasses dykes, sills and sand volcanoes. Their size, type, frequency and distribution provide good clues to define ancient earthquakes, including the meizoseismic zone delimitation and magnitude estimations. This paper presents some example of seomite occurrences in the Rio do

1 - Universidade Guarulhos- UnG. Rua Nilo Peçanha, 81- Guarulhos, São Paulo. Cep – 07011-040; e-mail: metchebehere@ung.br

2 - Universidade Estadual Paulista – UNESP. Departamento de Geologia Aplicada, Rio Claro.

3 - Mestrando, Programa de Mestrado em Análise Geoambiental – MAG; Universidade Guarulhos; Bolsista do Programa Bolsa Mestrado da Secretaria da Educação do Estado de São Paulo; Docente do Colégio Mater Amabillis – Guarulhos – SP

Peixe valley, western portion of the State of São Paulo. In that area, the paleoseismologic analysis allowed the definition of three expressive past earthquakes during the period comprising 34 ka. and 10 ka. BP, all of them with magnitudes greater than 5,5. The magnitude of that biggest one has been estimated in 6.4, similar to the greatest historic earthquakes in Brazil. It means, without no doubt, that seismic risks should be evaluated using the paleoseismologic approach, in order to avoid or minimize injuries and economic losses to the Society.

Keywords: Paleoseismology. Liquefaction structures. Seismites. Western São Paulo State Plateau. Cenozoic. Earthquakes.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde que se afigurou como um dos grandes paradigmas das Geociências, há quase meio século, a *Teoria da Tectônica de Placas* tem propiciado explicações elegantes para grandes feições e fenômenos geológicos que ocorrem no nosso Planeta, em especial nos limites das chamadas Placas Tectônicas (e.g., vulcanismo, sismicidade, existência de grandes cordilheiras, localização de fossas oceânicas). Todavia, os processos tectônicos que atuam no interior das grandes placas litosféricas permanecem pouco compreendidos (Figura 1).

Sabe-se que não são terrenos inertes, estáveis; ao contrário, mostram diversos pontos onde há acúmulo de tensões, as quais, quando liberadas de maneira súbita, dão origem a terremotos expressivos. Apesar de a sismicidade ser um processo mais característico — tanto pela frequência como pela magnitude — de limites de placas litosféricas, o interior dos continentes não está imune a estes fenômenos. Os danos, nestas regiões, também podem ser consideráveis, o exemplo do terremoto de Killari, Índia (29.09.1993, magnitude 6,4), quando 20 vilarejos foram destruídos e aproximadamente 10.000 pessoas morreram. Ou quando ocorreu o terremoto de Newcastle, Austrália (17.12.1989, magnitude 5,5), que provocou, além da morte de 12 pessoas, perdas materiais superiores a um bilhão de dólares americanos. Ou ainda, a série de grandes sismos na região de New Madrid, no vale do rio Mississippi, EUA, que ocorreu no início do século XIX, tendo afetado uma área superior a 650.000 km², colocando-se entre os maiores fenômenos do gênero incidentes no continente norte-americano.

A prevenção de terremotos ainda é um campo aberto de estudos. Mesmo em regiões relativamente muito estudadas, tais como a da Falha de San Andreas, na Califórnia, ou a da Falha Norte Anatólia, na Turquia, a previsibilidade ainda está longe de ser alcançada. Existem regiões aonde o

registro de terremotos vem sendo feito há mais de 3.000 anos, como na China, o que possibilita analisar uma longa série desses eventos, sem que haja um padrão bem estabelecido de recorrência sísmica. Determinadas áreas podem ficar inertes durante séculos seguidos, para, subitamente, ser atingidas por um terremoto de grande magnitude. O que dizer, então, de áreas ocupadas há menos tempo, como boa parte do território brasileiro, onde não se dispõe de registro instrumental sistemático de dados sísmicos ou até mesmo de qualquer tipo de informação sobre abalos? Sabe-se que não são áreas estáticas, pois, ocasionalmente registram-se tremores de terra, que causam susto e intranquilidade momentânea à população local, ou até mesmo alguns danos materiais, tal como ocorreu, nos anos 1980, na região de João Câmara, RN. Existe, nesses casos, a agravante quando tais eventos incidem em áreas onde não existe preparo, tanto do tipo de construções civis, bem como da própria educação da população ali residente, para enfrentar esse tipo de fenômeno.

Mas, afinal, o território brasileiro pode ser palco de um terremoto de elevada magnitude, capaz de provocar perdas e danos? Quais regiões estariam mais sujeitas a isso? Haveria alguma maneira de se melhorar o entendimento geológico para se buscar essas respostas? Valeria a pena priorizar investimentos em pesquisa sobre este tipo de risco? Que informações seriam necessárias? Como buscá-las? Que procedimentos preventivos adotar?

Objetivando contribuir para a busca de algum esclarecimento sobre o tema, o presente artigo procura mostrar que terremotos expressivos ocorreram no oeste paulista em tempos geologicamente recentes, tendo deixado marcas que podem ser detectadas, analisadas e interpretadas, possibilitando-nos ferramentas úteis e práticas para o estudo dos terremotos que incidiram naquela região e também para a avaliação do risco sísmico relacionado a futuros eventos. É este o campo de trabalho da chamada *paleossismologia*,

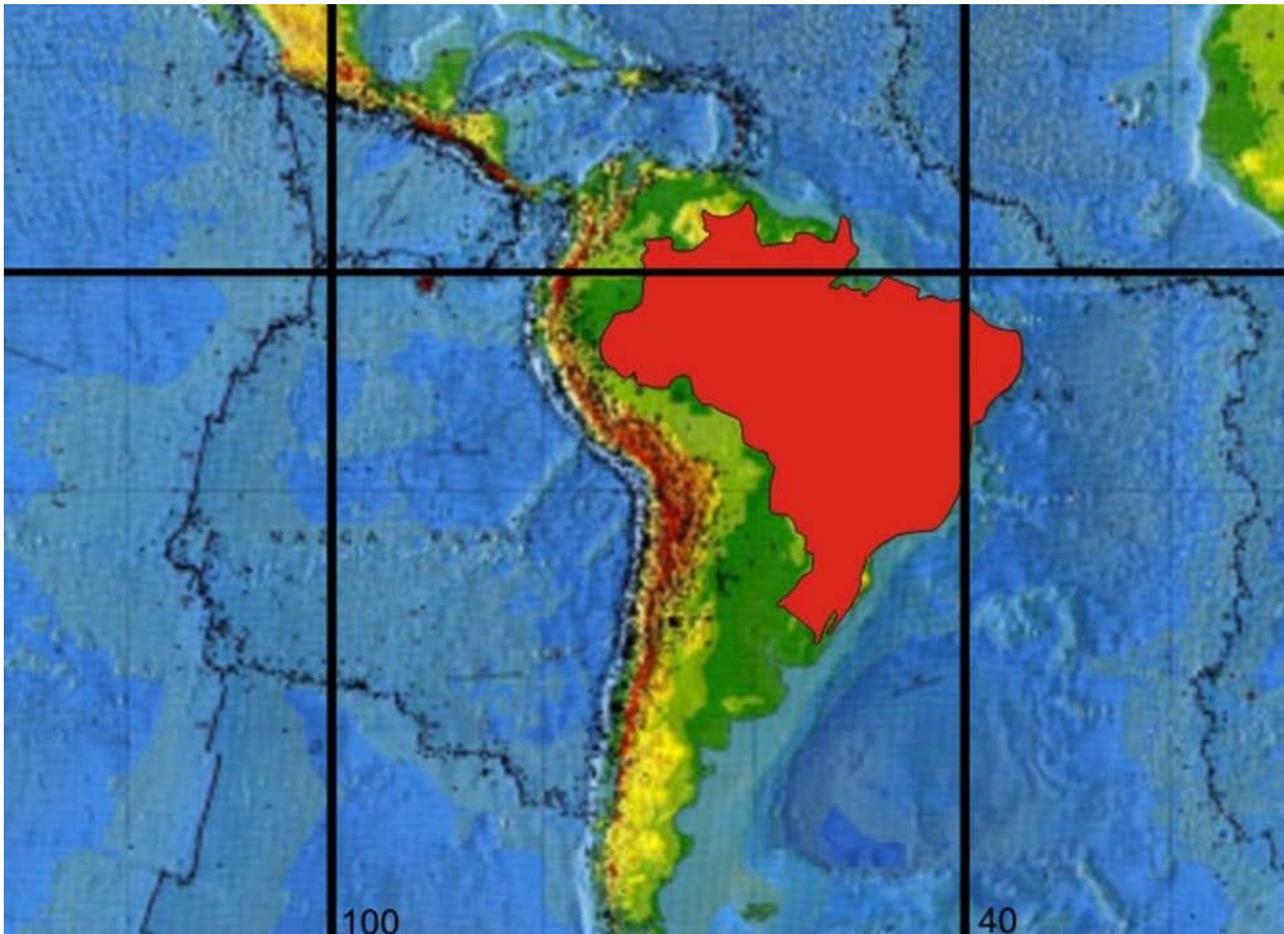


FIGURA1: Posição do território emerso brasileiro na placa tectônica da América do Sul. Os limites da placa são marcados pela grande incidência de vulcões e epicentros sísmicos. Extraído de Simkin et al. (1994).

FIGURE 1: The Brazilian territory position in the South-American tectonic plate. The tectonic plate limits are marked by high frequency volcanoes and seismic epicenters. From Simin et al. (1994).

o ramo das Geociências que estuda os terremotos pré-históricos. O que as marcas dos terremotos que incidiram no oeste paulista em tempos relativamente jovens podem nos ensinar?

CONCEITOS BÁSICOS

A *paleossismologia* ocupa-se do estudo dos terremotos pré-históricos, incluindo suas características, com destaque para a delimitação da zona de maior deformação em superfície (*zona meizossísmica*). No contexto da região ocidental paulista, podemos entender terremotos pré-históricos como sendo aqueles que ocorreram nesta parte do território antes da entrada do colonizador de origem européia.

Outro conceito de capital importância para os propósitos de um item sobre paleossismologia é aquele

referente à caracterização de uma *falha ativa*. Sabemos que os terremotos têm origem em um movimento de falha, i.e., configuram-se como liberação de uma quantidade variável de energia gerada pela movimentação da descontinuidade. A designação “falha ativa” surgiu por ocasião do terremoto de 1906 na Califórnia, EUA, quando a Falha de San Andreas apresentou um deslocamento lateral de 6 m. O adjetivo “recente”, no caso de uma movimentação de falha, é bastante discutível, pois pode ser entendido de várias maneiras. Assim, por exemplo, o California State Mining and Geology Board classifica como falha “ativa” aquelas descontinuidades que tenham apresentado movimentação durante o Holoceno (últimos 10.000 anos) e como falhas “potencialmente ativas” as descontinuidades que tenham se movimentado durante o Quaternário (os últimos 1,65 milhão de anos do tempo geológico). Outras organizações são mais rigorosas, como a U.S. Nuclear Regulatory Commission que, para selecionar

sítios apropriados à instalação de usinas nucleares, define uma descontinuidade como “capaz” (*capable*) de vir a apresentar novas movimentações, se ela esteve ativa pelo menos uma vez nos últimos 50.000 anos, ou ainda, se ela movimentou-se mais de uma vez nos últimos 500.000 anos.

MARCAS DE UM TERREMOTO

A partir do *foco* (ou *hipocentro*), que é o ponto em profundidade, na litosfera terrestre, onde se inicia o sismo, se espalham ondas sísmicas em todas as direções. Destas, as mais importantes são as chamadas *ondas de corpo*, que percorrem todo o interior do Planeta Terra, e as designadas *ondas de superfície*, em grande parte responsáveis pelos maiores danos de um terremoto. A passagem destas ondas elásticas pelas rochas e sedimentos provoca determinadas oscilações, que podem até ser amplificadas, a depender da quantidade de energia liberada no sismo e da susceptibilidade geológica do meio físico oscilante. Dentre tais fenômenos, encontram-se os chamados processos de liquefação, capazes de provocar danos consideráveis em construções e de deixar marcas – as chamadas *estruturas de liquefação* – que podem indicar a área de maior deformação, o possível epicentro, e a magnitude do sismo. Nesse aspecto reside a importância prática do estudo de tais estruturas.

A possibilidade de se posicionar as zonas mais afetadas por vibrações em eventos sísmicos pretéritos afigura-se como uma abordagem bastante interessante para áreas onde não se dispõe de registro histórico de sismicidade e/ou onde os planos das falhas geradas por terremotos não podem ser visualizados em superfície, seja pela própria característica de alguns falhamentos (*e.g.*, *falhas cegas*, que não atingem a superfície), seja pelas condições desfavoráveis de preservação dos seus traços devido à ação de processos dinâmicos de superfície, como a erosão.

O PROCESSO DE LIQUEFAÇÃO

A liquefação é um processo que afeta com maior frequência sedimentos arenosos ou siltosos, os quais, diante de determinadas vibrações sísmicas, perdem a consistência e passam a se comportar como um fluido viscoso. Tais vibrações provocam mudanças na estrutura de um sedimento incoeso, levando a um rearranjo da trama granular, com transferência de tensão dos pontos

de contato entre os grãos para os fluidos intersticiais. Essa transferência de pressão pode atingir, subitamente, um estado crítico, com os grãos perdendo contato entre si (*floating process*) e partes do leito granular passando a se comportar como um fluido, injetando-se em fraturas e cavidades pré-existentes, ou mesmo gerando novas fraturas. Atingindo a superfície, podem dar origem a jorros de areia fluidizada, que formam construções chamadas vulcões de areia (*blows*) – Figura 2. Em termos de intrusões, podem ocorrer diques, *sills* e estruturas em forma de brechas (blocos da rocha encaixante fragmentada, envoltos pelo material liquefeito) (Figuras 3, 4 e 5).

As condições que favorecem o processo de liquefação podem ser resumidas nos seguintes quesitos:

- incidência de sismos com magnitude igual ou superior a 5 (as estruturas se tornam mais frequentes acima do limiar 5,5). Tal magnitude já representa energia suficiente para causar danos em construções mais frágeis;
- presença de sedimentos incoesos, preferencialmente areias ou areias siltsosas, como aqueles encontrados em várzeas de rios, lagoas e planícies costeiras. Rochas ou sedimentos coesos ou insaturados não chegam a se liquefazer;
- os sedimentos devem estar saturados, implicando em nível de lençol freático pouco profundo;
- os processos de liquefação tendem a ocorrer a pequenas profundidades, normalmente até 10 m, raramente ultrapassando os 15 m.

COMO PODEM SER MAPEADOS OS PALEOSSISMOS?

As estruturas de liquefação têm servido como ferramentas geológicas adequadas ao reconhecimento e à caracterização de eventos paleossísmicos. Um dos métodos utilizados pelo Serviço Geológico Norte-Americano - USGS, designado, em uma tradução livre, Método Delimitador de Magnitude Sísmica (*Magnitude-Bound Method*), pode ser assim resumido:

- Parte-se da premissa que as feições de liquefação são mais frequentes e possantes quanto mais próximas estiverem da zona mais intensamente afetada pelas vibrações (a chamada *zona meizossísmica*), vide Figura 6;

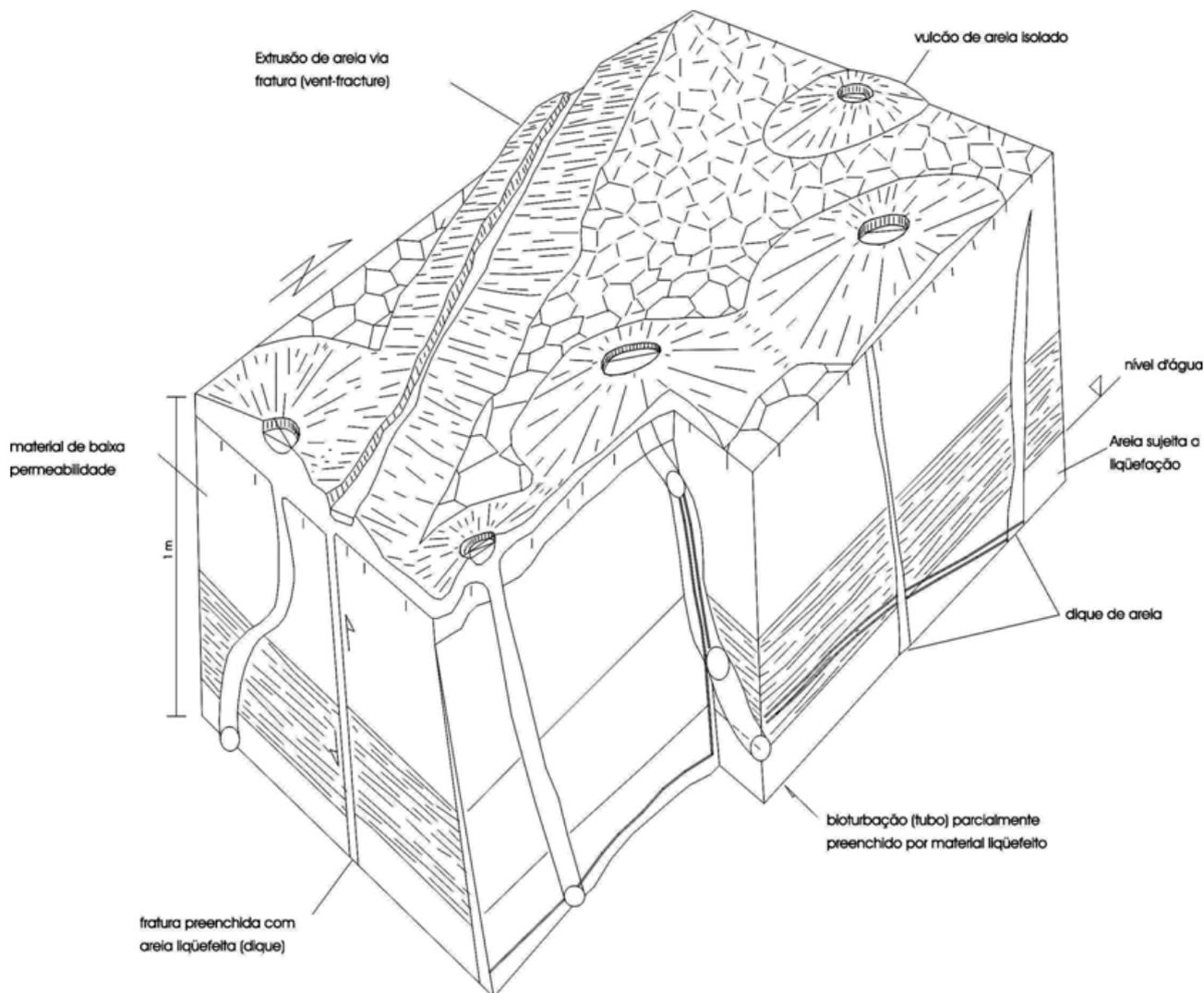


FIGURA 2: Bloco-diagrama mostrando os principais tipos de estruturas extrusivas de liquefação (vulcões de areia), baseado em observações de campo na região do rio Tocuyo, Venezuela, afetada por sismos de magnitudes 5,7 e 5 em abril e maio de 1989. Fonte: Audemard e De Santis (1991).

FIGURE 2: Block-diagram showing the main liquefaction features (sand intrusions and sand volcanoes), based in field observations in the Tocuyo River area, Venezuela, affected by two earthquakes in 1989. After Audemard and De Santis (1991).

- Executa-se o inventário das feições de liquefação em todos os afloramentos possíveis, especialmente ao longo dos barrancos de rios, catalogando o tipo e porte das estruturas e estabelecendo as respectivas idades;
- Após a delimitação das estruturas de liquefação relacionadas a um mesmo evento sísmico, pode-se lançar mão de gráficos como o da Figura 7, que relaciona magnitude de um terremoto com o raio estimado de ocorrência de feições de liquefação, determinando-se, dessa forma, o porte do sismo.

PALEOSSISMOS NO VALE DO RIO DO PEIXE, ESTADO DE SÃO PAULO

Numerosas estruturas de liquefação foram detectadas em depósitos de terraço ao longo da bacia do Rio do Peixe, região ocidental do Estado de São Paulo. Estes depósitos formaram-se entre 35.000 e 10.000 anos atrás, conforme datações radiométricas e dados antropológicos (indígenas já habitavam a área há 7.000 anos atrás e elaboraram ferramentas líticas com seixos desses depósitos de terraço).

Basicamente, foram constatados três níveis de terraço

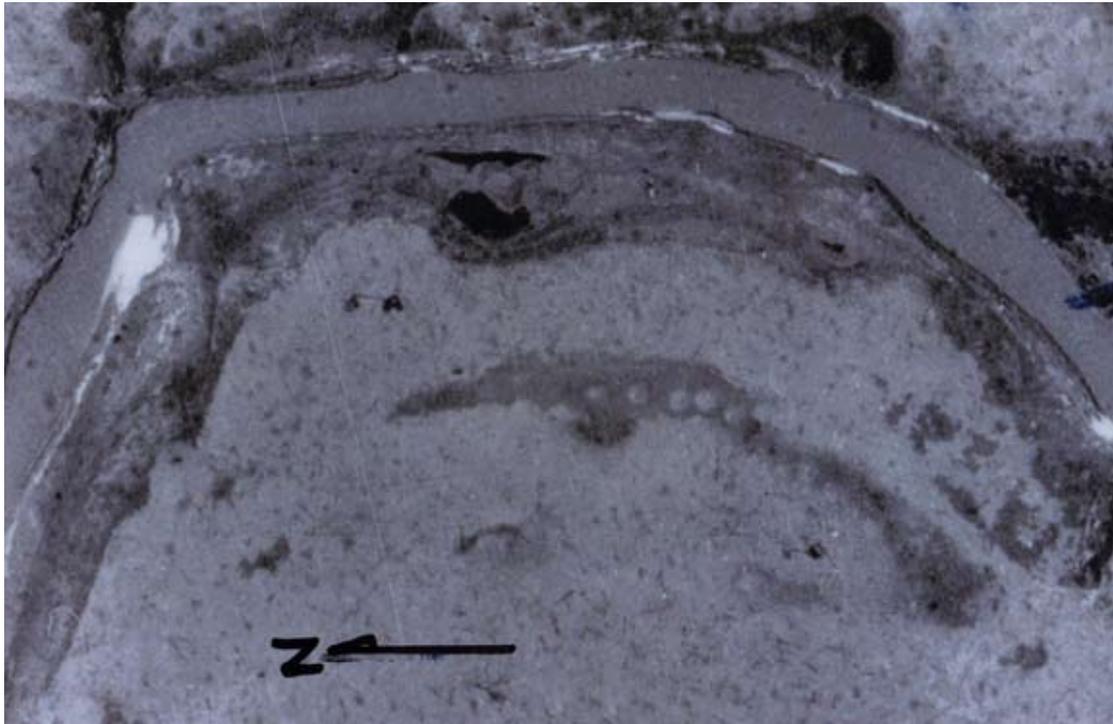


FIGURA 3: Excerto de fotografia aérea mostrando alinhamento de vulcões de areia (círculos esbranquiçados com 10-15 m de diâmetro cada, destacados entre as setas) em terraço da margem esquerda do Rio do Peixe.

FIGURE 3: Aerial view of the low Rio do Peixe valley portion showing an alignment of sand volcanoes (10-15 m of diameter light color circles) in a alluvial terrace in the left margin of the river.



FIGURA 4: Intrusão horizontal de areia (*sill*). Notar o contorno irregular da intrusão.

FIGURE 4: A sand sill example in the Rio do Peixe valley. Note the irregular boundaries of the sill.



FIGURA 5: Detalhe da base de um sill de areia. Notar que algumas delgadas lâminas (“tentáculos”) da rocha hospedeira prolongam-se no interior da intrusão.
 FIGURE 5: Detailed view of a sand sill in the Rio do Peixe valley. Note that some clay lamina persist inside the sill body.

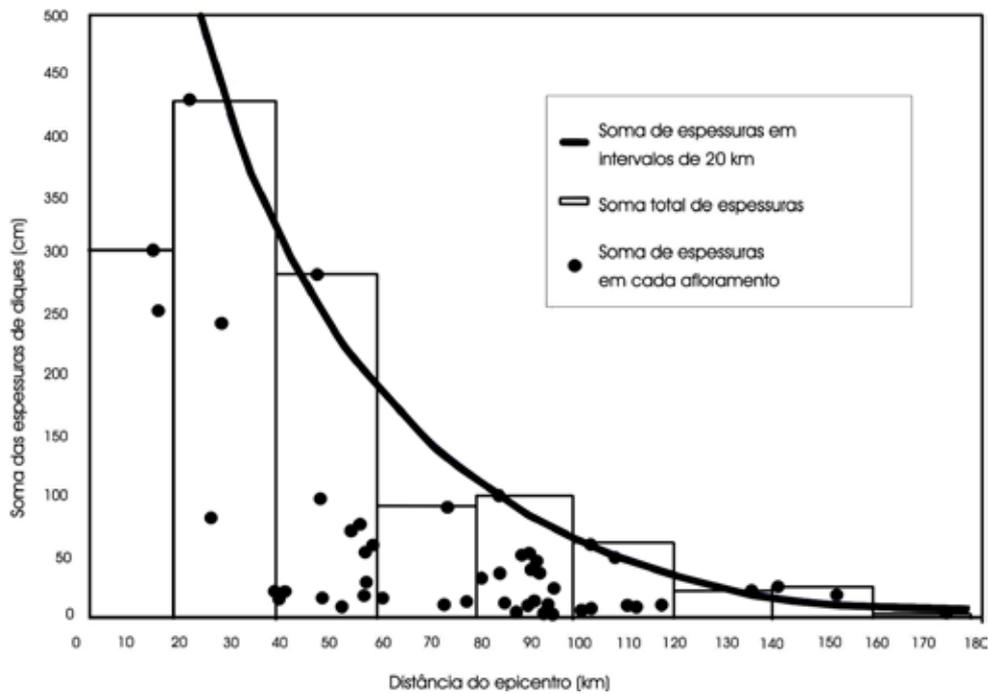


FIGURA 6: Gráfico mostrando a variação de porte e de frequência de estruturas de liquefação em relação à distância do ponto central das maiores deformações sísmicas (zona meizossísmica). Extraído de Obermeier (1998).
 FIGURE 6: Graph showing the frequency and size distribution of the dyke thicknesses against the distance of the seismic epicenter. After Obermeier (1998).

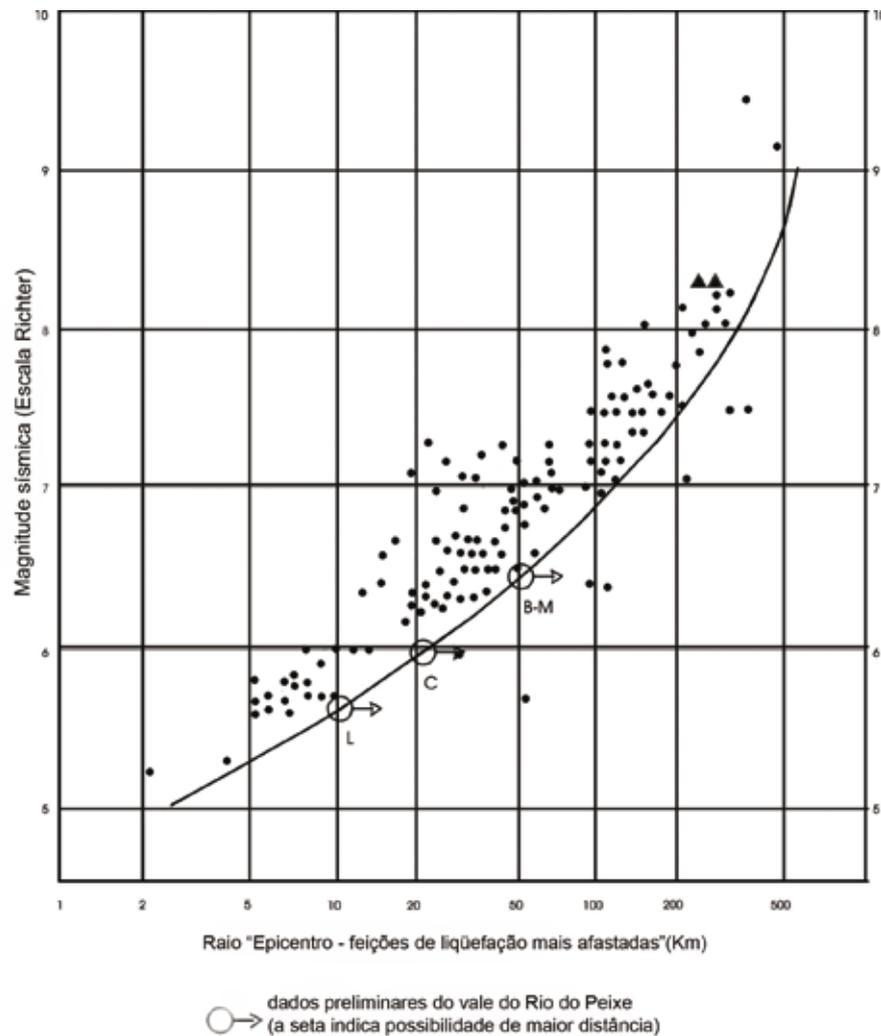


FIGURA 7: Gráfico relacionando magnitude sísmica e raio médio da área afetada pelos fenômenos de liquefação (segundo AMBRASEYS, 1988). As letras L, C e B-M designam, respectivamente, as magnitudes mínimas dos terremotos que afetaram a região do Rio do Peixe entre 27 e 10.000 anos atrás, baseado nos dados preliminares de estruturas de liquefação (cf. Figura 8).

FIGURE 7: Seismic magnitude vs. meizoseismic radius (epicentral distance to surface liquefaction features). The “L”, “C” and “B-M” refer to the minimum magnitude of the ancient earthquakes of the Rio do Peixe valley (according Figure 8).

ao longo do vale do Rio do Peixe, designados A, B e C, na região do baixo vale, e L, M e N, para as porções central e alta do vale, podendo haver uma correlação entre os terraços B e M. Vale ressaltar que estes terraços abrangem antigos depósitos aluvionares, fluviais e lacustres, que se formaram à época em que constituíam as antigas várzeas. Os terraços mais antigos, A e L, ocupam as posições topográficas mais elevadas nas encostas do vale e apresentam idades de até 35.000 anos, pelo menos. Os mais jovens, C e N, devem ter sido formados por volta de 10.000 anos atrás.

A Figura 8 sintetiza a localização e os tipos básicos das estruturas de liquefação constatadas no vale do Rio do Peixe e os níveis de terraço onde ocorrem. A análise destas feições permite observar que:

- as estruturas são de diversos tipos e portes, envolvendo feições extrusivas (na forma de vulcões de areia) ou intrusivas, como *sills* e diques; aqueles aparentemente mais comuns que estes (Figuras 9,10,11 e 12);
- em termos de dimensões, os vulcões de areia formam cones com diâmetros variando de 10 a 15 m e alturas de até 1 m. As intrusões apresentam dimensões de ordens centimétricas a decimétricas em termos de espessuras. Os *sills* exibem uma tendência de constituírem corpos lenticulares, com base plana e topo convexo (Figura 4);
- o fato de terem sido constatadas estruturas de liquefação em terraços de idades variadas configura

uma atividade sísmica recorrente durante os últimos 35.000 anos.

Levando-se em conta o porte das estruturas de liquefação registradas até agora no vale do Peixe, bem como as suas correlações temporais e a distância entre os diferentes registros, pode-se inferir a possível magnitude (mínima) desses antigos terremotos que afetaram a região (Figura 6). As informações referentes ao Rio do Peixe foram lançadas como letras, seguindo-se a designação adotada para os terraços. É necessário ressaltar que as informações referem-se a valores mínimos, que podem ser ainda maiores, na medida em que for sendo ampliado o conhecimento sobre a distribuição espacial das estruturas de liquefação e refinadas as suas cronologias e correlações. Os dados disponíveis mostram que os três eventos sísmicos teriam magnitude superior a 5,5 e que o sismo “B-M”, com as mais extensas manifestações de liquefação em área, teria magnitude mínima aproximada de 6,4.

Essas inferências indicam que todos estes eventos paleossísmicos suplantam o maior registro sísmico histórico já apontado no Estado de São Paulo (5,2 na Escala Richter),

sendo que o sismo “B-M” poderia ser equivalente, em magnitude, ao terremoto da Serra do Tombador, atual Estado do Mato Grosso (1955, de magnitude 6,6), uma das maiores manifestações sísmicas conhecidas no território brasileiro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas de liquefação correspondem a indícios importantes de atividade sísmica em uma determinada região, tendo em vista que os processos geradores tendem a ocorrer em condições de sismicidade relativamente elevada (magnitude superior a 5), que já implicam em riscos de natureza geológica. Estas feições ficam impressas no registro geológico, e sua detecção e análise possibilitam que elas venham a constituir uma espécie de “*paleossismograma*”, sendo particularmente úteis em áreas onde o registro sísmico instrumental seja pobre ou inexistente, como é o caso de boa parte do interior continental brasileiro. Afora isso, pode-se recuar no tempo até períodos pré-históricos, o que é particularmente importante para a análise do risco sísmico de qualquer região.

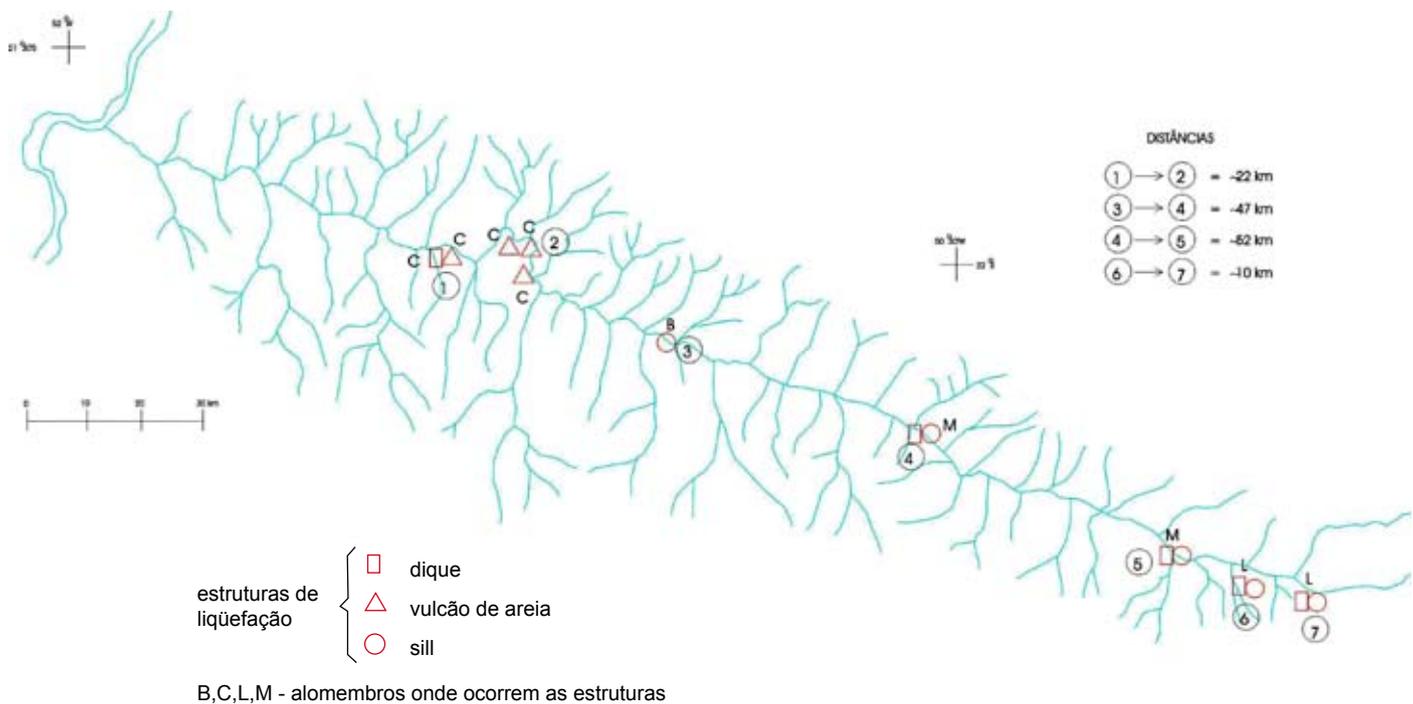


FIGURA 8: Tipologia e distribuição das estruturas de liquefação inventariadas no vale do Peixe.

FIGURE 8: Type and distribution of liquefaction structures in the Rio do Peixe valley.



FIGURA 9: Injeção bifurcada de areia fina em argilito acinzentado (rocha hospedeira).

FIGURE 9: Bifurcated tongue of fine sand intruded in gray argillite.



FIGURA 10: Detalhe do topo de um *sill* de areia mostrando injeção na forma de cúspide na rocha hospedeira.

FIGURE 10: Detailed view of the sand sill top. Note the sand flame injected in the host sediment.



FIGURA 11: Dique de areia (visto em planta), com cerca de 1,5 m de comprimento e largura média de 10 cm.

FIGURE 11: A 1.5 m long sand dyke in a plane view.



FIGURA 12: Intrusão de areia (porções claras) englobando fragmentos da rocha hospedeira (argilitos acinzentados).

FIGURE 12: Sand intrusions (light color portions) surrounding host clayed sediments (gray portions).

No caso particular do oeste paulista, acredita-se que os resultados alcançados justifiquem atividades adicionais de pesquisa para melhor aquilatar o risco sísmico desta área, a bem do interesse público. Talvez não seja um mero capricho o fato de a língua tupi-guarani incluir os termos “ibiry” e “ybyriri”, que significam terremoto...

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRASEYS, N. N. Engineering seismology: Earthquake engineering and structural dynamics. *Journal of the International Association of Earth Engineering*, v.17, p.1-105, 1988.

AUDEMARD, F. A.; DE SANTIS, F. Survey of liquefaction structures induced by Recent moderate earthquakes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, n.44, p.5-16, 1991.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R. Feições de liquefação no vale do Rio do Peixe, região ocidental paulista – Implicações paleossísmicas. *Geociências*, v.21, n.1/2, p.43-56, 2002.

OBBERMEIER, S. F. Liquefaction evidence for strong earthquakes of Holocene and latest Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA. *Engineering Geology*, v.50, p.227-254, 1998.

SIMKIN, T. et al. *World map of volcanoes, earthquakes, impact craters, and Plate Tectonics 1994*. Disponível em: <http://geology.usgs.gov/pdf/planet.pdf>. Acessado em: 30 maio 2006.