

FEIÇÕES DE LIQUEFAÇÃO NO VALE DO RIO SANTO ANASTÁCIO (SP) – INDICAÇÕES DE ATIVIDADE SÍSMICA QUATERNÁRIA?***LIQUEFACTION STRUCTURES IN THE SANTO ANASTÁCIO RIVER VALLEY, WESTERN SÃO PAULO STATE, SOUTHEASTERN BRAZIL – ARE THEY QUATERNARY SEISMIC ACTIVITY SHOWINGS?***

Ivan Claudio GUEDES¹ ; Mario Lincoln C. ETCHEBEHERE² ; Norberto MORALES³ ;
José Cândido STEVAUX²⁻⁴; Gisele de Cássia SANTONI⁵

Resumo: Estruturas de liquefação, quando originadas de processos de vibração sísmica (sismitos), configuram-se como importante instrumento de investigação neotectônica. Tais estruturas aparecem em zonas meizossísmicas (*meizoseismic zones* – zonas de maior deformação em superfície), associadas a eventos com magnitude superior a 5, e o estudo de sua tipologia, porte e distribuição espacial contribuem para o delineamento de epicentros de paleossismos, bem como para a estimativa de suas magnitudes. Este trabalho objetiva reportar a ocorrência de estruturas de liquefação no vale do rio Santo Anastácio – aqui reputadas como inéditas –, analisar a possibilidade delas terem origem sísmica, e cotejá-las com informações similares obtidas na vizinha bacia do Rio do Peixe. As feições encontradas no vale do Rio Santo Anastácio estão alojadas em depósitos aluviais e compreendem tanto intrusões arenosas (diques, *sills*, brechas intraestrutais) quanto extrusões (vulcões de areia). O material arenoso liquefeito apresenta-se hoje como maciço, friável, branco (textura sacaróide), com fragmentos e lascas de sedimentos encaixantes. O contexto geológico e geomorfológico local possibilita excluir, a priori, a possibilidade de tais estruturas estarem vinculadas a processos de artesianismo ou a movimentos de massa. Considerando que as estruturas de liquefação afetam camadas de argila escura (32.340+/-320 anos A.P. por datação ¹⁴C), entende-se que o eventual sismo que as tenha gerado teria ocorrido aquém de tal data. A correlação desses achados com as estruturas similares constatadas na vizinha bacia do Rio do Peixe ainda encontra-se aberta, pois os 3 eventos sísmicos identificados naquela área teriam idades inferiores a 33 ka A.P. Quando e se for possível precisar a correlação com um daqueles sismos, poderá haver ampliação da zona meizossísmica e, por conseguinte, ampliação do valor estimado da magnitude sísmica do paleoterremoto.

Palavras-chave: liquefação; Neotectônica; paleossismicidade; sismitos; rio Santo Anastácio; Planalto Ocidental Paulista.

Abstract: Liquefaction structures, when originated by seismic vibration (seismites), are important tools in neotectonics investigation. Those structures occur in meizoseismic zones associated with events higher than 5 in magnitude and their type, size and special distribution give indications to the paleoseism epicenter and intensity. Liquefaction structures in the Santo Anastacio River valley are presented and described for the first time in this paper. A comparison with those of the Rio do Peixe valley is also presented. Sandy intrusions (dikes, sills and breccias) and intrusions (sand volcano) are occurred in the Santo Anastacio River sand alluvial deposits. Liquefied sand material is massive, friable, saccharoidal and white with fragment of pre-existing sediment. Local geological and geomorphological context exclude the possibility of those structures are associated with artesian or mass movement processes. The age of paleoseism can be estimated from a black clay layer affected by the structures and dated ¹⁴C 32.340+/-320 B.P. This estimative is approximately the same obtained for the structures found in three events in the Peixe River valley (less than 33 ka B.P.). Future studies in the area could improve the delimitation of the meizoseismic zone and estimate the earthquake magnitude.

Keywords: liquefaction; Neotectonics; paleoseismicity; Santo Anastácio river; seismites; Western São Paulo State Plateau.

1. Secretaria de Educação do Estado de São Paulo

2. Centro de Pós-graduação, Pesquisa e Extensão – CEPPE; Universidade Guarulhos – UnG

3. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE; Universidade Estadual Paulista – UNESP – Rio Claro

4. Universidade Estadual de Maringá – UEM

5. IGCE – UNESP – Bacharelândia

INTRODUÇÃO

Feições ou estruturas de liquefação, também chamados sismitos (senso SEILACHER, 1969) quando geneticamente relacionadas com vibrações sísmicas, têm sido empregadas com frequência em estudos de natureza paleossísmica, buscando definir epicentros, magnitudes e zonas de maior deformação (*meizoseismic zones*) do que se poderia chamar paleoterremotos (e.g., AMBRASEYS, 1988; AUDEMAR; SANTIS, 1991; OBERMEIER et al., 1993; OBERMEIER, 1996; OBERMEIER; POND, 1998; ETCHEBEHERE, 2002; ETCHEBEHERE; SAAD, 2002; MICHETTI et al., 2005; ETCHEBEHERE et al., 2006).

Um ponto particularmente favorável da utilização de feições de liquefação em estudos paleossísmicos – eliminando-se, a priori, outras possibilidades genéticas para tais estruturas – refere-se ao fato desse tipo de sismo ser gerado apenas em eventos sísmicos de magnitude superior a 5. Terremotos similares a este podem provocar danos na zona epicentral, especialmente quando incidem em áreas pouco preparadas para lidar com as conseqüências de tal tipo de fenômeno geológico, como pode ser considerada a quase totalidade do território brasileiro. Situado no interior da placa tectônica sul-americana, o Brasil não é afetado com frequência por terremotos, ainda mais por eventos de maior magnitude, que implicam riscos geológicos mais significativos. Ainda assim, nosso território não pode ser considerado livre de tais fenômenos, o que se deve, além do posicionamento geológico na placa tectônica, também à falta de cobertura sísmográfica abrangente e, até mesmo, do desconhecimento de aspectos geológicos importantes para o entendimento dos processos de liberação de energia de deformação acumulada na porção superior da crosta terrestre. Parte desse desconhecimento se deve ao fato de o interior continental ter sido explorado há relativamente poucas décadas, o que, somando-se a uma menor frequência de eventos sísmicos de magnitude média-alta, induzem à interpretação de território isento de tremores sísmicos mais preocupantes. Esses mesmos aspectos deveriam ser estimulantes para a busca e o entendimento adequado das marcas dos eventuais paleoterremotos contidas no registro geológico, em especial nos depósitos sedimentares cenozóicos, o que representaria uma justificativa para se avançar no conhecimento geológico desta porção do território paulista.

Esse trabalho busca relatar a ocorrência de expressivas feições de liquefação no vale do rio Santo Anastácio e discutir a possibilidade de uma origem sísmica

para elas, bem como delinear eventuais implicações para o entendimento de processos neotectônicos no oeste paulista e seus riscos geológicos inerentes. Ressalta-se que feições de liquefação em sedimentos cenozóicos foram relatadas no vale do vizinho Rio do Peixe por Etchebehere et al. (1998), que as reputaram como inéditas, seguido de análises geológicas mais acuradas em Etchebehere e Saad (2002), que delinearão três terremotos mais significativos, com magnitudes associadas de 5,6; 6 e 6,4, equiparáveis às maiores já registradas no território brasileiro. Na parte final do artigo, serão tecidas considerações sobre a possibilidade de correlação cronológica das estruturas encontradas nos dois vales e as implicações em termos de extensão pretérita das zonas de maior deformação associadas a tais eventos sísmicos.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

A bacia do rio Santo Anastácio situa-se no extremo oeste paulista compreendendo uma área de aproximadamente 2.000 km². Dentre as cidades que estão no seu entorno despontam Presidente Prudente, Álvares Machado, Presidente Bernardes, Santo Anastácio, Marabá Paulista, Presidente Venceslau e Presidente Epitácio (FIGURA 1).

A ocupação desta área iniciou-se às vésperas da crise de 1929, com o advento da **franja pioneira** (MONBEIG, 1984). Em princípio, os fazendeiros e o Estado cogitavam organizar expedições científicas para fazer o reconhecimento das florestas e avançar o plantio do café. O cultivo da rubiácea parecia lucro certo para todos e o oeste do Estado foi submetido ao processo de desmatamento generalizado (MONBEIG, 1984). Tal iniciativa para a cultura cafeeira, algodão, amendoim, milho e cana-de-açúcar corroboraram para o rápido esgotamento do solo, abrindo espaço para o setor agropastoril em criação extensiva, ocupando grandes porções de terras. Nos dias atuais destaca-se na região o setor agropecuário voltado à produção sucroalcooleira. A ocupação inadequada no oeste paulista resultou em um dos maiores quadros erosivos de todo o Estado de São Paulo.

Em termos fisiográficos, a bacia do rio Santo Anastácio foi dividida em três setores, a saber: alto, médio e baixo vales. O Alto vale apresenta planaltos de cimeiras locais, planaltos, terraços elevados, terraços baixos, planícies aluviais associadas e planícies aluviais recentes.

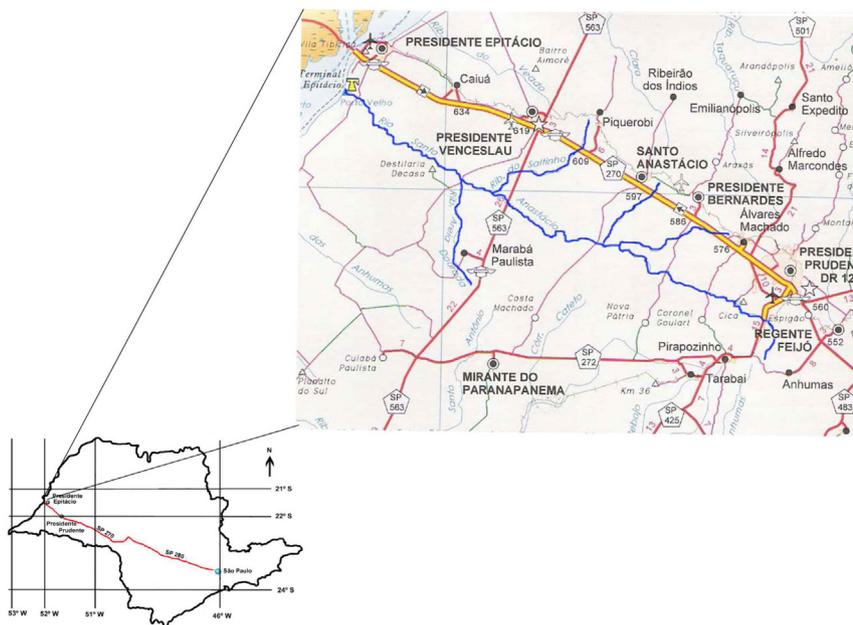


FIGURA 1: Localização da bacia do Rio Santo Anastácio no estado de São Paulo, com municípios abrangidos, principais rodovias e principais vias de acesso.
FIGURE 1: Location map of the Santo Snastácio hydrographic basin in the state of São Paulo, Brazil, with local authorities included, main roads and principal access roads.

No contexto do Médio vale, destaca-se o que Stein (1999) denominou como Planalto das Lagoas. Esse planalto está relacionado com as grandes estruturas tectônicas que cortam a bacia. Guedes (2008) apresenta a hipótese de que esta região poderia estar recebendo material proveniente do norte do médio vale (em ascensão) e que, possivelmente, está encaixado em um bloco de subsidência.

O vale do rio Santo Anastácio apresenta suas cabeceiras de drenagem na superfície interplanáltica II, remanescente da pediplanação neogênica, que se embute no Planalto de Marília-Echaporã (Figura 2). A esta superfície intermediária, encrava-se uma mais jovem (superfície interplanáltica I), que pode ser reconhecida ao longo do rio Santo Anastácio e de seus principais afluentes, e onde se desenvolvem dois níveis de terraceamento (Terraços Altos – T2 e Terraços Baixos – T1). Os níveis dos Terraços Altos transcendem os limites da bacia do rio Santo Anastácio, ao passo que os Terraços Baixos têm representatividade apenas local (STEIN, 1999).

Contexto Geológico

A bacia do rio Santo Anastácio está inserida no contexto da Bacia Sedimentar do Paraná, que se constitui numa entidade geotectônica de abrangência mercosulina

estabelecida no interior da Plataforma Sul-americana com cerca de 1.400.000 km², dos quais 1.100.000 km² estão em território brasileiro. Seu preenchimento compreende rochas ígneas fanerozóicas e os depósitos sedimentares abrangem desde o Ordoviciano até o Cretáceo Superior (ASSINE, 1996; MILANI, 1999; MILANI; ZALÁN, 1999).

As rochas sedimentares que afloram na área da bacia hidrográfica do rio Santo Anastácio são pós-basálticas, pertencem aos grupos Caiuá (Kc) e Bauru (Ks) separados pela ampla discordância do Geossolo Santo Anastácio, conforme entendimento estratigráfico de Fúlvaro et al. (1999). O Grupo Caiuá (Cretáceo inferior) é constituído de arenitos de granulometria fina a média, de coloração arroxeada com estratificações cruzadas de grande porte. O Grupo Bauru coroa o registro sedimentar cretáceo, sendo representado pelas formações Araçatuba (sistema lacustre) e Adamantina (sistema fluvial).

O quadro estratigráfico no vale do rio Santo Anastácio de idade quaternária inclui planícies aluviais holocênicas e terraços de acumulação subatuais, terraços pleistocênicos e depósitos originados a partir da evolução das encostas, como as rampas colúviais e os alvéolos preenchidos por material colúvio-aluvionar (STEIN, 1999). Sallun (2003) inclui “depósitos colúvio-eluviais” de idade pleistocênica associados a relevos suaves, configurando depósitos arenosos

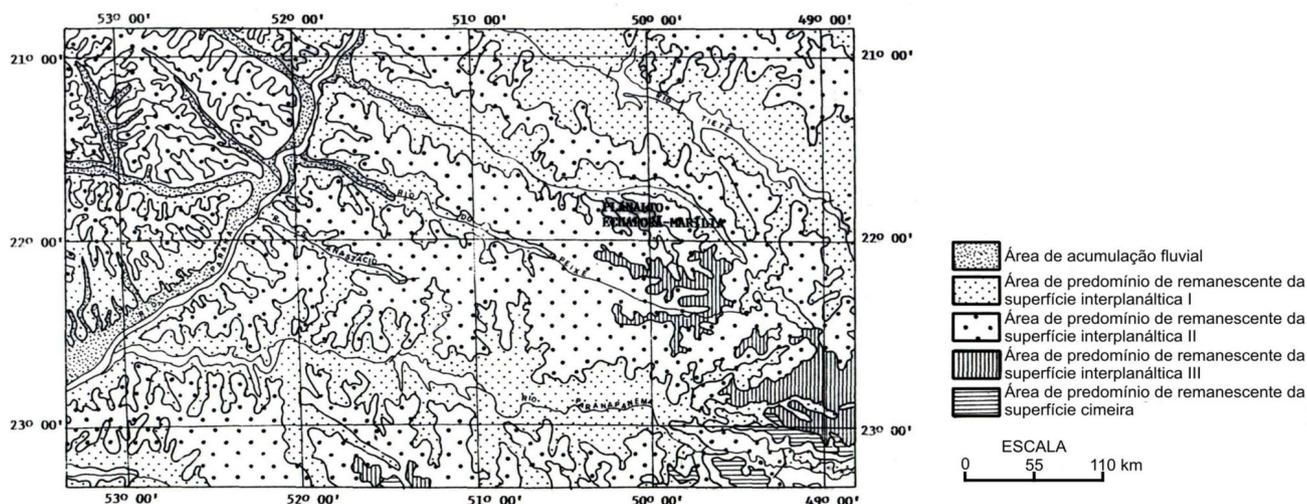


FIGURA 2: Distribuição dos remanescentes das superfícies planálticas (ou de aplainamento) conforme Justus (1985)

FIGURE 2: Distribution of the main pediplanes in the study area according with Justus (1985).

ou areno-argilosos maciços, avermelhados ou marrom-avermelhados, de alta permo-porosidade, com estilhas de carvão vegetal e de limonita dispersos.

PALEOSSISMOLOGIA

A paleossismologia é considerada como o ramo das Geociências que se ocupa da investigação de terremotos pré-históricos, incluindo suas particularidades (magnitude, hipocentro, plano de falha, etc.) e o traçado das linhas de isointensidades, com maior relevância para a delimitação da zona de maior deformação em superfície (*meizoseismic zone*). Segundo Michetti et al. (2005), utilizam-se para sua investigação os registros geomorfológicos (quando as deformações tectônicas modificam a paisagem) e geológicos (quando os sismos deixam sinais em rochas). Outro conceito importante refere-se à caracterização de **falha ativa**. Sabe-se que os terremotos originam-se por movimentação de falha, e caracterizam-se da liberação de energia gerada pela movimentação da descontinuidade. Este conceito desenvolveu-se a partir das observações do terremoto de São Francisco, em 1906 na Califórnia, EUA, quando a Falha de San Andréas apresentou um deslocamento lateral de 6 m. O *California State Mining and Geology Board* atribui como falhas “ativas” as movimentações ocorridas durante o Holoceno; e “potencialmente ativas” as descontinuidades que tenham se movimentado durante o Quaternário (últimos 1,65 milhão de anos). A *United States Nuclear Regulatory Commission*, mais rigorosa, conceitua uma descontinuidade

como “capaz” se esta apresentar novas movimentações, se ela tiver sido ativa pelo menos uma vez nos últimos 50 ka. (KELLER; PINTER, 1996). A discussão sobre o adjetivo “recente” é ampla, podendo ser interpretada de várias maneiras.

Sobre o conceito de neotectônica, Saadi (1993) apresenta a discussão de alguns autores, abaixo mencionados, sobre deformações recentes (Neotectônica) onde:

- Obruchev (1948) a designa para definição de movimentos crustais ocorridos a partir do Terciário Superior;
- Nicollev et al. (1962) atribuem o termo para movimentos contemporâneos ocorridos nos dois últimos séculos e classificam-no como “jóvens” se ocorridos no Holoceno;
- Belussov (1974) adota o conceito de “movimentos oscilatórios atuais”, dentro do nosso período histórico e “movimentos oscilatórios recentes” se ocorrido dentro do Quaternário;
- Jain (1980) apresenta-o para os movimentos ocorridos até 6.000 A.P.

Etchebehere (2000) adota o conceito de neotectônica empreendido pela *International Union for Quaternary Research* (INQUA), incidindo na análise de movimentação sísmica do presente até 107 anos. O mesmo conceito é empregado por Guedes (2008) corroborando com os estudos nessa área.

Gürpınar (2005) apresentou uma série de vantagens sobre o estudo da paleossismologia tais como: a possibilidade de identificar terremotos de grandes

magnitudes que aconteceram antes de tempos históricos ou que os registros históricos foram incompletos ou perdidos; a identificação de terremotos em grandes áreas onde não havia nenhuma ocupação histórica populacional; a confirmação da ocorrência de grandes terremotos utilizando seus registros deixados pelas marcas históricas; a delimitação de áreas com possibilidade de sismos e a possibilidade de calcular magnitudes a partir das estruturas sísmicas.

Considerando a recente ocupação no oeste paulista, o tempo “pré-histórico” pode ser compreendido como a época anterior à colonização européia, datando-se como início do século XX. Portanto, as poucas décadas de ocupação desta parte do território torna-se de grande importância a investigação geológica desta área a fim de analisar as possíveis evidências de processos sísmicos (ETCHEBEHERE, 2000).

Estruturas de Liquefação

As estruturas de liquefação podem constituir importante instrumento de análise das perturbações provocadas por sismicidade em tempos pretéritos, principalmente em regiões que não dispõem de registros instrumentais de dados sísmicos ou até mesmo de qualquer tipo de informação sobre abalos, como é o caso de grande parte do território brasileiro.

Um dos mecanismos que pode levar sedimentos a se liquefazer, e que pode ser interpretado como **sismitos**, são as vibrações. As oscilações provocam mudanças bruscas na estrutura granular de um sedimento, transferindo as tensões dos pontos de contato entre os grãos para os fluidos intersticiais. Assim os grãos perdem contato e o leito granular passa a se comportar como um líquido que, sob pressão, tendem a se expelir em forma de vulcões.

Etchebehere e Saad (2002) listaram os pontos mais relevantes do emprego dessas estruturas (de liquefação) em estudos paleossísmicos:

- A liquefação sísmica é gerada a partir de sismos com magnitude superior a 5, tornando-se mais comum acima de 5,5;
- Ocorre em sedimentos jovens (holocênicos ou do Pleistoceno superior) e em ambientes saturados do tipo fluvial, lacustre deltaico ou eólico;
- Com maior frequência, ocorrem em sedimentos arenosos ou siltosos incoesos, saturados e de pequena profundidade (raramente a mais de 10m de profundidade);

- Por causa do cisalhamento, as vibrações provocam mudanças na estrutura dos sedimentos modificando a granulometria, com transferência de tensões dos pontos de contato entre os grãos para os fluidos intersticiais. A transferência de tensão pode atingir um estado crítico, quando os grãos perdem contato entre si e partes do leito granular passam a se comportar como fluido, injetando-se em fraturas ou cavidades pré-existentes, ou até mesmo gerando novas fraturas (hidrofraturamento);

- A presença de uma capa sedimentar de baixa permeabilidade, ou de solos com raízes densas pode funcionar como um elemento que restrinja o volume liquefeito que, devido à pressão pode provocar o fraturamento hidráulico;

- A ausência de uma capa sedimentar de baixa permeabilidade pode resultar na ocorrência de feições do tipo cratera ou caldeirões (*boiling cauldrons*), que são feições cônicas que representam manifestações superficiais de emanações de material liquefeito, formando depressões decimétricas ou métricas no terreno;

- O material liquefeito pode originar intrusões do tipo *sill* ou dique de areia e, atingindo a superfície, formar estruturas do tipo vulcões ou prismas de areia (*sand blows*), além de provocar brechamento da rocha encaixante (mais coesa), envolvendo os fragmentos (Figura 3).

Confirmadas as origens sísmicas (descartando as demais hipóteses como: artesianismos, escorregamentos e diagênese, por exemplo), as estruturas podem ser empregadas para o reconhecimento e caracterização de terremotos passados. Uma das técnicas empregadas pelo *United States Geological Survey - USGS* é o chamado *Magnitude-Bound Method*. Este método empregado no vale do rio Wabash (divisa entre os Estados de Illinois e Indiana-USA) considera a premissa de que as feições de liquefação são mais frequentes e possantes quanto mais próximas estiverem da zona mais intensamente afetada pelas vibrações (**zona meizossísmica**): executa-se o mapeamento das feições de liquefação em todos os afloramentos possíveis, especialmente ao longo dos barrancos de rios, determinando-se o tipo e porte das estruturas com ênfase aos diques, e controlando-se a idade das mesmas. A Figura 3 mostra o resultado desse mapeamento realizado por Obermeier et al. (1993). Após a delimitação das estruturas de liquefação relacionadas a um mesmo evento sísmico, pode-se lançar mão de gráficos como o da Figura 4, que relaciona magnitude de um terremoto com o raio estimado de ocorrência de feições de liquefação,

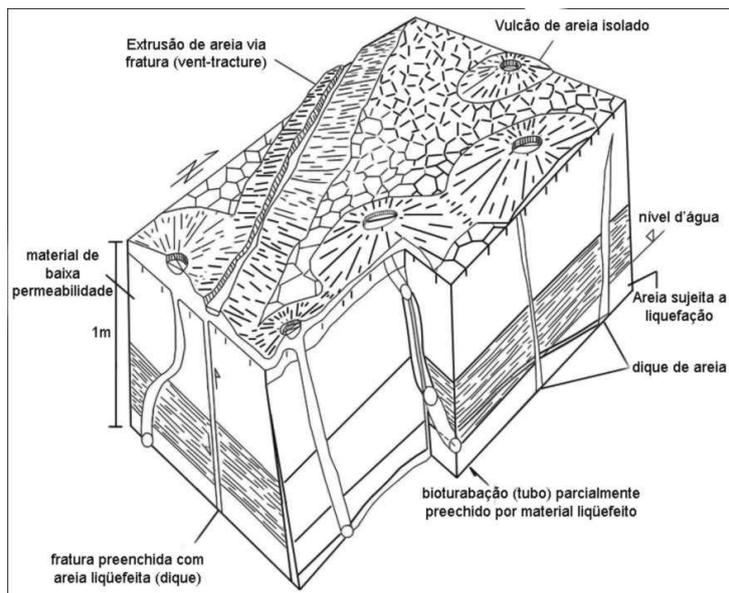


FIGURA 3: Bloco-diagrama mostrando os principais tipos de estruturas de liquefação, baseado em observações de campo na região do rio Tocuyo, Venezuela, que foi afetada por sismos de magnitudes 5,7 e 5 em abril e maio de 1989, respectivamente (AUDEMARD; DE SANTIS, 1991).

FIGURE 3: Block-diagram showing the principal types of structures of liquefaction, based on observations of field on the region of the river Tocuyo, Venezuela, which was affected by earthquakes of magnitudes 5,7 and 5 in April and May of 1989, respectively (AUDEMARD; DE SANTIS, 1991).

determinando-se, dessa forma, o porte do sismo que afetou aquela região em uma determinada época; e, até mesmo inferir linhas de igual deformação (*isodefs*) conforme aplicado por Etchebehere (2000).

IDENTIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE LIQUEFAÇÃO NA BACIA DO RIO SANTO ANASTÁCIO

Conforme orientação de Etchebehere e Saad (2002), Guedes (2008) identificou áreas sujeitas à liquefação a partir da fotointerpretação. As fotografias aéreas utilizadas foram levantadas pela FAB para o IBC em 1972 com escala aproximada de 1:25.000. Nesta etapa selecionaram-se 40 pontos suspeitos de ocorrências de feições paleossísmicas, preferencialmente em patamares de terraços e aluviões recentes.

Na bacia do rio Santo Anastácio foram identificadas, entre as coordenadas UTM 427.158 e 7.565.303, ao sul do município de Santo Anastácio, as estruturas de liquefação. O depósito aluvial em que se encontram essas estruturas, encontra-se atualmente em processo de erosão, propiciando afloramentos nas barrancas desnudas dos talwegues atuais (Fotos 1 e 2).

A Foto 1 mostra uma visão geral da área em que encontrou-se as estruturas de liquefação. O depósito colúvio-

aluvionar que capeava o fundo do vale está sendo dissecado pelo talvegue atual conferindo-lhe um perfil transversal côncavo, de suave caimento. A observação desta foto permite, ainda, identificar os remanescentes desse antigo vale, configurando resquícios de patamares nos dois flancos do vale.

Os **sismitos** identificados no vale do rio Santo Anastácio caracterizam-se por:

Bolsões brechóides (brechas intraestratais): têm formatos lenticulares ou de cogumelos, com espessuras decimétricas e extensões decimétricas a métricas, incluindo fragmentos angulosos da rocha encaixante (em geral lamitos cinza-escuros, de elevada consistência) centimétricos a subcentimétricos. Verificam-se gradações entre essas porções brechóides e conjuntos de vênulas e pequenos diques que envolvem blocos pouco destacados da massa lamítica (rocha-encaixante) adjacente (Fotos 2 a 4). Esses bolsões tendem a ocorrer na base de camadas constritoras, especialmente quando são espessas o suficiente para impedir a extrusão de material liquefeito. Tal material é formado, regra geral, por areia fina, muito fina, bem selecionada, branca, textura sacaróide, friável, maciça, contendo pequenos fragmentos irregulares da rocha encaixante; aparentemente é desprovido de qualquer cimento ou matriz;

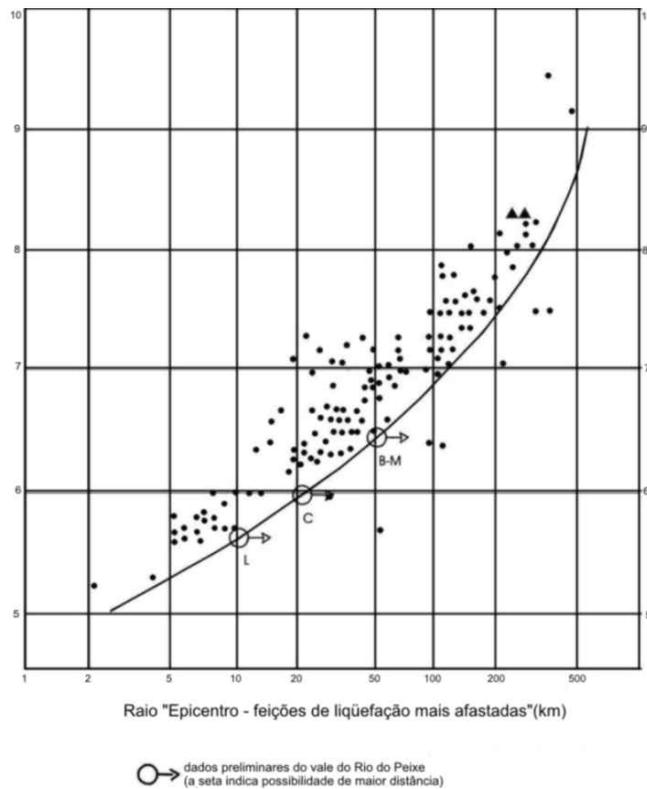


FIGURA 4: Gráfico relacionando magnitude sísmica e raio médio da área afetada por processos de liquefação Ambraseys (1988) apud Etchebehere (2000). Os pontos L, C e B-M referem-se às magnitudes mínimas de terremotos que afetaram o vale do Rio do Peixe entre 27.000 e 10.000 anos AP.
FIGURE 4: Chart making a list of seismic magnitude and middle ray of the area affected by processes of liquefaction Ambraseys (1988) apud Etchebehere (2000). The point L, C and B-M concerns the least magnitudes of earthquakes that affected the valley of the Rio do Peixe between 27 kyr B.P. and 10 kyr BP.



FOTO 1: Vista geral dos depósitos colúvio-aluvionares dissecados e que incluem as estruturas de liquefação (Ponto NGI 43). O material liquefeito acha-se representado por areias brancas, friáveis, sacaróides, bem selecionadas, perceptíveis nas barrancas desnudas da drenagem, rompendo ou sendo constrictas por camadas de lamito cinza-escuro, rico em material orgânico. Coordenadas do ponto: 427.158 e 7.565.303.
PHOTO 1: General Sight of the alluvium and colluvium deposits cut by erosion and that they include the liquefaction structures (Point NGI 43). The liquefied material is found represented by white, friable sands, saccharoids, and well selected, perceivable well in the naked abrupt declivities of the draining, breaching or being constricted for layers of ash-dark, rich red soil in organic material. Point coordination: 427.158 and 7.565.303

Sills de areia: constituídos de areia fina, muito fina, bem selecionada, esbranquiçada, de espessuras decimétricas e extensões decimétricas a métricas. Apresentam gradações para diques e para as fácies brechóides, mas mostram contatos bruscos com as paredes das rochas encaixantes e fragmentos destas imersos na massa liquefeita; praticamente não há matriz ou cimento (Fotos 5 e 6);

Diques de areia: de formatos tabulares a ondulados, por vezes com aumento da espessura rumo ao topo; as espessuras são centimétricas e as extensões, na vertical, de ordem decimétrica. Aparentemente, conectam camadas de areia lamítica acinzentadas e as fácies de liquefação já descritas; por vezes conectam-se a vulcões de areia (Fotos 7 a 10); e

Vulcões de areia: ocorrem sob a forma de pequenos cones, com diâmetros decimétricos de até 1,5 m e alturas de até 0,20 m; acham-se revestidos por grama, mas ainda preservam a cor esbranquiçada de suas areias. Conforme ilustrado na Figura 5, estes vulcões tendem a ocorrer nos setores onde a camada lamítica constritora apresenta menor espessura.



FOTO 2: Bolsão de fácies brechóide de liquefação, ocorrendo na base de camada lamítica cinza-escuro. Notar o dique alimentador, de espessura centimétrica, e a cor branca da areia que se liquefez. Amostra coletada na base da camada lamítica indicou idade radiocarbônica de 32.160+/-310 anos A.P.

PHOTO 2: Pool of facies holes of liquefaction, occurring on the layer of the dark gray mudstone. Note the dike feeder thickness centimetric, and white sand that liquefied it. Sample collected on the layer dark gray mudstone indicated radio carbonic age 32 160+/-310 years B.P.



FOTO 3: Detalhe de um bolsão brechóide. Notar o aumento da frequência de fragmentos próximo ao contato com a base da camada constritora. A escala na foto tem 17 cm de comprimento.

PHOTO 3: A detail of a pool of holes of liquefaction. To notice the increase of the frequency of fragments next to the contact with the base to the constrictor layer. The scale in the photo has 17 cm of length.



FOTO 4: Outro aspecto de bolsão brechóide, mostrando gradações para diques e sills (S) de areia (textura mais homogênea); os fragmentos da encaixante envoltos pelo material arenoso liquefeito apresentam-se oxidados.

PHOTO 4: Another aspect of the liquefaction sand facies, showing gradations for dams and sills (S) of sand (more homogeneous texture); the fragments of the mudstone wrapped by the sandy liquefied material present themselves rusty.

As estruturas aqui relatadas ocorrem no topo de um depósito aluvial entalhado por dissecação recente, fruto do desmatamento fremente realizado nesta região no início do século XX. O abaixamento do talvegue expôs depósitos aluviais e colúvio-aluvionares, caracterizados por

bancos de areia, areia lamítica, lamitos, lamitos arenosos e argilitos escuros, acometidos por processos localizados de laterização. O antigo fundo de vale, de conformação muito suave, apresenta-se, hoje, na forma de terraços, sujeitos a contínua e acelerada erosão.



FOTO 5: Sill de areia englobando porções amarronzadas da rocha encaixante, que se mostram brechadas. Notar o topo de conformação irregular da intrusão e o aspecto sacaróide do material arenoso fluidizado. A escala tem 17 cm de comprimento.
PHOTO 5: Sill of sand including brownish portions of the mudstone rock, what are shown full of breaches. Notice the top of irregular conformation of the intrusion and the saccharoidal aspect of the liquefied facies. The scale has 17 cm of length.



FOTO 7: Dique de areia aumentando de espessura para o topo e incluindo fragmentos da rocha encaixante. A escala tem 17 cm de comprimento.
PHOTO 7: A sand dike increasing of thickness for the top and including fragments of the mudstone rock. The scale has 17 cm of length.

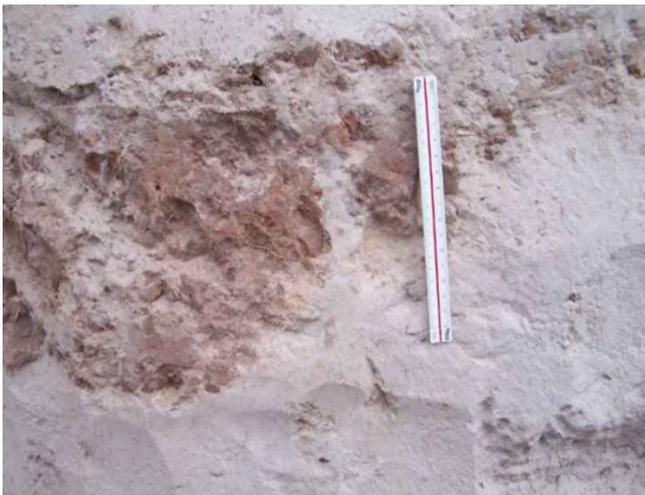


FOTO 6: Detalhe do topo de um sill de areia, mostrando emissões digitiformes na rocha encaixante. A escala tem 17 cm de comprimento.
PHOTO 6: Detail of the top of a sill of sand, showing digital forms emissions in the mudstone rock. The scale has 17 cm of length.



FOTO 8: Delgado dique de areia, encaixado em lamito cinza-amarronzado. A escala tem 17 cm de comprimento.
PHOTO 8: Thin dike of sand fitted in red-soil brownish-gray. The scale has 17cm of length.



FOTO 9: Dois diques de areia semi-paralelos, alargando-se para o topo. A parte mostrada do martelo tem cerca de 35 cm de comprimento.
PHOTO 9: Two semi-parallel sand dikes enlarging upward. The visible hammer portion has approximately 35 cm of length.

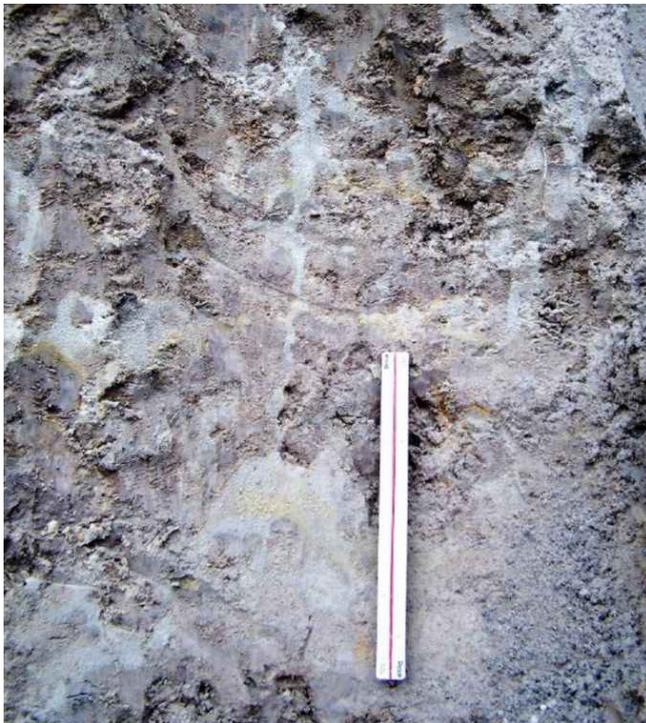


FOTO 10: Emissão de diques de areia a partir de camada arenosa cinzenta, subjacente a lamito cinza escuro, com manchas de oxidação. A escala tem 17 cm de comprimento.
PHOTO 10: Emission of dams of sand from sandy grey, underlying layer to dark gray mudstone, with stains of oxidation. The scale has 17 cm of length.

As condições topográficas locais possibilitam excluir processos de artesianismo como responsáveis pela formação das estruturas de liquefação. Da mesma forma, movimentos expressivos de massa estão descartados, embora o voçorocamento (“voçorocas de drenagem”) que se implanta nessas áreas de rebaixamento acelerado do talvegue (q.v. BEZERRA, 2008) propicie processos localizados de desbarrancamentos, solapamentos e mesmo *piping*. Ainda assim, mesmo nos pontos onde estão ocorrendo esses fenômenos, não se constata qualquer tipo de processo de liquefação. Da mesma forma, a desestruturação das camadas aluviais por maquinário também não dá origem a fluidizações e resulta em uma massa disforme que se desagrega rapidamente e vai alimentar os processos de assoreamento drenagem abaixo. Outra possibilidade seria a atuação de insetos, tais como formigas ou cupins, mas a presença de construções elaboradas por esses organismos até mesmo nas proximidades das ocorrências das estruturas de liquefação deixa patente as diferenças estruturais e texturais do material mobilizado.

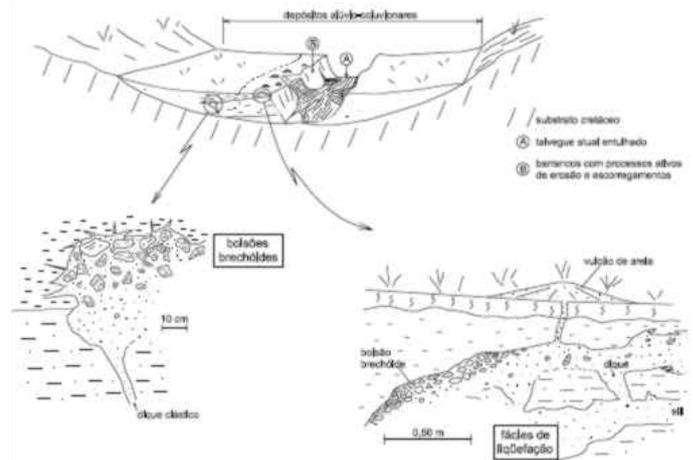


FIGURA 5: Esquemas relativos às estruturas de liquefação do ponto NGI 26.
FIGURE 5: Relative schemes to the structures of liquefaction of the point NGI 26.

DISCUSSÃO

As estruturas de liquefação prestam-nos uma das referências mais importantes no âmbito do estudo de registros paleossísmicos. Ainda que recente, seu estudo apresenta uma consistente etapa na delimitação de eventos sísmicos. As feições descritas e ilustradas acima aparentam ser, salvo melhor juízo, frutos de processos de liquefação originados

a partir de eventos sísmicos em área do oeste do Estado de São Paulo. Em outras situações (q.v. OBERMEIER, 1998), atribui-se origem sísmica para as estruturas de liquefação com a eliminação de outras possibilidades genéticas e levando-se em conta o contexto geológico da área ou região de ocorrência.

A possibilidade de as estruturas aqui descritas terem uma origem sísmica pode ser fundamentada no contexto geológico regional, levando-se em consideração o fato de que na bacia vizinha do Rio do Peixe, Etchebehere (2000) e Etchebehere e Saad (2002) já haviam identificado conspícuas estruturas de liquefação (algumas ilustradas nas Fotos 2, 3 e 4), atribuídas a vibrações sísmicas. Essas ocorrências, no vale do rio do Peixe, distam 50 km em linha reta do afloramento no vale do rio Santo Anastácio (Figura 6 e Quadro 1).

O fato de as fácies de liquefação abarcarem areias bem selecionadas, limpas, de textura sacaróide, praticamente sem cimento ou matriz de qualquer espécie, mas fisicamente ligadas por diques a camadas de areias cinzentas, com matriz lamítica e mais mal selecionadas, possibilita cogitar a hipótese de uma separação granulométrica ditada por cisalhamento imposto por vibrações sísmicas. A simples ocorrência de movimentos de massa não geraria um produto liquefeito tão limpo e tão bem selecionado como se verifica nas fácies constatadas nas duas bacias. Esse aspecto já havia sido relatado no vale do rio do Peixe (ETCHEBEHERE, 2000), conquanto ainda demande melhor avaliação do ponto de vista sedimentológico e geotécnico. Os depósitos aluviais não indicam ter sofrido qualquer tipo de diagênese, cujo processo poderia, por soterramento e pressurização localizada, gerar fácies de liquefação. Pelo contrário, exceto pelas fácies lamíticas, dotadas de maior grau de coesão e por processos localizados de laterização, não se observam fácies litificadas: a regra geral parece ser o predomínio de sedimentos incoesos, friáveis, inclusive pouco resistentes aos processos erosivos, como pode ser visto nas dissecações de antigos fundos de vale e nas barrancas do atual sistema de drenagem.

A associação espacial entre os diversos tipos de estruturas de liquefação, tanto intrusivas quanto extrusivas, reforça a idéia de processos deformacionais intensos, de ampla abrangência nesse setor do vale, tornando mais remota a possibilidade de estarem ligados a movimentos de massa localizados em determinados trechos. As características evidenciadas nos pontos de identificação das estruturas

são idênticas em todos os pontos e em ambas as bacias. As distâncias entre os pontos e suas feições permitem sugerir que tais estruturas foram evidenciadas na mesma época. Ainda assim, é necessário elaborar um inventário sistemático de tais estruturas nas duas bacias, e também em outras áreas adjacentes, para que se possa estabelecer com maior precisão as prováveis correlações.

Contudo, a hipótese de uma origem sísmica expressiva (magnitudes superiores a 5) ainda deixa um segundo conjunto de questões a resolver:

- Quando haveria ocorrido este evento?
- As estruturas evidenciadas estão relacionadas a um sismo ou a mais de um tremor?

Ainda que não haja um fechamento completo para essas dúvidas, seguem-se adiante as considerações acerca deste evento.

Na bacia do rio Santo Anastácio, a datação por ^{14}C de material da base da camada lamítica constritora, indica idade de 32.340+/-320 anos A.P. (Figura 7), coloca um limite máximo para a idade do eventual sismo, que, indubitavelmente, ocorreu após a formação do lamito. O Quadro 1 mostra, além desta ocorrência, também as informações básicas acerca de estruturas de liquefação ao longo do vale do rio do Peixe, incluindo as possíveis idades dos depósitos onde se inserem. Vale ressaltar que a capacidade de um sedimento se liquefazer diminui com o aumento da idade, implicando que tais processos ocorram em sedimentos incoesos e saturados.

No caso dos depósitos de terraço, como esses encontrados, tanto no vale do rio do Peixe como no próprio vale do rio Santo Anastácio, isto implica em que as eventuais estruturas de liquefação se formaram quando aqueles sedimentos aluviais constituíam as antigas planícies de inundação. Alçadas à condição de terraços e com o aumento da coesão e mesmo do grau de litificação, as probabilidades de serem liquefeitas por eventos sísmicos mais jovens diminui acentuadamente (ETCHEBEHERE, 2000).

O fato de os vulcões de areia ainda estarem razoavelmente preservados na bacia do rio do Peixe, é sugestivo de uma idade relativamente jovem para o evento sísmico, embora a amarração da idade demande, necessariamente, uma investigação cuidadosa no trabalho de detalhamento, onde as datações por Termoluminescência - TL podem vir a ser a pedra-de-toque, haja vista o tipo de material (areias).

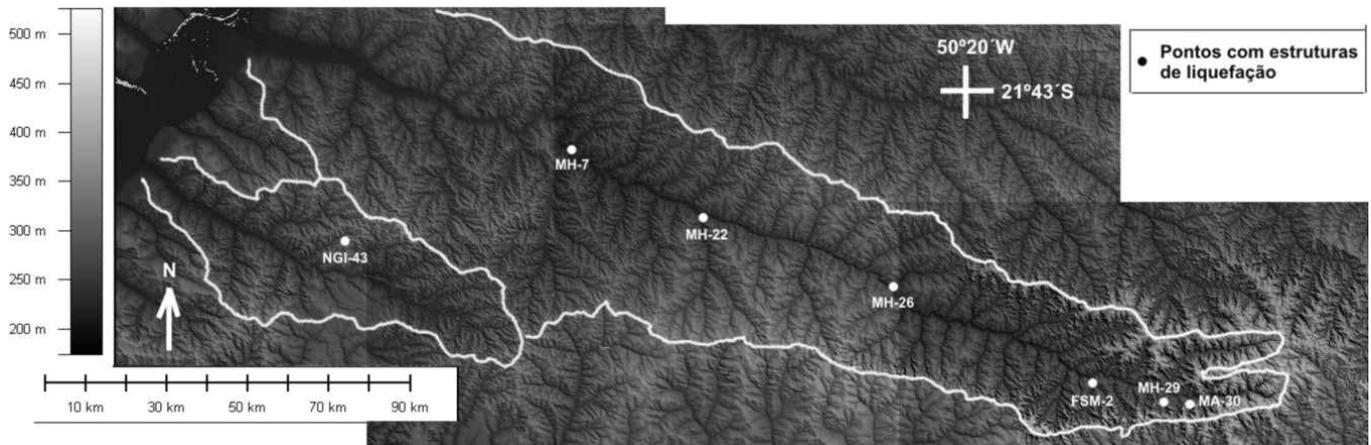


FIGURA 6: Pontos relativos às estruturas de liquefação identificados nas bacias do rio do Peixe e do rio Santo Anastácio. Modificado de Etchebehere (2000) e Guedes (2008).

FIGURE 6: Relative points to the structures of liquefaction identified in the basins of rio do Peixe and of rio Santo Anastácio. Modified of Etchebehere (2000) and Guedes (2008).

| PONTO | COORDENADAS UTM | TIPOLOGIA | POSIÇÃO ESTRATIGRÁFICA | SISMO | IDADE DO DEPOSITO ALUVIAL |
|----------------------------|---------------------|--|------------------------|-------|------------------------------|
| RIO SANTO ANASTÁCIO | | | | | |
| NGI-43 | 7.565.303 – 427.158 | Vulcões de areia, sills, diques e brechas intraestratais | Terraço aluvial | ? | 32.340±320 anos A.P. |
| RIO DO PEIXE | | | | | |
| MH-7 | 7.595.560 – 476.740 | Vulcões de areia (10-15 m de diâmetro x 1 m altura) | Alomembro C | "C" | Limite Holoceno-Pleistoceno? |
| MH-22 | 7.573.630 – 505.825 | Sills de areia (espessuras centimétricas) | Alomembro B | "B-M" | ca. 24 ka. A.P. |
| MH-26 | 7.555.220 – 548.375 | Diques, sills, brechas intraestratais (espessuras de até 0,5 m) | Alomembro M | "B-M" | 24.370±770 anos A.P. |
| FSM-2 | 7.532.210 – 594.950 | Sills e diques de areia (espessuras de até 0,6 m) | Alomembro M | "B-M" | s.d. |
| MH-29 | 7.526.760 – 608.275 | Sills e diques de areia, espessuras centimétricas e extensões métricas | Alomembro L | "L" | 27,5 ka. – 35 ka. A.P. |
| MA-30 | 7.525.860 – 615.420 | Sills e diques de areia centimétricos, possíveis vulcões de areia | Alomembro L | "L" | 27,5 ka. – 35 ka. A.P. |

Obs.: os dados referentes à bacia hidrográfica do rio do Peixe são de Etchebehere (2000); as idades baseiam-se em datações por radiocarbono.

QUADRO 1: Localização e características básicas das ocorrências de estruturas de liquefação nas bacias do rio do Peixe e do rio Santo Anastácio.
TABLE 1: Location and basic characteristics of the liquefactions structures in the basins of rio do Peixe and of rio Santo Anastácio.

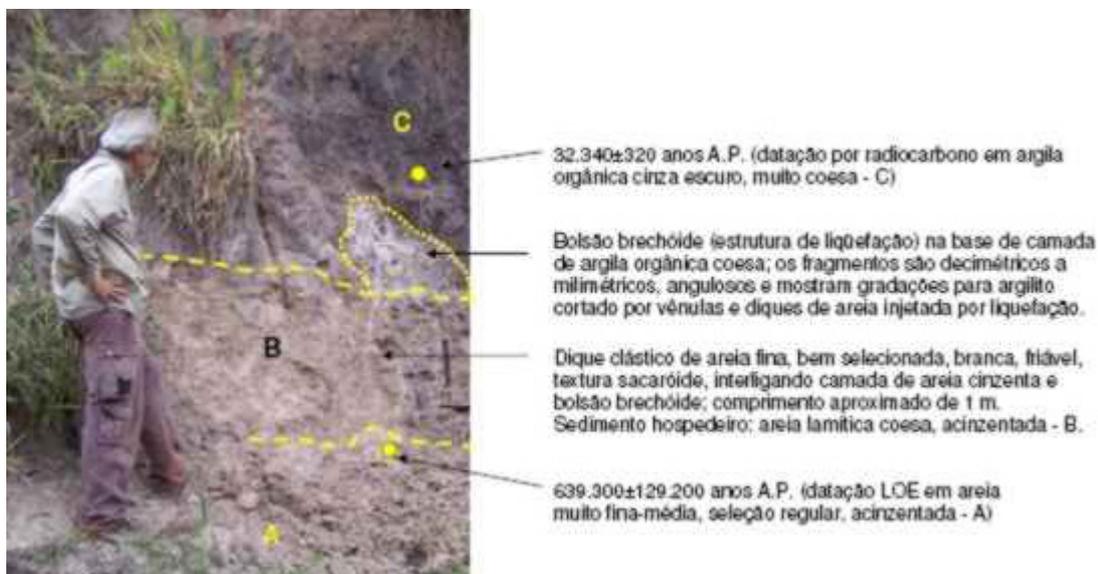


FIGURA 7: Pontos de amostragem para datação do afloramento NGI-43, onde foram constatadas estruturas de liquefação em sedimentos aluviais e colúvio-alúvio.

FIGURE 7: Points of sampling for dating of the outcrop NGI-43, where structures of liquefaction were noted in alluvial sediments and alluvium colluvium.

As dúvidas remanescentes, que demandarão investigações detalhadas para serem esclarecidas são:

(1) Os vulcões de areia, ao se constituírem em material extrusivo na ocasião do terremoto e, assim, terem ficado expostos à luz solar, teriam zerado o seu “relógio TL”?

(2) Teria a cobertura vegetal que se implantou sobre eles (grama), bem como a maior espessura de alguns dos vulcões impedido a contínua “zeragem” do referido relógio, preservando, dessa forma, a idade do suposto sismo? e

(3) Qual a margem de segurança para que os resultados de datações por termoluminescência possam ser considerados plenamente confiáveis?

Para o esclarecimento desses pontos tornam-se recomendáveis trabalhos adicionais de campo, com o escopo de cadastrar sistematicamente as estruturas de liquefação no vale do rio Santo Anastácio; de estabelecer a tipologia e o zoneamento espacial, acompanhado do estabelecimento preciso das idades das feições; além disso, é recomendável, também, proceder à amostragem criteriosa dos sedimentos liquefeitos para caracterizá-los em termos sedimentológicos e geotécnicos.

Finalizando, acredita-se que o reconhecimento de novas ocorrências de estruturas de liquefação seja questão de tempo, de novos trabalhos de campo e de familiarização dos pesquisadores com tais feições e com as características fisiográficas do oeste paulista. A integração de novas informações e o refinamento paleossísmico da região serão passos importantes, que permitirão definir melhor o quadro neotectônico e sísmico, desta parte do território paulista e a decorrente avaliação dos riscos de novos terremotos. Com base no atual conhecimento, todavia, já é possível julgar que se dispõe de uma boa ferramenta analítica e de argumentos que justifiquem novas investigações geológicas na área.

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.

ASSINE, M. L. **Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas na Bacia do Paraná no Brasil**. 1996. 207 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

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

BEZERRA, M.A. **Influência do uso da terra na incidência de processos de dinâmica superficial na região de Marília (SP)**. 2008. 140 f. Dissertação (Mestrado em Análise Geoambiental) – Centro de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Guarulhos, Guarulhos, SP, 2008.

ETCHEBEHERE, M. L. C. **Terraços neoquaternários no vale do rio do Peixe, Planalto Ocidental Paulista: implicações estratigráficas e tectônicas**. 2000. 2 v. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

_____. Feições de liquefação: implicações paleossísmicas e exemplos de aplicação. In: JORNADAS DEL CENOZÓICO DEL URUGUAY, 2., 2002, Montevideo. 2002.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R. Feições de liquefação em sedimentos quaternários no vale do rio do Peixe, região ocidental paulista: implicações paleossísmicas. *Geociências*, v. 21, n. 1/2, p. 43-56, 2002.

ETCHEBEHERE, M. L. C. et al. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do Rio do Peixe, região ocidental paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em segmentos de drenagem. *Geociências*, v. 25, p. 290-319, 2006.

ETCHEBEHERE, M.L.C. et al. Feições de liquefação em sedimentos cenozóicos no vale do Rio do Peixe, região ocidental paulista: implicações neotectônicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, Belo Horizonte, 1998. *Anais...* Belo Horizonte, SBG, 1998, p. 80.

FÚLFARO, V.J. et al. Santo Anastácio: um geossolo cretácico na Bacia Caiuá. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5., 1999, Serra Negra. *Boletim...* Serra Negra: UNESP, 1999. p.125-130.

GUEDES, I. C. **Aplicação de análise flúvio-morfométrica na bacia hidrográfica do rio Santo Anastácio-SP para detecção de deformações neotectônicas**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Guarulhos, Guarulhos, 2008.

GÜRPINAR, A. The importance of paleoseismology in seismic hazard studies for critical facilities. *Tectonophysics*, v. 408, p. 23-28, 2005.

JUSTUS, J. O. **Subsídios para interpretação morfogenética através da utilização de imagens de radar**. 1985. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 1985.

KELLER, E. A.; PINTER, N. **Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape**. New Jersey: Prentice Hall. 1996.

MICHETTI, A. M. et al. Future trends in paleoseismology: integrated study of the seismic landscape as a vital tool in seismic hazard analyses. **Tectonophysics**, v. 408, p. 3-21, 2005.

MILANI, E. J. Terrenos, orogenias e a evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS – SNET, 7., 1999, Lençóis, BA. **Atas...** Lençóis: SBG-BA, 1999. p. 3-6.

MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. **Episodes**, v. 22, n. 3, p. 199-205, 1999.

MONBEIG, P. **Pioneiros e fazendeiros de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1984.

OBERMEIER, S. F. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis – An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. **Engineering Geology**, v. 44, p. 1-76, 1996.

OBERMEIER, S.F. Liquefaction evidences for strong earthquakes of Holocene and Late Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA. **Eng. Geol.**, v. 50, p. 227-254, 1998.

OBERMEIER, S. F.; POND, E. C. Issues in Using Liquefaction Features for Paleoseismic Analysis. 38 p. Reston, Virginia: U.S. **Geological Survey** Open-File Report 98-28, 1998.

OBERMEIER, S. F. et al. Liquefaction evidence for one or more strong Holocene earthquakes in the Wabash Valley of Southern Indiana and Illinois, with a preliminary estimate of magnitude. **United States Geological Survey Professional Paper** 536, 27 p. 1993.

SAADI, A. Neotectônica da plataforma brasileira: esboço e interpretação preliminares. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 1-15, nov. 1993.

SALLUN, A. E. M. **Depósitos cenozóicos da região entre Marília e Presidente Prudente (SP)**. 2003. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SEILACHER, A. Fault-graded bed interpreted as seismites. **Sedimentology**, v. 13, p. 155-159, 1969.

STEIN, D. P. **Avaliação da degradação do meio físico – Bacia do rio Santo Anastácio, oeste paulista**. 1999. 2 v. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.